

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

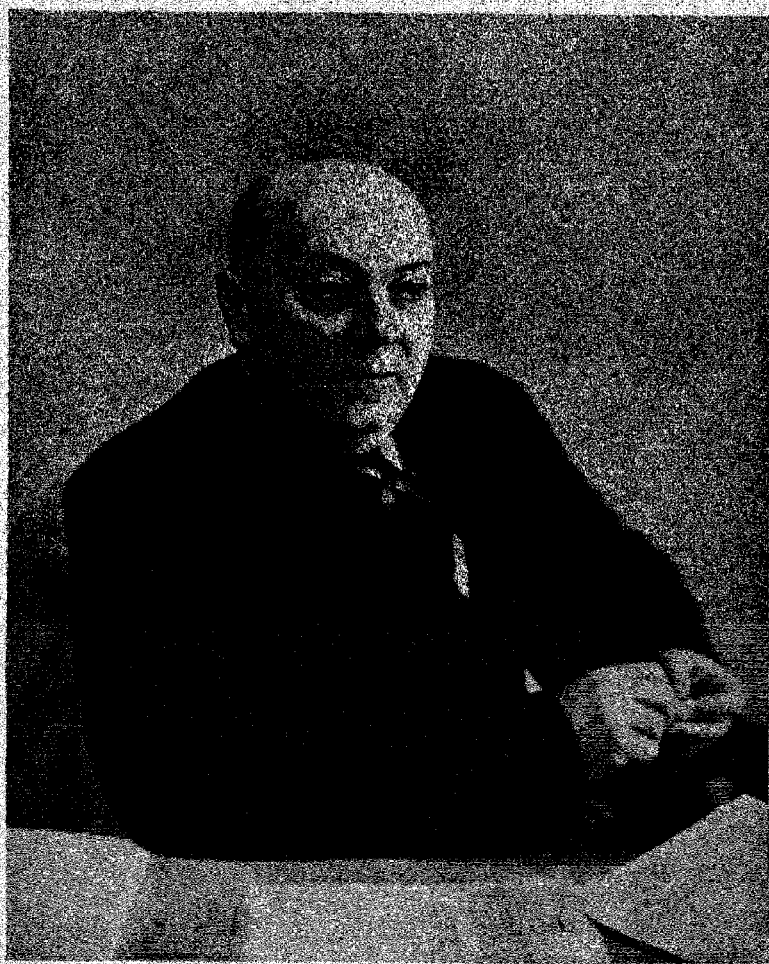
АКАДЕМИК

А.Е.ФЕРСМАН

ИЗБРАННЫЕ
ТРУДЫ

ТОМ
II

ИЗДАТЕЛЬСТВО АКАДЕМИИ НАУК СССР
МОСКВА • 1953



А. И. Озеров

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

академик

Д. С. БЕЛЯНКИН

ОТВЕТСТВЕННЫЕ РЕДАКТОРЫ

член-корреспондент АН СССР Д. И. ЩЕРБАКОВ

доктор геол.-мин. наук В. В. ЩЕРБИНА

ПРЕДИСЛОВИЕ

Начало XX века ознаменовалось в истории геологических знаний крупнейшим событием — рождением геохимии, первые проблемы которой наметил еще М. В. Ломоносов. Эту ветвь геологической науки, изучающую законы распределения и перемещения атомов на нашей планете, создали и оформили в самостоятельную дисциплину наши замечательные русские ученые — академик В. И. Вернадский и его лучший и талантливейший ученик академик А. Е. Ферсман. Эта новая отрасль геологии с ее важными проблемами и широкими возможностями была создана не сразу и потребовала громадной творческой работы. Но она же была и наиболее подходящей областью для плодотворного применения богатых творческих сил А. Е. Ферсмана.

Сорокалетняя дружба, основанная на общности научных идей и взаимном уважении, связывала А. Е. Ферсмана с его выдающимся учителем В. И. Вернадским, у которого он почерпнул впервые, еще в бытность студентом Московского университета (1904—1907 гг.), интерес к геохимии и первые геохимические познания. А. Е. Ферсман с присущей ему страстью увлекся новыми только что зарождавшимися геохимическими идеями и, будучи исключительно одаренным и необычайно работоспособным, в скором времени выдвинулся в ряды ведущих мировых ученых, с именами которых связаны постановка и разрешение основных, узловых проблем геохимии.

Оба исследователя, работая каждый в своем направлении и своими методами, разрешали сложные проблемы и постепенно, шаг за шагом, создавали современную геохимию, рассматривающую поведение атомов химических элементов в земных оболочках в зависимости от различных термодинамических условий, господствующих в этих оболочках. При этом ими было так определено взаимоотношение между минералогией и геохимией: «минералогия изучает минералы, как сочетания атомов в природе, а геохимия — самый химический элемент в истории Земли».

Исторический подход, основанный на материалистических воззрениях, и практическая направленность резко отличают советскую геохимическую школу от буржуазных школ с их статическим направлением. В послереволюционные годы были созданы условия, необычайно благоприятные для роста геологических наук вообще и геохимии в частности; в грандиозных масштабах проводились поиски и разведка полезных ископаемых, притом зачастую в совершенно неизученных районах, и был накоплен богатый и разнообразный геохимический материал.

Лично участвуя в многочисленных экспедициях, Александр Евгеньевич берется за разрешение совершенно новых геохимических задач и достигает больших успехов. Примером этого могут служить его работы по изучению апатита и никеля на Кольском полуострове и серы в Кара-Кумской пустыне.

А. Е. Ферсман был не только крупнейшим геохимиком, но и выдающимся минералогом, причем его глубокие минералогические исследования послужили основой для геохимических построений; поэтому, анализируя отдельные его работы, трудно, а подчас и совершенно невозможно отделить его геохимические идеи от минералогических выводов.

Каждого, кто соприкасался с Александром Евгеньевичем, он поражал широтой своих интересов, богатством и глубиной знаний в самых разнообразных областях: минералогии и кристаллографии, химии и технологии, физике и геофизике, геологии и учении о минеральных месторождениях, почвоведении и гидрологии, географии и экономике, спелеологии и аэрофотосъемке, астрономии, истории материальной культуры, архитектуры, истории науки.

Проследивая по печатным работам Александра Евгеньевича эволюцию его научного творчества, можно хорошо видеть, какими быстрыми шагами шло развитие геохимии, как изменялось направление научной мысли и интересов ученого и как зарождались новые научные идеи. В рамках же настоящего предисловия мы коснемся лишь тех работ, которые публикуются в настоящем томе избранных трудов.

С теоретическими вопросами геохимии А. Е. Ферсман всегда тесно увязывал вопросы региональных геохимических исследований и практическое изучение рудных месторождений.

Первой регионально-геохимической работой Александра Евгеньевича была его известная «Геохимия России», вышедшая отдельной книгой в 1922 г. «Геохимия России» была написана в то время, когда геохимическое направление в работах минералогов делало только первые шаги. Тридцать лет тому назад фактического материала для полного установления взаимоотношений между физическими и химическими процессами земной коры на территории Советского Союза было еще очень мало. Поэтому некоторые обобщения можно было высказать только предположительно, руководствуясь «смелой догадкой, аналогией, теорией». В настоящее время собраны обширные материалы, которые уточняют обобщения автора или вносят в них известные поправки. Однако «Геохимия России» получила очень высокую оценку как труд, указавший путь, по которому должно было идти развитие у нас этой новой науки. Теперь мы можем видеть, какие успехи сделала геохимия в Советском Союзе за истекшее время, в частности изучение геохимических процессов в осадочных породах. Книга А. Е. Ферсмана, несомненно, выполнила свое назначение, пробудив в широких кругах геологов интерес к изучению геохимических явлений на необъятных просторах нашей Родины. Это было, по существу, первое изложение теоретических взглядов Александра Евгеньевича в области геохимии с отражением состояния науки того времени. Сопоставление с выпущенной в 1931 г. работой «Геохимические проблемы Союза» показывает, как далеко шагнула советская наука за эти девять лет, сколько новых достижений имела региональная геохимия к концу первой пятилетки и насколько ближе она стала за эти годы к разрешению актуальных народнохозяйственных проблем.

В указанной статье А. Е. Ферсман приводит разработанные им регионально-геохимические понятия, разбирает важнейшие задачи, стоявшие в 1931 г. (дата опубликования статьи) перед региональной геохимией СССР, и намечает частичное их разрешение на основе изучения распреде-

ления месторождений полезных ископаемых Советского Союза и их приуроченности к определенным геологическим структурам, стратиграфическим элементам и физико-географическим зонам.

Эта работа является основной для постановки геохимических (точнее — элементо-генетических) исследований на территории СССР.

В этом же свете написана статья о геохимических проблемах Сибири, где также говорится о возможностях этого края как источника минерального сырья.

В своих работах «Химические элементы Земли и космоса» (1923) и «Строение и состав Земли как космического тела» (1928) Александр Евгеньевич суммирует знания по этому вопросу, относящиеся к 1923—1928 гг. Мы видим, как он занялся одной из интереснейших, но и труднейших проблем геохимии — изучением химического состава не только нашей планеты, но и других космических тел: Солнца, метеоритов, звезд. На основе химических анализов метеоритов и количественного спектрохимического анализа светил он критически перерабатывает касающиеся этого вопроса цифровые данные того времени и вскрывает таившиеся за ними закономерности.

Современная советская наука обогатилась многими новыми сведениями по этому вопросу, тем не менее статьи Александра Евгеньевича представляют значительный исторический интерес, показывая, с одной стороны, состояние космохимических знаний в первой четверти XX века, а с другой — смелые новаторские идеи, возникшие в такой широкой постановке впервые только в Союзе ССР.

Сочетая достижения того времени в области физики и химии с данными астрономии, А. Е. Ферсман заложил основы космохимии — науки о химических процессах, идущих во вселенной, и окончательно блестящим образом подтвердил материальное единство вселенной. И метеориты, и Земля, и вообще все небесные тела солнечной системы состоят из одних и тех же химических элементов, что говорит об их общем происхождении, об их генетической связи. В этом заключается ценность указанных работ.

В статье «Законы эволюции в химии земной коры» (1930) и в очерке «Периодический закон Менделеева в свете современной науки» (1941) Александр Евгеньевич с большим мастерством и блеском дает яркую картину истории зарождения науки о химических элементах, открытия периодического закона Менделеева, значения и роли его в различных областях современного естествознания и техники и рассматривает его философское содержание и общенаучное значение. Во всех своих геохимических работах Александр Евгеньевич проводил основную мысль — о связи распространения и поведения элементов на Земле с их свойствами. Поэтому он постоянно отводил особую роль, как одному из методов геохимии, анализу периодической системы Менделеева.

Вышедшая в 1932 году работа «Институт имени М. В. Ломоносова и задачи его учреждений» содержит не только принципы построения геохимического института, но также сжатое, образное изложение основных задач геохимии.

А. Е. Ферсман, выдающийся теоретик-минералог и геохимик, был вместе с тем и крупным практическим деятелем в области выявления и освоения полезных ископаемых. Свои глубокие теоретические исследования он умело сочетал с практическими задачами и дал многочисленные прекрасные образцы приложения теории к практике.

Итогом богатейшего опыта и всесторонне разработанной теории являются слова Александра Евгеньевича: «Я глубоко убежден, что вся поисковая

работа в неведомых и девственных областях должна перестраиваться вообще по новому основному принципу: найти можно только то, что ищешь, а искать нужно в данном районе только то, что при данном сочетании геологических и физико-химических условий может и должно в данном районе находиться. Только такой прогноз, который толкает мысль в определенном направлении, который заостряет глаз на поиски определенного объекта, а не вообще „чего-нибудь полезного“, приводит к реальным результатам.

Отсюда вытекает особая важность для поисков месторождений анализа геохимических возможностей данной территории, основанного на законах распределения вещества и на выводах физической химии, в соответствии с геологической историей всего района.

Вопросам поисков полезных ископаемых А. Е. Ферсман придавал всегда очень большое значение, постоянно подчеркивая, что они должны вестись на широкой научной геохимической основе. Особенно полное выражение эти мысли нашли в книге «Геохимические и минералогические методы поисков полезных ископаемых», выпущенной в 1940 г. и являющейся первой сводкой богатого теоретического материала и тех многочисленных практических наблюдений, которые были сделаны автором за 30 с лишним лет полевой работы в разных районах нашей страны. В этой книге автор выступает не только как теоретик-геохимик и минералог, но и как опытейший практический работник, который стремится передать свой богатый опыт, свои знания широким массам советских поисковиков, перед которыми поставлены грандиозные задачи — найти и поставить на службу социалистической Родине неисчислимые горные богатства, талящиеся в ее недрах.

Мы попытались самыми краткими штрихами обрисовать образ А. Е. Ферсмана как геохимика, коснувшись только некоторых из его идей, высказанных в работах, публикуемых в данном томе, и, конечно, осветили лишь очень небольшую часть научного и практического наследства, которое оставил после себя А. Е. Ферсман.

Всю свою яркую, кипучую жизнь А. Е. Ферсман отдал служению науке и Родине. Его научное наследство еще долгие годы будет определять направление наших научных геохимических и минералогических исследований и вызывать к жизни новые мысли и новые творческие силы.

Р е д а к ц и я

РЕГИОНАЛЬНАЯ ГЕОХИМИЯ

ГЕОХИМИЯ РОССИИ¹

Выпуск I

ВВЕДЕНИЕ

Мне хотелось бы, чтобы эту книгу взял в руки тот, кто любит русскую природу, кто ищет в ней проявления широких и общих законов мироздания. Не учебник, подогнанный к требованиям программы, не трактат для специалистов минералогов или геологов хотел написать я, а книгу для натуралиста — о химической жизни нашей страны. Выдвигая на первый план общие законы геохимии, я неизбежно должен в ней касаться таких положений, которые не вполне вошли в обиход научной мысли, и таких областей, где отсутствие точных исследований заставляет идти, руководясь только смелой догадкой, аналогией, теорией. Мне приходилось становиться на этот путь очень часто, но без него я не мог идти вперед.

Глубоко убежденный в красоте и широте тех обобщений, которые нам дает в настоящее время *г е о х и м и я*, я старался пробудить в читателе сознание величия тех бесконечно медленных и вместе с тем грандиозных физико-химических процессов, которые незаметно, но неуклонно изменяют, перегруппировывают земную кору, лежат в основе ее геологических превращений, ее органической жизни и даже культурного развития человека.

Пусть читатель посмотрит на эту книгу, как на ряд отрывочных очерков химической жизни Земли, пусть любитель-минералог увидит в ней новое освещение, может быть, уже известных фактов русской минералогии, пусть химик прочтет в ней о приложении общих законов химии к природным процессам, а натуралист-географ, любящий и интересующийся русскою страной, проникнется величием тех законов, которые лежат в основе всех явлений природы на ее поверхности.

Я смотрю на «Геохимию России» лишь как на первую попытку подойти к геологическим процессам с чисто химической точки зрения. Я исходил при этом из мысли, что в общем геологическом цикле наук слишком мало места отводилось изучению химических явлений нашей планеты и что геология, как таковая, во всем комплексе знаний об истории Земли, не может не включать в себя и знание о химических судьбах, химических превращениях и группировках в смене геологических эпох. Мне казалось

¹ Печатается по изданию Научного хим.-техн. изд-ва, 1922.—Ред.

необходимым попытаться слить в единую картину и физические, и химические превращения Земли, установить между ними зависимость и подчинить общим законам.

Связывая таким образом результаты минералогических исследований с успехами изучения геологии России, я имел в виду перебросить мост между физикой и химией земной коры и этим закрепить то новое геохимическое направление, которое внесено в минералогию работами последних десятилетий. Пока все здание современной геохимии строится почти исключительно на качественных данных, точный количественный учет и точная физико-химическая формулировка, к сожалению, еще невозможны.

Эта попытка моя вряд ли может считаться удавшейся: она скорее только канва, по которой дальнейшая работа вышьет узоры химических судеб страны в ее прошлом и настоящем. И тем полнее и стройнее будет этот будущий рисунок, чем больше фактического, описательного и аналитического материала накопит русская наука, чем полнее будет изучен русский минерал, его свойства, месторождения и химический состав.

В основу книги я положил курс лекций, читанных в Петроградском университете в 1919—1920 годах и повторенных и расширенных в 1920—1921 годах в Географическом институте. В этой сводке я впервые пытался связать в более стройное целое свои наблюдения над минералогией Крыма, русского Севера, Центральной России, Урала, Забайкалья и отчасти Алтая и Саян. Только личное знакомство с главнейшими районами русской земли позволило мне вникнуть ближе в геохимические судьбы нашей страны и связать минерал с определенными геологическими явлениями.

Минералогический музей Академии Наук, в своем основном и топографическом собраниях, а также собрания Московского университета дали мне ценнейший материал для проверки некоторых выводов и сводки фактического материала.

Главнейшую литературу я даю в конце каждой главы, поместив в подстрочных примечаниях лишь некоторые необходимые ссылки, так как более детальное изложение вопроса я отлагаю до того времени, когда настоящую задачу удастся осветить с большей полнотой и с большей продуманностью.

Петроград, 1921 г.

Часть общая

Глава I.

ТИПЫ ТОПОМИНЕРАЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Под именем топоминералогических исследований я понимаю минералогические описания отдельных областей земной поверхности. С этой точки зрения как объемистая «Минералогия Алтая» П. П. Пилипенко, так и чисто морфологическое описание минералов окрестностей Москвы А. Иванова являются в равной мере топоминералогическими работами, хотя и преследуют разные цели и в значительной степени содержат различный материал.

Такие топоминералогические исследования составлялись в разных странах в зависимости от тех или иных задач то по областям, охватывавшим целые государства, то по отдельным районам, с детальными описаниями каких-либо незначительных участков, рудничных центров, административных единиц и т. д.

В одних случаях они являлись просто сводками литературы, освещающими результаты изучения минералов данной области, в других, и это было чаще, при изучении небольших районов описания имели целью охарактеризовать все минералы, которые были встречены, и отметить точно места, в которых они наблюдаются, и иногда условия, в которых встречаются. Гораздо реже в таких описаниях давалась характеристика минералов, встречавшихся вместе и особенно при изучении месторождений полезных ископаемых, делались попытки выяснить условия образования минералов и ту естественную генетическую связь, которая между ними наблюдается. Третья группа таких работ преследовала чисто практические цели и давала подробное изложение вопроса о полезных ископаемых какой-либо области, об их свойствах и видах использования.

Таким образом, топоминералогические исследования носили весьма разнообразный характер и каждое из них освещало ту или иную грань вопроса, в зависимости от индивидуальных черт исследования, основных задач работы и национального характера научных взглядов в данной стране.

Заграничная литература дает нам богатейший материал в этом направлении и показывает, сколь разнообразными могут быть такие сводки и насколько в них отсутствует какая-либо одна объединяющая идея. Для более глубокого понимания задач настоящей книги я вкратце приведу очерк главнейших топографических исследований отдельных государств и попытаюсь показать, как до сих пор составлялись эти описания.

Еще в 1726 г. вышла первая топоминералогическая работа в двух частях, касающаяся Швеции: *Lithographie sueciae Magni de Brothell*. В течение всего XVIII века продолжалось накопление весьма точного описательного материала, и к началу XIX столетия уже собрано было столь большое количество разрозненных данных, что можно было попытаться свести их воедино.

Эту задачу не без успеха выполнил Леонгард в своем трехтомном сочинении «*Handbuch einer allgemeinen topographischen Mineralogie*» (Leonhard C. C. Frankfurt a. Main, 1805—1809). После него общие сводки, с краткими указаниями свойств и с перечислением известных месторождений, повторялись несколько раз, причем последним изданием этого типа приходится назвать общеизвестную минералогию Гипце, начатую еще в 1890 г., но до сих пор не законченную.

Одновременно с этим шло сопоставление описательных топографических минералогий по отдельным странам, библиография которых прекрасно сведена в первом томе «Опыта» В. И. Вернадского (СПб., 1914, стр. 48—113; дополнения, стр. 717—739).

В Европе И с п а н и я и П о р т у г а л и я топоминералогически изучены слабо, несмотря на незначительную территорию, доказательством чего могут служить хотя бы открытия последнего времени — платины, солей калия, фосфатов урана и вольфрамовых руд.

Недурная работа Гальдерона, в двух томах, дала в 1910 г. сводку сведений о минералах большей части Пиренейского полуострова, но осталась в рамках сухих схем старой минералогии, дополнив и лишь видоизменив старую книгу 1902 г., вышедшую на немецком языке (совместно с Тенне).

Гораздо выше стоит минералогическое изучение Ф р а н ц и и, благодаря огромной работе Лакруа, который, начиная с 1895 по 1915 г., дал превосходное исследование минералов Франции. Хотя в основу своего пятитомного труда он положил обычную классификацию по минеральным видам, но при описании каждого из них распределил материал по генетическим типам и при характеристике некоторых из них дал геохимические описания. Этот недавно законченный труд, со справочным указателем, венчает большую описательную работу многочисленных французских минералогов, трудившихся над минералогией родной страны.

Гораздо меньше сведений имеем мы по топографической минералогии А н г л и и в ее европейских владениях. Описание родных минералов мало влекло к себе английских ученых и потому, за исключением Шотландии, точно освещенной в посмертном издании Хеддла (Heddle Goodchild. Mineralogy of Scotland, 1906), мы не имеем сколько-нибудь полных сводок по этому вопросу (сводка Грега и Летсэма 1858 г. сильно устарела).

Сравнительно мало сделано по топографической минералогии в Г е р м а н и и, где имеются, правда, многочисленные и подчас прекрасные сводки по отдельным небольшим районам (Саксония, Бадену, Сплезии, Гарцу и др.), но нет исчерпывающих описаний самих минералов и не сделано попытки в более широком масштабе связать эти минералы в общую генетическую картину. В этом отношении Германия стоит, несомненно, позади скандинавских государств, где описание минералов Ю ж н о й Н о р в е г и и Брёррепа (B r ö g g e r W. C. Zs. Kryst. u. Min., XVI, 1890 и Vidensk. Skrift, 1906, I, Kristiania) является классическим. Обстоятельна, точна и полна новейшая сводка минералов Ш в е ц и и, издаваемая Флинком в шведском научном журнале (Arkiv f. Kemi-Miner. och Geologi, 1908—1914).

Совершенно исключительной и единственной в своем роде полнотой отличаются наши сведения по минералогии А в с т р о - В е н г р и и и Ч е х и и. Огромное разнообразие минералов, любовь к коллекционированию и широкое изучение местной природы — все это создавало в Австрии тот интерес к камню, в результате которого и явился ряд детальных описаний минеральных богатств страны (Тироль — Гассер, Каринтия — Гёффер, Трансильвания — Кох и др.), собранных воедино в классическом труде Цефаровича, выходявшем в течение почти полувека (Mineralogisches Lexicon, 1859—1894, Wien, I—III). Эту же детальность изучения местной природы разделяет и соседняя Ш в е й ц а р и я с ее хорошими, хотя и устаревшими сводками Визера (1838—1872 гг.) и Кеннготта (1866 г.).

Если оставить без внимания Бельгию, Сербию, Грецию и другие более мелкие государства Европы, то остается еще сказать лишь несколько слов об Италии, где разнообразие и своеобразие минералообразовательных процессов уже давно привлекало к себе не только итальянских ученых, но и приезжих натуралистов (Рата, Лакруа и многих других). Если для Италии в целом мы не имеем полной минералогической сводки, то во всяком случае для отдельных ее районов (Везувия, Эльбы, Каррары, Тосканы) описания минералов детальны, полны точных данных и дают прекрасный научный материал.

Наконец, мы кончим наш беглый обзор топоминералогических работ Европы указанием на то, что наиболее изученною ее частью является Финляндия, которая благодаря работам Гадда, Н. и А. Норденшильдов, Вийка и сводкам Куторги и Гольмберга даст нам наиболее детальную и ясную картину распространения отдельных минералов на определенной территории.

Из азиатских стран недурно, хотя и неглубоко, изучена Япония — благодаря трудам Вада; Персия, благодаря сводкам немецких деятелей Шмейссера, Титце, Сталя (русского исследователя), даст нам представление только о полезных ископаемых; Малая Азия тоже известна нам лишь в отрывках Освальда (Армения), Чихачева (северная часть), де Лоне (район Мраморного моря и Смирны); за время войны, в период германской оккупации, немцами довольно обстоятельно изучены и сведены не только богатства Малой Азии, но и Балканского полуострова. Зато совершенно исключительно хорошо изучены в минералогическом отношении английские колонии, особенно Индия. Минералогия Индии Малле хотя и написана в 1887 г., дает превосходную и глубокую сводку, дополненную ежегодными новыми работами Индийского геологического комитета (особенно Голланда, 1908 г.). Недурно изучен и Цейлон, а также Индокитай.

В Северной Америке сделаны за последние годы огромные успехи в минералогическом изучении страны, и хотя мы не имеем полной сводки для всей страны, составленной по одному типу и идее (кроме списков Дана), зато имеется очень большое количество отдельных описаний, среди которых последние работы, особенно Ван-Хайза, Линдгрена, Эммонса и других, заслуживают особого внимания. Не менее хорошо изучена Канада, но особенно детально Гренландия — благодаря трудам Уссинга (1898 г.), Бёггилда (1905 г.) и Флинка.

Из центральных южноамериканских государств недурно изучены Мексика, Аргентина (польским эмигрантом Домейко, 1879—1883 гг.), Перу и отчасти Бразилия.

Для Африки наши сведения очень отрывочны и неполны, если только исключить французские колонии (Алжир и Мадагаскар), для которых уже вышеуказанное многотомное сочинение Лакруа дает незаменимую сводку. В последние годы перед войною началось изучение колоний немцами, тогда как английские владения и вся центральная часть Африки, Абиссиния и даже Египет почти не дают нам сведений по вопросам минералогии.

Наконец, для Австралии мы имеем только частичную, но хорошую книжку Ливерсайджа для Нового Южного Уэльса; для всех остальных районов Австралии мы имеем только ряд частных описаний, до сих пор еще не объединенных.

Таковы главнейшие данные по топоминералогическим работам, касающимся нерусских стран.

В каком же положении находится топоминералогическое изучение России?

Я не буду останавливаться на частностях нашей литературы и степени изученности отдельных областей, так как именно этому вопросу посвящаю много внимания в специальных главах по отдельным геохимическим областям нашей страны. Здесь же я вкратце остановлюсь на главнейших сводках общего характера, касающихся России в ее целом.

Основной материал для минералогии России дали многочисленные академические экспедиции второй половины XVIII века; в первую очередь Паллас (1771—1785 гг.), затем целая плеяда натуралистов—Георги, Лепехин, Гильдсшtedт и др. дали первые сведения, правда очень отрывочные и разрозненные, о минералах России. Они дополнены и отчасти сведены в прекрасных работах Германа по Уралу (1789 г.), Попова по Пермской губ. (1804—1811 гг.) и некоторых других. Оставалось лишь систематизировать все эти данные и свести их, расположив по минералогической системе. Этот труд взял на себя Георги, который, с одной стороны, непосредственно и близко знаком был с работами своих товарищей по Академии и с результатами их экспедиций, с другой, как хранитель геологической части Кунсткамеры и автор ее минералогического каталога, имел уже в руках систематический список минералов с их месторождениями. Все это дало ему возможность дать первую в России топоминералогическую сводку в своей «*Physikalische Beschreibung des Russischen Reiches*»¹ (1798 г.). Хотя эта работа и представляла лишь сухой перечень минералогических и географических названий и лишь изредка дополнялась коротенькими примечаниями по существу, но именно она дала возможность известному академику В. М. Севергину положить начало более глубокому изучению русских минералов в его «Опыте минералогического землеописания Государства Российского» (2 тома, 1809 г.), впервые внеся в него чисто географический принцип.

Первая половина XIX века дает нам относительно мало по сравнению с успехами русской науки в екатерининское время: шло накопление фактического материала, описание отдельных минералов, определенных районов. В это точное описательное знание огромную лепту вносило молодое Минералогическое общество, подготавливая новую эпоху в истории русской минералогии. Эта эпоха, несомненно, намечается классическим трудом Н. И. Кокшарова «*Materialien zur Mineralogie Russlands*»², одиннадцать томов которого выходили с 1854 по 1892 г. Этот огромный труд дал блестящую основу точному знанию русских минералов и вместе с тем в нем сведены воедино разрозненные сведения о распространении в России тех или иных минеральных видов. Почти одновременно с Н. И. Кокшаровым Д. Планер задумал осуществление топографической минералогии, т. е. составление сводки о каждом минерале с указанием вкратце свойств, подробным и точным перечислением всех известных в России месторождений и подробными литературными ссылками. Этот труд был почти закончен к 1868 г., но Кокшаров увидел в нем конкуренцию своей работе и добился того, что труд Планера не был напечатан, а в виде рукописи, и притом не вполне переписанной, передан в архив Минералогического общества. Должен сказать, что эта добросовестная и кропотливая работа и поныне сохранила свое значение и в значительной степени помогла мне при справках в настоящей работе.

После работ Кокшарова и Планера продолжалось накопление минералогических описаний, и лишь к началу XX века вновь оживились попытки связать разрозненные литературные данные в общую картину. Так,

¹ Физическое описание государства Российского.— *Ред.*

² Материалы к минералогии России.— *Ред.*

к Геологическому конгрессу 1897 г. был подготовлен «Guide des excursions du VII Congrès géologique»¹, в который вошел целый ряд очень ценных топоминералогических сводок. Потом наши сведения о полезных ископаемых были сведены К. И. Богдановичем в его «Учении о рудных месторождениях» (1903—1912 гг.) и В. Реутовским в его «Полезных ископаемых Сибири» (1905 г.), а с 1916 г. в специальном томе (IV) сборника Академической комиссии: «Естественно-производительные силы России». Начиная с 1908 г. стал выходить «Опыт описательной минералогии» В. И. Вернадского с ценнейшими и весьма полными сводками литературы и списками месторождений каждого минерального вида.

Так постепенно складывалось топографическое изучение минералов России, причем в основу отдельных работ ставились, как мы видели, разнообразные взгляды, и различные цели преследовались этими сводками.

Глава II

НОВЫЕ ЗАДАЧИ ТОПОМИНЕРАЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Как мы видели из вышеприведенного очерка топоминералогического исследования внерусских стран и самой России, до сих пор в них не было единства идеи, которая объединяла бы разнородный минералогический материал и позволяла бы слить его в общее стройное целое — картину химической жизни земной коры. В настоящее время, когда минералогия выросла за рамки чисто описательной дисциплины и превратилась в химию земной коры, должны быть пересмотрены и те методы, и те точки зрения, с которыми раньше подходили к описанию минералов отдельных областей. Именно в изучение минерала в природе современная минералогия внесла совершенно новые идейные начала и перенесла центр тяжести его исследования из лаборатории, где минерал был оторван от своей естественной обстановки, к той природе, частью которой, и притом неразрывно, он сам является. Минерал перестали рассматривать как самостоятельное тело Земли, он сделался лишь частью космоса, тесными нитями связанной со всею жизнью Земли, ее геологической и космической историей. Минералогия перестала быть наукой только о минерале самом, о продукте химических реакций земной коры, она стала изучать и самый процесс, т. е. ту физико-химическую и геологическую обстановку, в которой минерал образуется, существует и изменяется. До тех пор, пока минералогия занималась исследованием самих продуктов, ее объектом был минерал как закономерный результат природных химических реакций, и этот минерал, совершенно независимо от условий его образования, его спутников, его процессов изменения, был непосредственным и единственным объектом изучения и единицей систематики и классификации. Но как только в минералогии ворвались течения генетического характера, Бишоф, Рот, Стерри-Хант выдвинули химию осадочных пород, Вант-Гофф — химию осадков солей, а Фогт — физико-химию расплавленных масс, сам минерал перестал быть той единицей, которой занимались исследователи, и на первый план выдвинулось изучение самой природной химической реакции и тех элементарных тел, которые принимают в ней участие².

¹ Путеводитель экскурсий VII Геологического конгресса. — *Ред.*

² В России это направление возглавлял В. И. Вернадский, оказавший большое влияние на развитие данного направления за границей. — *Ред.*

Среди бесконечно и медленно текущих химических реакций природы сам минерал занял лишь временное место этапа в тех постоянных перемещениях химических элементов в земной коре, которые идут вокруг нас. В глубинах ли магм с их сложными процессами кристаллизации из расплавленной массы, в зоне ли метаморфизма, где идут постоянные реакции перекристаллизации и перегруппировки минеральных тел, на поверхности ли Земли в явлениях выветривания, — всюду идут свои химические процессы накопления, соединения и нового распада. Слишком непостоянным является в этих представлениях понятие о минеральном виде, и внимание геохимика привлекает сам химический элемент, как наиболее постоянная, неизменяемая единица химических превращений.

Превратив таким образом минерал в изменяемый временный результат химических процессов Земли, минералогия неизбежно должна была искать другие, более постоянные единицы, из которых бы сложилось минеральное тело и которые были бы неизменными при смене химических процессов. Такими неизменными элементарными единицами современной минералогии явились сами химические элементы; и, таким образом, целые самостоятельные главы нашей науки должны были быть посвящены изучению элемента в естественной обстановке природы, его свойствам, распространению и судьбе его химических группировок. Создалась современная геохимия как отрасль старой минералогии.

Таким образом, тройственными явились основные объекты исследования современной минералогической науки: минерал — процесс — элемент, и их гармоническое исследование на фоне общих геологических судеб Земли и составило глубокий смысл современной науки. Нет никакого сомнения, что и это содержание минералогии является временным и что дальнейшие успехи научной мысли еще углубят и усложнят нарисованную схему. Уже сейчас минерал перестал быть эмблемой постоянства и неизменяемости, и глубокие химические превращения Земли в ее продолжительной космической истории, может быть, скоро встанут в ином свете, дав картины постепенного изменения и превращения самих химических элементов, их изотопов, и установят связь между строением атома и законами его распространения.

При современном состоянии наших знаний изучение минерала, процесса и элемента в природных условиях земной коры составляет основные задачи знания, и на фоне их каждая минералогическая проблема получает несколько иное, чем раньше, освещение. Безжизненные, сухие списки минералов с краткими географическими сведениями о местах их нахождения уже не могут удовлетворить современную научную мысль; не могут ее удовлетворить и детальные химические исследования месторождений минералов без установления между ними связи и без выяснения природы тех пород, в которых они встречены и с которыми они теснейшим способом связаны.

Сообразно с современными задачами минералогии, в новом свете вырисовываются и основные запросы топоминералогических описаний, и по отношению к ним совершенно одинаково должны быть поставлены те три основных вопроса, которые составили основу нашего современного минералогического мировоззрения. К детальному выяснению этих трех вопросов я перейду в дальнейшем.

О первом много говорить не приходится, на нем я остановлюсь лишь вкратце, но зато второй и третьей задачам я принужден буду посвятить специальные главы.

Первая задача — описание минералов и их свойств, т. е. то, что мы до сих пор называли минералогическим описанием.

Первую и по существу самую основную часть каждого минералогического описания составляет полное и по возможности детальное описание каждого минерального вида, встречаемого в данной области. Поэтому первой задачей топографических исследований представляется составление списка всех тех минералов, кои в данном районе встречаются или встречались.

Для каждого данного минерала необходим далее учет всех тех пунктов, в которых он наблюдался; в области же горных разработок — установление нахождения его на определенных глубинах или в определенных частях копи. Для каждого данного пункта должна быть нарисована картина количественного распространения данного ископаемого, т. е. в грубых чертах дана оценка его редкости или распространенности. Здесь же необходимо внимательное изучение, в каких породах минерал встречается, т. е. приуроченности минерала к определенному геологическому телу, и выяснение взаимоотношения самого минерала с этим телом: таковым являясь непосредственно включение минерала в породу (как, например, порфирический полевой шпат в жильном граните), нахождение по трещине (в жиле кристаллы кварца) или на внешней поверхности (корочка кальцита) и т. д. Точное морфологическое описание самого минерала и условий его нахождения составляет одну из важных, но, к сожалению, сейчас часто пренебрегаемых задач минералогического описания. Особенно интересным является изучение изменений минерала при современных условиях, его выветривание, изменения в окраске и т. д.

Вторую группу вопросов топоминералогических наблюдений составляет изучение парагенезиса минерала и тех естественных минеральных ассоциаций, которые в данной области наблюдаются. До сих пор на эту сторону почти не обращали внимания и не пытались дать объективный и полный материал наблюдений. Между тем в каждой естественной группировке минерал занимает свое место не только территориально, но и хронологически. Последовательность осаждения минералов, совместное нахождение при одновременном процессе их образования, замещение одного минерального вида другим и т. д. — все это вопросы, имеющие огромное значение для выяснения тех процессов, кои положили им начало. Поэтому внимательное и полное изложение условий совместного нахождения минералов является первостепенной задачей исследователя. Лучшим способом этих наблюдений является графическое изображение последовательности по методу, намеченному еще французской петрографической школой и развитому позднее Кёнитцбергером. В вертикальном направлении пишутся все наблюдавшиеся в данной естественной группировке минералы, а в горизонтальном, на уровне каждого, отмечается линией период его осаждения, иначе говоря — время. Если минералы встречаются одновременно, то их линии ложатся одна под другую; если один минерал начал свое образование в самые последние минуты осаждения первого, то его черта начнется немного раньше, чем окончилась черта первого. Если еще при этом звездочкой на черте отмечать периоды максимального роста минерала, то мы получим весьма наглядный способ изображения парагенетических отношений. В дальнейшем парагенезисом мы будем называть комплекс условий, определяющих совместное нахождение ряда минералов, а самые минералы этого комплекса будем объединять под именем естественной минеральной ассоциации.

Под генерацией мы будем подразумевать совокупность минералов определенного момента минералообразования, а под фазой — определенные периоды этого процесса, объединенные рядом особенностей генетического характера.

Наконец, третью группу вопросов чисто минералогического изучения минералов составляет их детальное химическое исследование: качественный и количественный состав, содержание примесей, определяемых лишь точным анализом или спектроскопом, наблюдения над колебаниями состава в зависимости от цвета, места нахождения, момента образования, свежести образца и т. д. Этот цикл минералогического исследования должен дать базу для геохимических выводов, и без детальных и точных данных анализов минералов всякое геохимическое изучение области теряет почву под ногами.

Вторая задача — изучение происхождения и образования минералов, т. е. то, что мы сейчас называем генетическим описанием.

Эта сторона вопроса является совершенно исключительно важной при каждом топоминералогическом описании, так как вводит нас в ту химическую обстановку, при которой минерал образовывался и подвергался изменению в сложной геологической истории того участка земной коры, в котором он находится.

Такое генетическое описание, как это будет более детально разобрано в главе третьей, складывается из нескольких последовательных подходов, которые мы можем назвать: минералогическим, геологическим и физико-химическим. Под первым мы подразумеваем изучение парагенезиса данного минерала, связи его с определенными горными породами, последовательности осаднения, а также изучение всех деталей взаимных отношений минералов с целью выяснения тех «первичных» тел, из которых данный минерал образовался, и тех последовательных стадий, которые он при этом прошел. Попутно изучается форма залегания данного минерала среди других, намечающая часто определенный генетический тип.

Второй задачей мы ставим выяснение, на основании всего комплекса имеющихся налицо условий, геологической обстановки всего района и, в частности, той непосредственной области, в которой минерал встречается. Это выяснение имеет целью определение генетического типа, т. е. в общих чертах того геологического процесса, который положил ему начало, например, поствулканический, магматический, катагенетический и т. д. Выяснение типа генезиса есть не что иное, как приурочение химического процесса образования минерала к определенному комплексу геологических факторов во времени и пространстве. Таким образом, этим путем устанавливается та термодинамическая зона (по Ван-Хайзу или Зюссу), в пределах которой шло образование минерала, время, к которому в геологической хронологии относится данный процесс, и, наконец, та последовательность, в которой шли отдельные генетические процессы. Последнее намечает то, что я называю генетическим циклом. Под этим термином я подразумеваю совокупность тех генетических процессов, которые связаны определенной последовательностью, как естественный результат тех или иных геологических явлений: например, магматический процесс, послевулканические процессы, гидротермальные жилы и т. п. Подробнее все эти вопросы будут рассмотрены в следующих главах, см. стр. 40.

Наконец, третьей стороной генетических описаний является выяснение на основании предыдущего определения геологического процесса той физико-химической обстановки, в которой процесс протекал. К нахождению точных законов и точной математической формулировки величин основных факторов должно стремиться каждое научное описание минералообразовательных процессов. С этой точки зрения основными задачами в этом направлении являются: выяснение форм и источни-

ков энергии как причин химических реакций, выяснение вероятных температур и давления, типа давления, концентрации реагирующих веществ, применение закона масс и закона Оствальда (о фазах неустойчивого равновесия), учет химических факторов и т. д. К сожалению, на этот путь точного анализа явлений природы мы можем становиться лишь в редких случаях, но частично разрешение этих физико-химических задач всегда возможно и необходимо.

Третья задача — распространение и роль отдельных химических элементов; это та область современных исследований, которую мы называем геохимической.

Не меньшей важности задача при топоминералогических исследованиях лежит в определении распространения и роли отдельных химических элементов. На этот путь научная работа становилась уже неоднократно — при изучении распространения каких-либо полезных элементов, тяжелых металлов, калия, фосфора и т. д., но никогда этот вопрос до сих пор не рассматривался безотносительно полезности того или иного тела. Между тем полная геохимическая картина каждого района может дать ключ к выяснению целого ряда вопросов большой научной важности, причем в первую очередь является необходимым точный учет всех встречаемых в данной области химических элементов, качественной и количественной оценки каждого из них. В этой области, конечно, точное знание может быть достигнуто только путем количественных определений отдельных элементов, а это в свою очередь может базироваться лишь на большом количестве точных аналитических данных.

Далее, задачей таких геохимических описаний должно ввиться установление связи между отдельными элементами при генетических процессах, связь этих элементов с определенными участками земной коры, породами, геологическими явлениями и геологическими эпохами. В этом направлении мы подходим к ряду интереснейших вопросов и сообщений, позволяющих гораздо более определенно, чем раньше, подводить под основу геологических явлений определенные физико-химические начала.

Наконец, на основании изучения всей геологической и химической обстановки, представляется интересным и вполне возможным для каждого данного элемента нарисовать последовательные этапы его соединений в земной коре и нарисовать, таким образом, его историю и роль в геохимических процессах. Несомненно, что в этом случае изложение вопроса выходит за пределы самой твердой земной коры, и судьбы химических элементов на земной поверхности определяются в большой степени процессами биохимического характера, жизнью растений и животных и культурнохозяйственной деятельностью человека. С этой точки зрения полнота геохимических представлений может быть достигнута лишь путем привлечения к решению ее задач почвоведения, агрономии, метеорологии, бактериологии и т. д.

В этом направлении химия живого вещества дает нам еще ряд интереснейших данных.

Совокупность приведенных выше трех основных задач минералогического описания вводит нас в круг идей чисто химического характера, но приуроченных к определенным территориальным единицам.

Я считаю правильным такого рода описания называть *химико-географическими*, вкладывая в это понятие ту новую постановку идеи минералогических исследований, о которых я выше говорил.

Мне кажется, что значение такого рода исследований до сих пор недостаточно учитывалось. География в ее отдельных циклах и областях игнорировала до сих пор химизм земных процессов, не учитывая, что химические преобразования Земли в каждом данном участке являются основой ее органической и очень часто физико-геологической жизни. В сложном комплексе природных процессов, где переплетаются деятели космического характера с деятелями организованной природы, химические процессы являются не столько результатом действия этих факторов, сколько их первопричиной. Большинство природных процессов не идет к тем или иным перемещениям химических масс, их перегруппировкам, к выделению или поглощению того или иного вида природной энергии, а это в свою очередь создает новые генетические циклы.

Мы пытаемся на нижеследующих страницах сделать опыт таких химико-географических описаний, однако убеждены, что их глубокое и более удачное выполнение сможет быть дано лишь в том случае, если в будущих географических исследованиях химическая сторона каждого процесса природы будет учтена и изучена, если с точки зрения геохимика мы научимся подходить и к процессам жизни на Земле, и к деятельности самого человека. А до тех пор, пока не будут даны количественные схемы тех мощных химических явлений, которые происходят на земной поверхности, пока количественно не будут изучены их энергия и их течение, до тех пор нам придется оставаться в рамках чисто внешних описаний, качественной оценки, часто субъективной и несовершенной.

И мне хотелось бы нижеследующими геохимическими описаниями России отметить огромный недостаток в чисто аналитическом материале и обратить внимание на необходимость более полного и более систематического обследования состава минерала и горных пород русской земли; к сожалению, до сих пор в нашей литературе отводилось недостаточно места точному описательному материалу.

Глава III

ПРОИСХОЖДЕНИЕ И ОБРАЗОВАНИЕ МИНЕРАЛОВ

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ГЕНЕТИЧЕСКОЙ МИНЕРАЛОГИИ

Как было выше указано, вопросы образования и изменения минералов являются в современной минералогии тем более важными, что ими определяется само распространение и распределение в земной коре минеральных видов, а также их устойчивость или изменчивость в современных условиях. В этом направлении наше внимание привлекают не только чисто научные вопросы, открывающие ряд новых закономерностей и связывающие образование минерала со всей химической жизнью Земли, но и вопросы чисто практического характера, которые правильно разрешаются лишь при учете генетических данных. Недаром обычная схема современной науки о месторождениях полезных ископаемых построена на генетической классификации.

Многообразие и сложность химических превращений земной коры в своих основных чертах зависят от двух главных причин: от факторов интрателлурического или теллурического (земного) происхождения и факторов космического происхождения.

К первым по существу относятся внутренние запасы тепловой энергии как в виде таковой, так и в скрытой химической или молекулярной форме.

таков сложный мир химических процессов, связанный с глубинами Земли, с застытием магм, выделением паров и газов, воздействием на другие породы и т. д. Второй цикл факторов прежде всего определяется Солнцем, его огромной энергией, тепловой и химической (лучистой), которая вызывает к жизни целый ряд химических и физических процессов на поверхности Земли: органическая жизнь с ее биохимическими реакциями, распределение воды и суши, циркуляция поверхностных вод, наконец, самый состав атмосферы и гидросферы является результатом глубоких воздействий извне.

Сообразно с этими главнейшими факторами, обуславливающими пере-группировку химических элементов и образования минералов, мы можем заметить десять основных генетических типов, по которым в земной коре идут химические процессы¹.

Кристаллические и метаморфические породы	{	I. 1. Образования огненно-жидких магм.	{	высокая t , высокое p или низкое p
		2. Гидротермальные выделения в пустотах, миндалинах, жеодах и т. п.		
		3. Жильные образования: а) пегматитовые; б) гидротермальные (рудные); в) гидротермальные дислокационные (альпийские жилы).		
		4. Пневматолиты: а) поверхностные (налеты, возгоны); б) глубинные (штокверки).		
Осадочные породы	{	II. 5. Контактные образования: а) эндо- и б) экзоконтакта; в) мигматическое.	{	средняя t и среднее p
		6. Регионально-метаморфические образования (фальсбады).		
		III. 7. Нормальные осадочные образования (синхронические).		
		8. Образования диагенеза.		
Осадочн. и извержен-ные породы	{	9. Образования катагенеза (частью осадки вадозных вод в пустотах и трещинах).	{	низкое p и низкая t
		10. Процессы поверхностного выветривания (поверхностного метаморфизма; выцветы, дендриты и т. д.; почвообразование) — гипергенеза.		

Исследование генетических типов в минералогии, как ниже указано (стр. 32), опирается на два самостоятельных научных метода: первый, который можно было бы назвать эмпирическим, позволяет попытаться связать минерал с комплексом определенных физико-географических, геофизических и геологических явлений; второй дает возможность анализировать явление геохимического процесса с точки зрения законов общей и физической химии. Оба метода дополняют и развивают друг друга. Так, второй, поставленный на экспериментальную почву, позволил Вант-Гоффу построить стройную теорию осадков минеральных солей из озер, а первый — путем аналогий выявить термические условия водных бассейнов прошлого и, опираясь на наблюдения Калешинского и общения Арениуса и Бухе над температурой венгерских озер, внести серьезную термическую поправку в схемы Вант-Гоффа. Нет никакого сомнения, что хронологически первый метод должен предшествовать второму, тем более,

¹ В этом виде систематика генетических процессов ближе всего примыкает к схеме Кёнигсбергера (1914—1920 гг.).

что далеко не всегда возможен анализ природного геохимического процесса при помощи точных данных физической химии.

По отношению к первому методу наша задача сводится в каждом данном случае к определению генетического типа, к которому данный случай относится, к выяснению связи его с главнейшими геохимическими зонами земной коры, и, в-третьих, к установлению хронологии генетических процессов, как их последовательности, так и связи с определенными моментами геологической истории.

На этих трех вопросах мы должны несколько остановить наше внимание.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКОГО ТИПА

Мы условились называть генетическим типом тот геологический процесс, который в определенной причинной зависимости вызывает ряд столь же определенных химических превращений в данной области.

Однако надо иметь в виду, что по отношению к каждому минералу выяснение геологического процесса, который положил ему начало, представляет нередко весьма значительные затруднения, и даже специальные исследования, имеющие целью на месте — в поле — изучение этого вопроса, далеко не всегда могут разрешить эту задачу с полной определенностью. Тем более затруднительным и часто весьма рискованным является отнесение минералов каких-либо районов к определенным геохимическим процессам тогда, когда эти соединения изучаются только в музейных собраниях или по литературе. В этом случае возможны лишь более или менее правильные догадки, основанные скорее на знании генетической характеристики данного минерального вида вообще, чем на оценке местных условий¹.

Дальнейшие трудности при отнесении той или другой минеральной ассоциации к определенным генетическим типам заключаются в многочисленных переходах одного в другой, в существовании целого ряда промежуточных процессов, одинаково примыкающих к нескольким из намеченных типов. Так, например, пневматолитические процессы очень часто являются лишь формой экзоконтактных, гидротермальные выделения в пустотах и жеодах связаны с миаролитическими пегматитами и т. д. С другой стороны, для каждого данного района обычно приходится наблюдать целую последовательность, и притом строго закономерную, генетических процессов, что еще более осложняет задачу (см. стр. 40).

Таким образом, определение генетического типа является нередко задачей нелегкой, требующей учета целого комплекса разнообразных явлений и признаков и часто основанной лишь на детальном геолого-минералогическом исследовании как самого минерала, так и окружающей его обстановки.

¹ Именно с этой трудностью встретился и я при изучении генетики минералов России, и потому эта часть дальнейшего моего изложения во многих отношениях может оказаться неудовлетворительной и нуждаться в дополнении и исправлении. Более доступна и легка она была для меня при описании тех областей, которые лично мне известны по полевым исследованиям и экскурсиям. Таковы: область Фенноскандинавского массива, кембросилурийских отложений Петроградского края, центрально-русской каменноугольной платформ, пермских отложений Поволжья, Крым, Урал и некоторые части Алтая, Саян и Забайкалья.

СВЯЗЬ ГЕНЕТИЧЕСКОГО ТИПА С ЗОНАМИ ЗЕМНОЙ КОРЫ

Отнесение отдельных генетических процессов к разным зонам земной коры устанавливается на основании данных Ван-Хайза, сведенных мною в диаграмме, впервые напечатанной в журнале «Природа» в 1913 г. в несколько упрощенном виде (см. рис. 1).

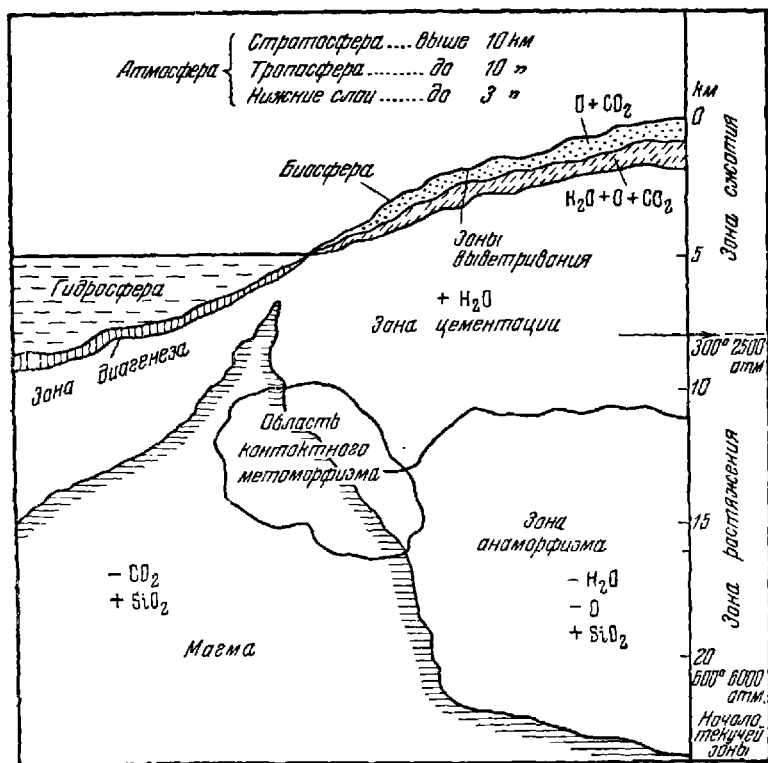


Рис. 1. Схема геохимических зон земной коры (по данным И. Лукашевича, Ван-Хайза и отчасти Вольфа).

В основу этой диаграммы положено установление в земной коре нескольких зон на основании трех основных геохимических факторов: температуры, давления и главных химических деятелей: O , CO_2 , H_2O , SiO_2 . Каждая зона характеризуется определенными величинами (вернее говоря, интервалами величин) этих трех групп физико-химических факторов и определяет ту форму равновесия, которая господствует в данной области земной коры. Граница зоны цементации и анаморфизма, вообще говоря, приближается к границе сжатия и растяжения, т. е. отвечает, по преимуществу, поясу спокойствия в представлении современных геофизиков. Все лежащее выше ее захвачено явлениями образования трещин, сжатия, сдвигов и процессов тангенциального (бокового) давления. Эти процессы генетически совершенно обособлены, так как носят поверхностный характер, и в них, по преимуществу, являются деятелями вода и угольная кислота, чем обуславливается тот тип минералообразовательных процессов, который мы выше называли катагенезом в одних случаях или альпийскими жилами в других.

В противоположность этому, более поверхностному типу явлений, мы отличаем ряд процессов, связанных с областями ниже уровня спокойствия, с глубинными очагами изверженных магм (базальтовой постелью Дели) и тех скоплений тяжелых металлов, источник коих мы должны условно с ними связывать: это цикл геохимических явлений, связанных с вулканизмом и рудными жилами. Дальше глубин в 20—30 (может быть 40) километров мы не идем, и за пределами этой границы наши геохимические

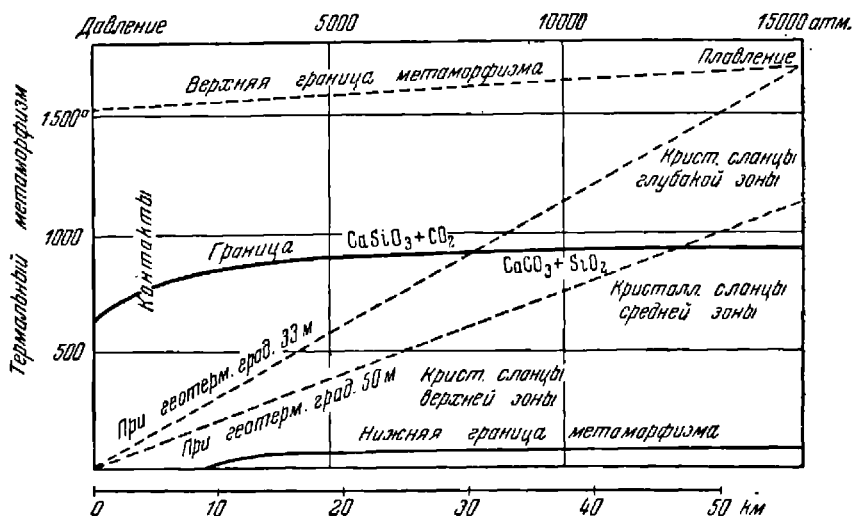


Рис. 2. Схема геохимических зон земной коры, по Гольдшмидту (V. M. Goldschmidt, 1912), в переработке Бекке (F. Becke, 1916).

Два пункта на косых диагоналях намечают идеальный разрез через земную кору, при принятии для геотермического градиента в одном случае — 33 м, в другом — 50 м. Жирная линия определяет границу преобладания реакций с выделением или угольной кислоты (в глубинах), или кремневой (в поверхностных частях земной коры). Различные участки диаграммы, характеризующаясь разнообразными сочетаниями температур и давления, определяют разные типы метаморфизма.

представления могут быть основаны лишь на косвенных данных. На рис. 2 даны те же взаимоотношения, согласно данным Гольдшмидта, несколько переработанным Бекке.

Таким образом, вышеустановленные генетические типы приурочиваются к определенным глубинным зонам Лукашевича следующим образом:

- I. К зоне биосферы и катаморфизма относятся типы — 4а, 7, 8, 9, 10 (см. стр. 21).
- II. К зоне цементации и анаморфизма относятся типы — (2), 3б, 3в, 5а, б, в, 6.
- III. К зоне магматической относятся типы — 1, 2, 3а, 4б, 5а, в.

Работа Лейта и Мида (Leith a. Mead, 1915) внесла значительный корректив в эти представления: она показала, что одни и те же генетические типы могут возникать в разных зонах и что поэтому связь с определенными глубинными областями есть лишь упрощенная схема земных процессов. Значение этой идеи еще ранее защищалось Бекке и мной на основании применения закона Оствальда (см. дальше) к земным процессам.

Каждая из этих зон, вернее говоря областей, характеризуется некоторыми типическими чертами связанных с нею генетических типов, и на них мы вкратце остановим наше внимание.

I. Зона поверхностных типов

Область атмо-гидросферы и верхней части литосферы, отвечая в общем низким температурам, в ходе своих химических реакций характеризуется прежде всего образованием соединений с выделением тепла, т. е. с меньшим содержанием свободной энергии, чем ее сумма в веществах реагирующих. Таким образом, в принципе общее направление возможных геохимических реакций поверхностных частей определяется термохимическими взаимоотношениями между самими соединениями. Однако в этот общий закон химия земной коры вносит свой корректив, отвечающий в химии накоплению веществ, выходящих из поля реакций, а именно: в природе наблюдается образование и накопление именно тех соединений, которые лучше других сохраняют равновесие при соприкосновении с главными активными химическими агентами Земли: водой, угольной кислотой и кислородом.

Таким образом, мы получаем для этой зоны земной коры следующее эмпирическое правило: в земной коре по преимуществу накапливаются те химические соединения, которые образуются с максимальным выделением тепла и которые устойчивы по отношению к кислороду, угольной кислоте и воде. Всякое нарушение этих двух основных положений может быть вызвано лишь наличием каких-либо особых физико-химических или геологических явлений; так, например, скопление легко растворимых галогидных солей натрия и калия возможно лишь под покровом илистых осадков, образующих водонепроницаемый слой над осадком соли; накопление каких-либо самородных элементов (например, железа или углерода) возможно лишь в случае воздействия каких-либо источников энергии извне — например, органической жизни, инсоляции, человеческой деятельности и т. д.

Основными чертами этих генетических типов являются, кроме того: широкое распространение коллоидального состояния материи, образование малоустойчивых изменчивых соединений, часто не отвечающих точным стехиометрическим отношениям (так называемые мутабильные соединения), и вообще большая подвижность химических реакций и химических равновесий, отвечающая постоянным колебаниям поверхностных факторов — температуры, давления, влажности, жизненных процессов и т. д. Более подробно об этих процессах см. ниже, стр. 43.

II. Зона метаморфических типов

Целый ряд промежуточных зон между магматической в глубине и биосферой на земной поверхности объединяется рядом общих геохимических закономерностей. В верхних частях мы видим еще преобладание воды и угольной кислоты, но ниже они замещаются кремневой кислотой, вытесняющей углекислоту из ее соединений. В этой зоне мы наблюдаем повышение с глубиной и давления, и температуры, но благодаря противоположному влиянию этих двух факторов действие каждого из них частично ослабляется. В верхних частях реакции идут в водных растворах по капиллярам и ультракапиллярам горных пород, в более глубоких — наблюдается постепенный переход в зону пластического состояния вещества, где реакции идут в твердом состоянии. В верхних частях мы встречаемся с местными натяжениями, сжатиями, образованием складок и вообще боковых тангенциальных движений (боковые давления, «стресс» американской школы); в глубинах, наоборот, в зоне растяжения мы наталкиваемся на процессы разрыва земной оболочки, образования трещин с жильными процессами,

внедрением магмы (батолитов) и т. д. Наконец, в еще более глубоких зонах мы переходим к давлению гидростатического характера.

Все эти данные определяют общее направление геохимических реакций, несущих явно экзотермический характер на поверхности и более безразличный с термической точки зрения — в глубине. В первых преобладают вещества с содержанием воды, обладающие малыми удельными весами, во вторых — соединения безводные, высокого удельного веса, с преобладанием кремнекислых соединений и выделением газообразных продуктов.

III. Зона магматических типов

Эта область, более подробно описываемая ниже, характеризуется в большинстве случаев высокими давлением и температурой, преобладанием кремнекислых соединений и подчинением законам физической химии, устанавливаемым для расплавов, согласно новой терминологии. Мы встречаемся здесь преимущественно с веществами кристаллическими, высоких удельных весов; сочетания минералов подчиняются физико-химическим законам равновесия, правилу фаз, закону Оствальда и основным законам неионизированных растворов.

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ГЕНЕТИЧЕСКИХ ТИПОВ (ЦИКЛЫ) И ИХ ХРОНОЛОГИЯ

Изучение природных процессов нам показывает, что генетические типы в истории земной коры следуют в определенной постепенности, создавая целые серии, которые мы будем называть циклами. Нам прекрасно, например, известна история минералообразовательных процессов, связанных с магматическими процессами, за которыми следуют стадии: эпимагматическая (по терминологии Бекке), затем пегматитовая, вслед за которой начинаются явления пневматолита и гидротермальных процессов, т. е. то, что объединено было Вейншенком под именем поствулканической деятельности.

Таким образом, всякий застывающий массив вызывает вокруг себя в известной хронологической и топографической последовательности ряд различных генетических процессов, часто очень сложно переплетающихся между собой и обычно идущих скачками с частичными возвратами к ранее бывшим стадиям. В таких месторождениях запечатлены, таким образом, целые циклы генетических процессов, и задачей геохимического анализа является расчленение минеральных ассоциаций на отдельные фазы и приурочивание каждого минерала к какой-либо определенной фазе длительного природного процесса. Конечно, эта задача выполнима лишь в тех случаях, когда мы имеем дело не с одним минеральным телом, а с целым комплексом, т. е. с тем, что мы называли м и н е р а л ь - н о й а с с о ц и а ц и е й (см. выше, стр. 17). Чем лучше изучены парагенезис каждого минерала и последовательность осаднения, тем легче решение вопроса о генетическом типе и о том цикле, к которому данный тип относится.

Изучению генетических циклов необходимо придавать большое значение, и поэтому на их характеристике я остановлюсь с большей детальностью в особой главе (стр. 40).

С вопросами циклов связан отчасти и другой вопрос о хронологии процессов минералообразования и о возрасте отдельных минералов.

При исследованиях генетических типов, особенно в породах осадочного происхождения, обычно приходится решать вопрос о в о з р а с т е дан-

ного минерального тела, т. е. об установлении хронологической связи генетического процесса с определенными эпохами геологической истории. Для изверженных пород этот вопрос заключается в определении времени образования данного массива, лакколита или потока путем анализа взаимоотношений кристаллической и тех пород, которые его окружают. Для заполнения трещин и жил этот вопрос приобретает особое значение, но и особые трудности, так как в этом случае является интересным не столько определение возраста образования самой дислокации (например, разломов герцинской системы, т. е. конца каменноугольной эпохи), сколько времени заполнения трещины минеральными продуктами (так, заполнение герцинских трещин металлургическими соединениями может быть отнесено к тому же периоду, что и образование самой трещины, или же к гораздо более новым процессам — например, третичной эпохе). Наконец, в одном и том же районе мы обычно встречаемся с наложением дислокационных систем разного геологического возраста, что еще более запутывает картину.

В осадочных породах определенной стратиграфической серии образование минерала может быть или синхроничным с вмещающей породой, и в этом случае возраст минерала датируется самим горизонтом, в котором он находится, или же более поздним; в последнем случае мы можем наблюдать несколько различных типов: если образование минерала можно отнести к диагенетическим процессам, идущим еще на дне самого водоема, в котором осадок превращался в горную породу, то можно без большой ошибки признать за минералом приблизительно тот же возраст, что и вмещающей породы (осадок); если же возникновение минерала приходится связывать с позднейшими явлениями — перекристаллизацией, химической перегруппировки и внедрением посторонних химических деятелей (например, привнесением новых веществ), то вопрос о времени возникновения этого нового для осадочной породы процесса обычно является очень сложным и далеко не всегда может быть разрешен с достаточной определенностью лишь на основании изучения всех деталей геологической обстановки.

Хронология геохимического процесса может быть, однако, в некоторых случаях определена точнее: целый ряд весьма любопытных методов, основанных частью на явлениях радиоактивности, устанавливает хронологию и возраст минерала на основании количественных соотношений некоторых входящих в него элементов. Так, еще Карно предложил учитывать возраст горизонтов по взаимному отношению фосфора и фтора, содержащегося в костях. Это отношение обычно только в древних отложениях отвечает составу апатита, постепенно приближаясь к нему по мере того, как мы от современных остатков переходим к более древним. Вероятно, некоторое определение возраста могло бы быть сделано путем изучения раковин современных и разных возрастов третичной и четвертичной эпох, ибо слагающее их вещество (конхит, близкий к арагошиту) постепенно переходит в кальцит, с которым мы только и встречаемся, когда исследуем мезозойские или палеозойские раковины.

Наконец, наиболее точный метод дают нам современные идеи радиоактивности, на основании которых устанавливается определенное во времени взаимоотношение между конечными и боковыми элементами распада, с одной стороны, и первоначальными материнскими, — с другой. В этом направлении целый ряд интереснейших данных позволяет в абсолютной мере определять возраст радиоактивных соединений и этим путем ближе подходить к точной хронологии и генетическим типам, и связанным с ними геологическим процессам.

Во всяком случае отнесение генетических процессов, наблюдаемых в данной области, к определенным геологическим эпохам и определение их возраста есть необходимейшее условие, чтобы связать минералогию данной области с ее геологией и поставить в связь химические превращения Земли с теми физико-химическими факторами, которые во всей истории ее постепенно видоизменялись и этим видоизменяли и ее лик, и ее животный и растительный мир, и ее химизм.

История химических процессов Земли в их геологической последовательности нас учит, что, подобно развитию органического мира, химические явления развивались и текли, непрерывно видоизменяясь и находя новые формы равновесия при новых условиях, но что в общем были периоды, когда ход химических процессов был замедленным, и, наоборот, — другие, когда генетические циклы с особой интенсивностью видоизменяли и перегруппировывали химические элементы природы.

Подобно тому, как в геологии современные научные течения стремятся установить периоды относительного покоя (эволюционного хода развития) и периоды революционных всплесков, так и в геохимии мы можем помнить ряд моментов крупной вулканической и дислокационной деятельности, положившей начало новым генетическим циклам и новым элементогенетическим периодам.

ЭНЕРГЕТИКА ГЕОХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Мы уже имели случай (на стр. 20) отметить двойственность источников энергии геохимических процессов, именно: ипстрателлурическую и космическую; остановимся на этом вопросе подробнее.

К п е р в о й группе видов энергии мы относим прежде всего внутреннюю т е п л о т у Земли, как крупнейший фактор природных минералообразовательных процессов. Эта энергия, повидимому, лишь частично является остатком космической, в значительной степени (может быть, в большей) она является результатом химических экзотермических реакций, идущих в поверхностной зоне окисления более глубоких областей Земли. Таким образом, косвенно сама химическая энергия является одним из важнейших источников новых геохимических процессов земной коры.

Степловой энергией связана энергия м е х а н и ч е с к а я, проявляющаяся в разломах, образовании складок, натяжениях и растяжениях земных оболочек, эпйэрогенических и орогенических движениях и т. д. Большое геохимическое значение имеет и с и л а т я ж е с т и, обуславливающая повышение нормального давления в глубинах, перемещение веществ в огненножидких растворах, согласно удельному весу, и такое же накопление в водных бассейнах земной поверхности. Крупным источником химических превращений является тепловая энергия, выделяемая при распаде радиоактивных веществ, повидимому накопленных лишь в верхних частях магматической зоны земной оболочки. Если мы примем радиоактивность, что весьма вероятно, за общее свойство вещества, то мы получим огромный и довольно постоянный источник тепловой энергии в менее глубоких зонах земной коры. Большое значение, но еще далеко невыясненное, имеют м а г н и т н а я и э л е к т р и ч е с к а я э н е р г и я, причем последняя проявляется в процессах электролитического распада, столь частых в разбавленных растворах земной коры, и в своеобразных электротоках рудных жил при осаждении разнородных самородных и сернистых металлов.

Вторую группу видов энергии составляют космические силы, по существу лежащие в основе и вышеприведенной группы. Нет никакого сомнения, что космос незаметными нитями связан со всеми только что перечисленными видами энергий, действуя на них непрерывно. Так, сила тяжести неизбежно регулируется и согласуется с силами космических напряжений, играющих в явлениях прилива и отлива не только механическую, но и химическую роль. Самовнутреннее интрателлурическое тепло есть частью остаток космической энергии, скованной внутри Земли, и таким же остатком старых космических процессов мы должны признать в общих чертах основное распределение химических элементов по отдельным зонам земной коры. Да и самый состав поверхностных частей земной коры в значительной степени регулируется постоянным притоком вещества в виде метеоритов и метеорной пыли. И наоборот: часть энергии Земли теряется, уходя обратно в космические пространства; таков полет за пределы земной атмосферы быстро движущихся частиц легких газов.

Однако основным видом энергии космоса, получаемым Землей, являются **лучи Солнца**.

Было бы большой ошибкой недооценивать геохимическое значение этого вида энергии, обусловливавшего с самых первых моментов зарождения твердой пленки сложный мир химических реакций. В лучах Солнца мы прежде всего различаем **х и м и ч е с к и е л у ч и**, под влиянием которых складывается жизнь растительного мира, а через нее и животного. Весь комплекс углекислых пород, накопление угля, все генетические циклы земной поверхности в своей основе регулируются химическими силами космоса. Но не только через посредство биохимических реакций проявляет свое влияние Солнце на неорганизованную природу Земли: целый ряд химических процессов непосредственно возникает в группировках элементов земной поверхности, как, например, разложение галлоидных соединений серебра, окисление водорода, выделяемого некоторыми бактериями, изменение блеклых руд и т. д.

Наравне с химическими лучами Солнце действует и **т е п л о в ы м и**. Благодаря оболочке атмосферы космическое тепло поддерживает современный термический режим земной поверхности, и можно считать доказанным, что начиная с кембрия внутреннее интрателлурическое тепло, вне вулканических процессов, не оказывало никакого заметного влияния на тепловые процессы самой поверхности. Подобно химическим лучам и тепловые действуют частью непосредственно на земные процессы, согласно положению Оствальда вдвое ускоряя каждую химическую реакцию при повышении температуры ее течения на 10° С. Но значительно большее количество реакций идет через посредство **о р г а н и з о в а н н о г о м и р а**, еще гораздо более чутко реагирующего на колебания или изменения теплового режима. И перед нами встает вся картина зонального расположения геохимических реакций земной поверхности, начиная с медленных, почти незаметных изменений полярных стран и кончая пустынным поясом или субтропиками. Энергия живого вещества обуславливает этот новый мир химических реакций, и вся осадочная толща земной коры является результатом взаимодействия космоса, Земли и живой природы. Я. В. Самойлов очень удачно назвал каждое минеральное тело, в своем образовании прошедшее через организм, — **б и о л и т о м**.

Среди видов энергии, создаваемых лучами Солнца, мы не должны забыть и все более и более усиливающуюся деятельность **ч е л о в е к а**. В своей культурной и промышленной деятельности человек сделался крупнейшим фактором, направляющим химические процессы земной поверхности: создавая научные, культурные и промышленные ценности,

сжигая уголь и нефть и выплавляя металлы, человек занял определенное место в геохимии, стремясь накопить энергию в этих ценностях и жизненным процессом создания эндотермических соединений замедлить темп нормального геохимического процесса, идущего неуклонно в сторону максимального выделения тепла.

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ГЕНЕТИЧЕСКИХ ТИПОВ

Очевидно, что выяснение генезиса данного минерала есть не что иное, как определение по ряду ныне наблюдаемых признаков и явлений той физико-химической обстановки, в которой шло его образование и дальнейшее преобразование. Таким образом, отнесение данного минерального вида в данном месторождении к определенному генетическому типу является первым подходом к разрешению этой задачи. Более точная характеристика бывших физико-химических условий не всегда возможна, и лишь в единичных случаях может быть дан более точный количественный учет некоторых геологических факторов. Так, по отношению к температуре в настоящее время на основании ряда явлений, объединенных Райтом термином геологического термометра, иногда возможен более точный ответ: такими геотермометрами могут явиться—диссоциация карбонатов щелочноземельных металлов, совместное нахождение каких-либо тел, пары которых хорошо изучены термически в лабораторной обстановке, и, наконец, в качестве одного из самых интересных геотермометров, разности кварца, намечающие весьма определенно границу в 575°C . Правильный учет всех физико-химических факторов и применение их к анализу той или иной природной ассоциации составляют одну из важнейших задач генетической минералогии. Иногда таким путем удается расшифровать природные процессы и вложить их в точные формулы химической реакции.

Выше уже было указано, что температура каждого природного процесса сейчас начинает уже определяться при помощи тех специальных методов, которые разработаны Геофизической лабораторией в Вашингтоне. Равным образом, опытами Адамса положено начало пониманию процессов давления и его количественному учету. Метод непосредственных наблюдений над современными процессами и здесь, как и в общей геологии, проливает свет на третью группу факторов: распределение химических масс, концентрацию природных растворов и их электролитический распад. Широкое развитие органического синтеза вводит нас в цикл вопросов о каталитическом действии отдельных элементов и их соединений, подводя более прочный фундамент под те таинственные «минерализаторы», которые введены были французскими исследователями для объяснения кристаллизации глубинных пород.

Менее удачно протекает сейчас учет электромагнитных сил, роль которых в геохимии несомненно больше, чем это до сих пор предполагалось. Степень электролитического распада магм нам совершенно неизвестна, и поэтому мы совершенно не можем учесть несомненно идущих в глубинах процессов переноса вещества под влиянием электромагнитного поля Земли. Наконец, не поддаются еще физико-химическому анализу явления жизни, играющие огромную геохимическую роль.

Таким образом, лишь постепенно расширявая природные процессы, мы научаемся разлагать их на составные части и анализировать в отдельности каждый из факторов, составляющих физико-химический комплекс явлений.

Физико-химическое толкование процессов минералообразования нашло себе место лишь после работ Вант-Гоффа над солями, Фогта над минералами магм и Гольдшмидта и Ниггли над образованиями контактов и метаморфизма. При этом выяснилось, что с точки зрения физико-химии мы можем установить в природе несколько типов процесса. В одних случаях мы имеем дело с уже установившимся равновесием при известном длительном процессе, которое создано под влиянием определенного и установившегося режима: например, таковым мы можем признать химическую и минералогическую природу какой-либо кристаллической породы, видоизмененной до конца контактом, или же серии осадков на дне минерального озера. В таких случаях строго определенных процессов с о с у щ е с т в о в а н и е минералов определяется законом фаз (отчасти в формулировке Гольдшмидта) или законом химического равновесия между парами солей в растворе и осадке (по Вант-Гоффу); с другой стороны, п о с л е д о в а т е л ь н о с т ь образования отвечает основным законам физической химии, найденным для изменения равновесия при кристаллизации или при переходе из одного агрегатного состояния в другое.

Повидимому, такое применение законов физической химии вполне приложимо к четырем большим областям минералообразования: минералам кристаллических пород, минералам контактного и регионального метаморфизма, минеральным осадкам озер и диагенетическим образованиям дна моря.

Однако и в этих случаях мы часто наблюдаем ряд явлений, при которых группировка не отвечает конечным условиям физико-химического равновесия, а лишь частично приближается к нему (например, образование контактных минералов в известняке при сохранении частей последнего).

Гораздо сложнее представляется с физико-химической точки зрения вторая группа явлений, связанных с длительными изменениями физико-химического режима или с изменением притекающих со стороны химических веществ. В этом случае мы наблюдаем комплекс минералов, из которых каждый в отдельности отвечает определенным условиям физико-химической обстановки, находясь в состоянии равновесия только по отношению к ним, а вся совокупность минералов отвечает в определенной последовательности последовательному изменению этой обстановки: таковы, например, образования минералов в жилах. Если при этом нет приноса нового вещества, а изменение внешних условий идет путем правильного и постепенного изменения какого-либо фактора (например, что очень обычно, понижения температуры), то мы получаем переход к первой группе явлений: так, например, постепенное изменение концентрации соляного раствора в озере приводит к определенной последовательности осаждения; такая же последовательность наблюдается в магматическом бассейне при постепенном падении температуры. Оба эти примера прекрасно укладываются в рамки определенных физико-химических закономерностей при учетывании постепенного изменения некоторых из факторов, определяющих равновесие.

Но если при таком длительном процессе (в котором изучается последовательная ассоциация минералов, а не одновременный комплекс) происходит и изменение в химической обстановке путем изменения природы реагирующих веществ, то мы получаем весьма сложную генетическую картину, в которой приходится учитывать закономерности не столько чисто химического, сколько геологического характера. Так, например, изменение в составе рудной жилы может быть обусловлено: с одной стороны, понижением температуры протекающего раствора, с другой — изменением химического состава раствора в сторону замены сольфатарных (сернистых)

соединений соединениями моффетного типа, т. е. заменю сульфидов карбонатами и сульфатами. В этих случаях общие законы равновесия физико-химических систем не применимы в чистом виде.

ПОЛЯ РАВНОВЕСИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ ТЕЛ

Исходя из приведенных выше физико-химических представлений, всякое природное тело рассматривается как продукт определенных химических реакций и, так или иначе, по своему генезису связано с определенными термодинамическими условиями, определенными сочетаниями элементов (или их радикалов) и определенным соотношением их масс. Эти три группы факторов закономерно вызывают к жизни то или иное химическое соединение, которое мы называем минералом. Устойчивость минерала обуславливается определенными пределами изменения этих трех факторов, и чем шире могут колебаться математические выражения этих факторов при сохранении равновесия образовавшегося тела, тем устойчивее этот минеральный вид. Мы будем называть эту степень устойчивости *полем равновесия*. Чем больше поле равновесия, тем устойчивее данное тело и тем большее изменение одного из этих регулирующих факторов необходимо для того, чтобы вывести данное соединение за пределы этого поля.

Мы знаем, однако, что *поле существования* химических соединений в общем много шире теоретического поля равновесия. Таким образом, в природе, наравне с формами истинного равновесия, существуют ложные неустойчивые системы: алмаз и графит, пирит и марказит. Часть этих неустойчивых тел сохраняется ввиду изменения термодинамической обстановки, другая часть образуется наново в качестве промежуточного продукта при природном химическом процессе.

В образовании последних мы видим проявление того основного закона природы, который был кратко сформулирован Оствальдом в следующих словах: «В ряде каких-либо возможных изменений наблюдается всегда то, которое по своей устойчивости ближе всего к начальному положению». Развивая дальше этот закон, мы видим, что в процессе не сразу достигается конечное равновесие, а сначала возникает наиболее близко лежащее промежуточное образование, хотя бы и с меньшим полем устойчивости. Этот закон красной нитью проходит через всю химию земной коры, и в нем я вижу не только объяснение, но и теоретическое обоснование целого ряда важнейших и спорных минералогических проблем.

Глава IV

ГЕНЕТИЧЕСКИЕ ТИПЫ

(краткая характеристика)¹

Согласно приведенной на стр. 21 схеме, нами намечены те основные генетические типы, к которым можно свести все многообразие природных генетических процессов. Хотя их характеристика уже вошла в обиход современной минералогической и геологической литературы, тем не менее я считаю нужным для справок при дальнейшем изложении описательной части кратко охарактеризовать эти генетические типы и наметить основу для их дальнейшего исследования.

¹ Главнейшую литературу см. в конце пятой главы, на стр. 48. Идеальный разрез через земную кору см. на рис. 3.

минеральных тел по мере охлаждения массива: таковы миндалины с цеолитами, жеоды агатов и т. п. Второй тип представляют так называемые миаролитические пустоты, по большей части образующиеся вследствие уменьшения объема породы при переходе в твердое состояние. Этот тип, особенно обычный в вязких магмах кислого характера, дает неправильной формы пустоты, в которых непосредственно выкристаллизовываются минералы магматической фазы, связанные постепенными переходами с кристаллической породой. Будучи приурочены обычно к зонам охлаждения и возникающим в магме при ее застывании разломам, эти пустоты иногда располагаются целыми сериями и в некоторых случаях сливаются в жилы, которые мы называем пегматитами. Проведение резкой границы между этими двумя явлениями почти невозможно, хотя для последних типично существование если не сплошной полости, то все же не прерывающегося, хотя бы и очень узенького канала, по которому идет циркуляция горячих паров и газообразных продуктов. Образование миаролитических пустот нередко связано с вплавлением кусков посторонних пород, особенно известняков в гранитных породах, и с вызванной этими процессами дифференциацией магмы.

ЖИЛЬНЫЕ ОБРАЗОВАНИЯ

А. Пегматитовые жилы

К этим жильным процессам мы относим мелкокристаллические образования магматических пород, которые образуются в последние моменты их магматического застывания в обстановке, насыщенной перегретыми парами воды и летучими соединениями. Характерной чертой пегматитовых жил является большая или меньшая одновременность всех минеральных тел, вплоть до образования совершенно одновременно кристаллизующихся минералов, образующих частью эвтектические смеси. В пегматитовых жилах, подобно миаролитическим заполнениям, нельзя установить резкую границу между самой породой и гидротермальными образованиями, наблюдаемыми в самих полостях. Тем не менее весьма часто пегматитовые жилы могут выходить за пределы самой материнской породы и проникать в окружающий покров. Повидимому, для пегматитов намечается и другой тип минералообразования: согласно Адамсу, отчасти и Седергольму, часть пегматитов может образоваться путем перекристаллизации и перегруппировки каких-либо осадочных или кристаллических образований, попавших в условия высокой температуры. Этим путем можно объяснить существование некоторых пегматитов, образующих пластовые жилы в кристаллических сланцах архейского и катархейского возраста. Минералогически пегматиты, благодаря крупности зерна и богатству разнообразными элементами, составляют один из наиболее интересных генетических процессов.

Б. Гидротермальные жилы

Заполнение трещин осадками восходящих горячих источников приводит к образованию гидротермальных и рудных жил. Систематика этих жильных процессов различна в зависимости от того, какие элементы жильного процесса нами будут положены к основе классификации: с одной точки зрения можно различать жилы по форме и типу заполнения трещины — жилы конкреционные, брекчиевидные (= трения) и т. д.; с другой, и это наиболее обычный способ систематики, различают жилы по типу

преобладающих элементов — рудные жилы тяжелых металлов, титано-апатитовые жилы, цеолитные жилы; наконец, при классификации жил учитывают целый комплекс характерных признаков процесса и различают жилы по типичным их представителям: альпийского типа, порвежского типа, метасоматические и т. д.

Очень важным моментом в изучении жилы является выяснение природы и происхождения тех веществ, кои ее заполняют; нам известны жилы рудные, тело которых образовано соединениями, принесенными исключительно из глубин; в других случаях сущность гидротермального процесса сводится лишь к извлечению некоторых составных частей из боковой породы и выкристаллизовыванию из них новых минеральных видов в самой жиле. Наконец, по стопам Цошени, американские геологи познакомили нас с метасоматическими жилами, образующимися путем проникновения по тоненькой трещине термальных растворов и постепенного видоизменения стенок в направлении от жилы к породе (см. дальше).

Как бы то ни было, жилные процессы в минеральном мире играют огромную роль, и их анализ представляет для геохимических и минералогических исследований огромное значение.

Согласно основным чертам этого генетического типа мы отличаем:

1) Ж и л ы р у д н ы е, в которых минералы принесены извне, и кои обычно связаны с дизъюнктивными дислокациями, принесшими из глубин тяжелые элементы. Их связь с тектоническими процессами, с одной стороны, и глубинными очагами магм, с другой, весьма вероятна.

2) Ж и л ы г и д р о т е р м а л ь н ы е и а л ь п и й с к о г о т и п а, для которых характерно проникновение водных растворов, насыщенных угольной кислотой, но лишенных большинства глубинных элементов, т. е. исключительно связанных с деятелями зоны цементации. Как и в первом случае, они проникают по дислокационным трещинам, связаны с тектоническими процессами в зоне цементации, но не зависят непосредственно от очагов магм, протекая в области зоны сжатия. Образование их может наблюдаться в самых разнообразных породах и связано главным образом с выщелачиванием и перегруппировкой элементов боковых стенок окружающей породы. Эти образования особенно типичны для складчатых горных хребтов, лишенных крупных дизъюнктивных дислокаций.

3) Как крайний случай изменения вмещающих пород, мы различаем третий тип жил — м е т а с о м а т и ч е с к и е, при котором окружающая порода подвергается обменным реакциям со стороны растворов, протекающих снизу, реже — сверху и притом сильно минерализованных.

ПНЕМАТОЛИТЫ

Образования, связанные с переходом газообразных тел в твердые или жидкие, обнимают большую область явлений, еще до сих пор недостаточно выясненную с физико-химической точки зрения. В одних случаях летучие соединения оказываются связанными с более поверхностными зонами земной коры: это возгоны и процессы сольфатар и вулканов, возгоны и налеты при подземных пожарах и т. д. В других, повидимому, гораздо более крупных по масштабу и распространению геологических процессах мы встречаемся с деятельностью летучих элементов и соединений в глубинах, причем конечными продуктами химических реакций являются или более простые химические соединения, которые образуются в результате поверхностных возгонов (как Fe_2O_3 , KCl , NH_4Cl и т. д.), или же новообразования ряда весьма устойчивых и химически сложных тел (например, слюд, оловянного камня, топаза и т. д.). Целые зоны и области горных пород

могут по трещинам и капиллярам подвергаться воздействию продуктов возгонки, в результате чего получаются комплексы глубоко измененных пород — ш т о к в е р к и. Нет никакого сомнения, что могут наблюдаться незаметные переходы между гидротермальными жилами и пневматолитами.

КОПТАКТЫ

Под явлениями контактного метаморфизма мы будем подразумевать весь комплекс литогенетических явлений, которые наблюдаются при соприкосновении или внедрении магмы в другую горную породу. Мы различаем под именем эндоконтакта все те явления, кои происходят в самой нижней породах, экзоконтакта — в породе воздействующей.

Область явлений первого порядка может быть весьма различной: в простейшем случае порода застывает, не включая и химически не перерабатывая соседней; в ней лишь наблюдается некоторое ускорение кристаллизационного процесса, изменение в зерне, изредка накопление металлических окислов в зоне контакта. В других случаях магма обволакивает обломки соседних пород (включения), частью их контактно видоизменяя, частью совершенно растворяя и перерабатывая. В последнем случае мы переходим в область тех сложных, химических превращений, которые порода испытывает при дифференциации. Этим путем объясняется иногда накопление окислов железа и магнетита в верхних частях месторождений, образование щелочных эфемерных магм (Дели) и т. д.

Совершенно особым типом контактных явлений, в которых сливается и экзо- и эндоконтакт, являются так называемые м и г м а т и ч е с к и е я в л е н и я; они были намечены еще старой французской школой, подробнее описаны Седергольмом и заключаются во взаимном пропикновении осадочной свиты и вязкой магмы и почти полном химическом слиянии их при сохранении внешней структуры.

Явления э к з о к о н т а к т а в одних случаях протекают без привнесения новых элементов со стороны магматического бассейна и тогда вполне подчиняются минералогическому правилу фаз В. М. Гольдшмидта или же, что чаще бывает, обогащаются летучими соединениями, растворами кремнезема и т. д. Этот последний процесс может настолько усиливаться, что чистый пневматолитический, контактный метаморфизм переходит в процесс изменения соседней породы, вплоть до полного замещения ее элементов привнесенными элементами магм. В этом случае мы получаем к о н т а к т н ы й м е т а с о м а т и з м.

РЕГИОНАЛЬНО-МЕТАМОРФИЧЕСКИЕ ОБРАЗОВАНИЯ

На этом типе минералообразования не приходится останавливаться детально, так как он уже с большой полнотой выяснен работами Грубона, Ниггли, Гольдшмидта, Бекке и др.

С геохимической точки зрения надо отметить, что эти образования в общем подчиняются закону фаз Гольдшмидта и характеризуются большими удельными весами при малом содержании летучих элементов, как то: фтора, воды, угольной кислоты и т. п. Условно сюда можно отнести и фальбанды, рудные обогащения, отчасти магматического происхождения, в архейских и катаржейских свитах. В последнее время (1916 г.) Бекке предложил термин геотермического метаморфизма для очень обычных, но мало изученных процессов изменения по преимуществу химических осадков под влиянием геотермического повышения температуры с глубиной, не достаточной еще для выявления роли давления, но уже вполне достаточ-

ной для повышения температуры на несколько десятков градусов; частично этот процесс перекрывается с тем, что я дальше, для осадочных пород, называю катагенезом.

ВОДНЫЕ ОСАДКИ, СИНХРОНИЧНЫЕ И ДИАГЕНЕТИЧЕСКИЕ

(Минералы сингенеза и диагенеза)¹

К этим двум группам я отношу огромную область литогенеза при образовании осадочных пород. Благодаря работам А. Д. Архангельского, Стерри-Ханта, Вальтера, Кайё, Колле, Андре и многих других начинает выясняться химизм процессов, сопутствующих образованию осадка на дне водных бассейнов и превращению его в твердую горную породу. В настоящее время мы определенно различаем два момента в истории осадочной породы: образование самого осадка и его диагенез; все минералы, образовавшиеся как составная часть самого осадочного процесса, мы называем первичными (синхроничными) минералами осадка. Таковы, например, CaCO_3 раковин или береговых оолитов и свободно образовавшиеся горошинки болотных руд в озерах и т. д. Однако гораздо важнее нам представляется второй момент в истории образования породы, который мы называем диагенезом. Под этим термином мы обобщаем совокупность всех тех процессов, которые происходят на дне водоемов в первичном илистом или еще не связанном осадке и которые до момента осаджения нового слоя непосредственно под покровом воды превращают осадок в горную породу. Я определяю конечный момент этой стадии в жизни осадочной породы наложением на нее нового слоя осадка, петрографически отличного от предыдущего и предохраняющего таким образом старый осадок от непосредственного соприкосновения с водой. С этого момента начинается область новых химических реакций породы, которую я называю катагенезом (см. ниже).

С выше приведенной точки зрения образование осадка и его диагенетическое перерождение на дне бассейна можно сопоставить с процессами почвообразования на материке.

Синхроническое образование осадков является результатом сложных реакций трех типов: чисто физико-химического характера, биохимического и, наконец, чисто механического. В процессах диагенеза вся эта масса осажденного вещества начинает перегруппировываться, согласно законам физико-химического равновесия, причем средой для переноса вещества является водный раствор, пропитывающий рыхлый осадок и, в случае соленых бассейнов, содержащий в себе ряд химических веществ. Эта перегруппировка в общем складывается по преимуществу из двух процессов: образования цемента и возникновения центров кристаллизации — конкреций, радиально-лучистых сростков и т. п.

ПРОЦЕССЫ КАТАГЕНЕЗА

Как выше отмечено, катагенезом я называю всю совокупность химических преобразований породы после того, как она оказалась отделенной от водного бассейна слоем нового осадка, и вплоть до того момента, когда она сделалась поверхностью материка, т. е. оказалась на границе с атмосферой. Этот большой промежуток времени обнимает весь цикл явлений от «почвообразовании» на дне бассейна до почвообразования на поверхности Земли. Конечно, при этом я исключаю процессы, связанные с действием высокой температуры и давления, т. е. всю область контактного

¹ Сюда же относятся осадки соляных озер. О них см. стр. 45.

и глубинного метаморфизма, но не могу не отметить, что частично катагенез протекает при несколько повышенных температурах согласно геотермическому градиенту Земли.

Если явления диагенеза, как показывает само слово, заключались в перегруппировке элементов внутри того же слоя, то катагенез связан как раз с обменом растворов между петрографически разнородными слоями или горизонтами. Главными действующими в этом случае являются: кислород, угольная кислота и вода, отчасти кремниевая кислота, сернистые растворы и т. д.; биохимические реакции отходят на второй план; таким образом, катагенез отвечает тому комплексу явлений, который характерен для более глубоких частей зоны метаморфизма Ван-Хайза. Таковы образование пустот с натёками кальцита (сталактиты), вторичное возникновение конкреций, образование трещин, заполненных кальцитом, кварцем, кремневыми породами, обогащение магнием с образованием доломитов и т. д.

Таким образом, катагенез породы обнимает огромную область явлений приспособления осадочных минералов к новым условиям в ней залегания их под поверхностью водного бассейна. С точки зрения явлений химического равновесия мы имеем здесь область весьма изменчивых реакций, часто не достигающих полного равновесия. Понятие о катагенезе не отвечает терминам Ван-Хайза о метаморфизме, но несколько приближается к тем определениям, которые дают этому процессу Лейт и Мид.¹

ПРОЦЕССЫ ПОВЕРХНОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ — ГИПЕРГЕНЕЗ¹

Под этим термином мы подразумеваем весь комплекс химических и физико-химических явлений, которые протекают на границе между атмосферой и твердой земной оболочкой. Если именем диагенеза мы обозначали процессы, стремящиеся к установлению химического равновесия между водным раствором бассейна и осадком, под именем катагенеза — такие же процессы в области установления равновесия в разнородной среде осадочных пород, то именем гипергенеза мы будем обозначать все то, что стремится к равновесию между литой и атмосферой, т. е. приводит к образованию почвы или нового осадка. Это область огромного геохимического значения, в которой принимают участие и вся наземная органическая жизнь Земли, и сам человек с его культурной и фабрично-заводской деятельностью, — область, совершенно справедливо называемая биосферой.

Нижние границы этих процессов не могут быть определены с точностью, и постепенно явления поверхностного метаморфизма с глубиной переходят в процессы катагенетического характера. Надо, однако, иметь в виду, что разбираемому циклу геохимических явлений подвержены не только осадочные, но и кристаллические породы и даже в гораздо большей степени именно эти последние, так как они, по условиям образования, наиболее далеки от равновесия системы — атмосфера + твердая кора.

К процессам гипергенеза мы прежде всего относим явления, связанные с образованием почвенного покрова и всех подготовительных стадий к нему: поверхностного разрушения эруптивных масс, элювиального накопления продуктов выщелачивания и т. д. Из процессов почвообразования мы особенно назовем: накопление остатков растительной и животной жизни, фиксацию некоторых элементов биохимическими реакциями (азот, калий), накопление подзола (SiO_2) и орштейновых горизонтов (Fe) и т. д.

¹ Еще Меррилл предложил совокупность всех продуктов, получаемых при выветривании, называть реголитом; я считаю этот термин совершенно излишним.

Весь этот мир явлений, стоящий на границе между минералогией и химическим почвоведением, до сих пор еще мало изучен с точки зрения самого минералообразовательного процесса, да и самое понятие о минерале получает в этих условиях особый смысл. Учитывая неустойчивость и быструю изменяемость геохимической обстановки почвенного покрова, мы, как показали мои исследования, имеем здесь часто дело не с настоящими равновесиями, а лишь с ложными или неполными, а самый минерал нам представляется как подвижная физико-химическая система, постепенно без скачков изменяющая свой состав при изменении внешних условий. Сообразно с этим мы можем наблюдать в условиях поверхностного разрушения целый ряд не конечных продуктов изменения, а промежуточных членов, лишь временно устойчивых согласно закону Оствальда. Так, при разрушении оливиновой породы конечной группировкой, отвечающей системе: деитерии атмосферы + оливин, должны быть образования кварца, магнезита и лимонита; поэтому, если бы процесс выветривания шел сразу до конечного равновесия, в покрове изменяющегося оливинового массива мы встретили бы только оливин + магнезит + кварц + лимонит. Однако наблюдения нам показывают, что это не так и что, наравне с конечными продуктами, встречаются и змеевик, и опал.

С другой стороны, в этой же области гипергенеза идет накопление так называемых м у т а б и л ь н ы х с о е д и н е н и й, или соединений переменного состава. Еще в 1913 г. мной было подчеркнуто огромное значение этих соединений в почвенном покрове, соединений совершенно однородных и тем не менее изменчивых по своему составу. Эти же соединения мы должны допустить и на дне водных бассейнов, среди первичных осадков дна озер или морей. До сих пор изучение этих подвижных систем еще не произведено, и только область цеолитов и коллоидальных веществ немного проливает свет на основные свойства этих тел.

ГЕНЕТИЧЕСКИЕ ТИПЫ В ОСАДОЧНЫХ ПОРОДАХ

По отношению к осадочным породам идеи литогенеза не получили до сих пор достаточно ясного выявления и формулировки. Ввиду этого я считаю необходимым подчеркнуть основные типы образования соединений в осадочных сериях.

В общем, с генетической точки зрения, мы можем различать в осадочных породах три группы образований:

I. Сингенеза и диагенеза	водный бассейн с его биохимией + осадок на дне водоема.
II. Катагенеза	серия разнородных слоев.
III. Гипергенеза (как современного, так и древнего — в периоды материковых перерывов)	атмосфера и биосфера + порода.

Мы видим из сказанного, что указанные выше три типа сочетаний разнородных химических сред и обуславливают разнообразие химических процессов в осадочных породах при довольно сходных, в общем, физико-химических условиях (т. е. при низких температурах и низких давлениях).

Обменные реакции между этими разнородными средами приводят к образованию всех тех разнообразных минералов, которые встречаются

в осадочной свите, причем в последней могут идти или процессы перегруппировки элементов без привноса вещества извне (диагенез, перегруппировка при катагенезе), или же с привносом новых веществ: в первом случае из водного бассейна, во втором — из свиты пород, в третьем — из земной поверхности и атмосферы.

Я подчеркиваю совершенно исключительное значение явлений катагенеза, на который не обращали до сих пор достаточно внимания. Такие комбинации, как описываемое ниже наложение юрских черных глин на известняки, в достаточной мере доказывают значение для всей Русской платформы явлений катагенеза. Особого внимания заслуживает древний гипергенез, т. е. поверхностное и элювиальное изменение минералов и пород во время перерывов накопления осадков. Отвечая перерыву или несогласию в напластовании, он тем не менее легко может быть смешан с явлениями катагенеза, которые особенно резки как раз на поверхностях соприкосновения различных пород. Благодаря этому древний гипергенез очень часто маскируется новейшими процессами катагенеза.

В дальнейшем комбинацию двух геохимических разнородных сред я буду называть геохимической парой; смена одной из них, например, замена верхней (атмосферы, или водного слоя) новой средой, вызывает начало новых обменных реакций. Об этом подробнее смотри в следующей главе и в заключительных главах описания Европейской России.

Глава V

ГЕНЕТИЧЕСКИЕ ЦИКЛЫ

В предыдущей главе мы рассмотрели различные типы минералообразовательных процессов; здесь же намерены обратиться к вопросу о том, какие минералообразовательные процессы вызываются определенными геологическими явлениями. Нет никакого сомнения, что каждое крупное геологическое явление, в чем бы оно ни заключалось, вызывает ту или иную химическую перегруппировку; но особенно важно проследить то химическое воздействие, которое оказывают наиболее крупные геологические явления.

При этом необходимо отметить, что крупные геологические процессы сопровождаются обычно целым рядом разнообразных физико-химических явлений, связанных между собой известной причинностью и хронологически следующих одно за другим. Так, например, вулканические извержения вызывают ряд магматических процессов, выделение паров или горячих водных растворов, контактное воздействие на боковые породы и т. д. Совокупность таких минералообразовательных процессов, связанных общей причинной зависимостью и определенной хронологической последовательностью, мы будем называть генетическим циклом.

Строго говоря, область этого вопроса является лишь частью физической геологии, изучающей строение и превращения Земли; но, как показывает само наименование этой научной дисциплины, исследователи обращали по преимуществу внимание на физические изменения земной коры, не отводя достаточно места явлениям химического характера. Очевидно, что в физическую геологию следовало бы включить специальные главы чисто химического характера и этим несколько исправить односторонность освещения в современном изложении этой науки.

Мы различаем в настоящее время генетические циклы, связанные со следующими основными геологическими процессами¹:

1. Проявления вулканизма на поверхности.
2. Магматические бассейны глубин.
3. Дизъюнктивные и пликативные дислокации (разломы и складки).
4. Горячие источники.
5. Метаморфизм давления.
6. Деятельность атмосферы и климатического режима.
7. Деятельность льда.
8. Текущие наземные воды.
9. Подземные воды.
10. Болота и озера.
11. Соляные озера.
12. Моря и океаны.
13. Перемещения береговой линии (трансгрессии и регрессии).
14. Деятельность органического мира и человека.

Перехожу к краткому описанию главнейших генетических циклов.

1. *Вулканическая деятельность.* Химическая деятельность вулканов, как аппаратов земной поверхности, характеризуется слабым развитием химического влияния на соседние образования, обилием газообразных продуктов, выносящихся в атмосферу (CO_2 , H_2S , SO_2 и H_2O), образованием пористых горных пород (пемзы, пепла) и накоплением продуктов поствулканической и сольфатарной деятельности в пустотах и трещинах. Особенно интересны химические реакции, вызываемые вулканическими извержениями под водою.

Генетический цикл обычного вулканического процесса может быть представлен так:

- 1) застывание расплавленной лавы;
- 2) сольфатарная деятельность с выделением возгонов и налетов, химически изменяющих как самую лаву, так и другие породы;
- 3) мофетная деятельность с выделением угольной кислоты и каолиннизацией по трещинам;
- 4) поствулканическое (гидротермальное) заполнение пустот и миндалинов.

Согласно Аррениусу, вулканическая деятельность косвенно вызывает еще более сложный генетический цикл: обогащение атмосферы угольной кислотой, повышение теплового режима земной поверхности, усиление растительной жизни, поглощение последней угольной кислоты, понижение температуры поверхности и ледниковые процессы. Нетрудно видеть, как велики геохимические преобразования, вносимые этим циклом в природу!

2. *Магматические процессы в глубинах* характеризуются выделением минералов из расплавленной массы в определенной последовательности, частичным поглощением соседних пород, дифференциацией магмы на химически разнородные части, накоплением летучих и парообразных соединений в трещинах с образованием эвтектических смесей и энергичным воздействием летучих соединений на боковые породы. Для магматических процессов неглубинного типа, т. е. жил, лакколитов, батолитов и т. д., характерны: более слабое проявление летучих соединений, слабый контактный метаморфизм и две фазы в кристаллизации магматической части — интраэллиптическая и жильная.

Обычный генетический цикл:

- 1) выделение магматических минералов (часто в две фазы);

Нет никакого сомнения, что приводимый ниже список охватывает лишь главные генетические циклы земной коры.

- 2) образование пегматитовых жил;
- 3) образование мигматитовых пустот и минералов с заполнением их продуктами поствулканической деятельности;
- 4) поствулканические гидротермальные процессы в самом эруптиве и в соседних породах.

Одновременно с этими процессами идет контактное, притом иногда взаимное, проникновение химических веществ в магматическую и окружающую породу (контактный метаморфизм и мигматизм).

Как обычная черта физико-химической обстановки этого генетического цикла — постепенное понижение температуры с заменой магматических процессов газобразными, а потом и гидротермальными, и, в заключение, воздействие вадозных вод.

3. *Дислокационные и горообразующие процессы* являются первоисточником разнообразных и сложных генетических циклов, для которых был предложен довольно удачный термин — *посторогенические*. Спокойные складчатые образования, идущие в зоне сжатия, без резко выраженных дизъюнктивных дислокаций (например, Альпийская горная система), не создают особенного разнообразия минералообразовательных процессов и ограничиваются лишь возникновением в местах давления метаморфических сланцев и горячих растворов без богатой минерализации (лишь при участии угольной кислоты перегретых паров воды). Наоборот, дизъюнктивные дислокации, сбросы и трещины по зонам опускания вызывают сложный цикл генетических процессов со всем разнообразием и богатством участвующих в них химических элементов.

В первом случае генетический цикл ограничивается гидротермальными процессами альпийского типа (см. стр. 34), во втором мы имеем вулканические выделения и гидротермальную глубинную деятельность с ее генетическим циклом (стр. 45). Во всяком случае процессы минералообразования весьма различны в областях тангенциальных и вертикальных движений земной коры, и поэтому более точное выяснение в каждом данном случае связи между орогеническими движениями и минералообразованием составляет весьма важную область современной генетической минералогии.

В общем намечаются два типа *посторогенических* явлений: поверхностного и глубинного характера.

4. *Горячие источники* (большей частью ювенильные воды по Зюссу). Гидротермальная деятельность характеризуется: связью с тектоническими процессами и дислокационными трещинами, происхождением части химических элементов из более глубоких зон земной коры. В случае поверхностного типа процесса (при складчатых образованиях) минеральный источник отличается отсутствием глубинных элементов и повышенной деятельностью CO_2 и H_2O : в этом случае происхождение термы может быть связано с вадозными (поверхностными) водами; эти воды некоторые авторы называют фреатическими. В случае более глубоких дислокаций (дизъюнктивных) горячие источники характеризуются наличием глубинных тяжелых элементов и в качестве химических деятелей — фтором и сернистыми соединениями.

Оба типа обычно отличаются постепенным падением температуры процесса, второй характеризуется частым изменением состава раствора (без особых видимых причин), тогда как первый — большой правильностью в порядке падения температуры, постепенной заменой щелочных силикатов щелочно-земельными, а потом и карбонатами (альпийский жильный тип).

Генетический цикл: разломы земной коры, пневматолитические процессы, чисто гидротермальные с понижающейся температурой вплоть до нормальных холодных растворов.

В обоих типах мы часто не наблюдаем правильного генетического цикла, благодаря неровному ходу самого процесса, повторению более высоких температур (Nachschub помесских авторов, remise en mouvement де Лопе) и общему извилистому характеру кривой главнейших физико-химических факторов.

5. *Метаморфизм давления* характеризуется слабо повышенной температурой и высоким давлением. В зависимости от высоты температуры мы имеем или процессы образования кристаллических сланцев (особенно при тангенциальных движениях) при сравнительно низких температурах и одностороннем давлении (стресс), или же образование гнейсов при более высоких температурах и пластичности минералообразовательной среды (частично гидростатическое давление). В этой области образование минералов регулируется законом образования минералов с большим удельным весом, законом Рика о расположении минералов перпендикулярно давлению и, наконец, всеми теми уравнениями физико-химического равновесия, в которых имеет значение величина давления.

Весьма удачный термин ввел в 1920 году Бекке для понятия о химическом изменении осадков под влиянием геотермического повышения температуры. На примере солевых месторождений он показал, что во всякой серии осадочных пород, достигающей мощности хотя бы только 500—1000 м, внизу начинает сказываться влияние геотермического градиента, благодаря повышению температуры процессов на 20—30° С. Такой геотермический метаморфизм, без каких-либо ясно выраженных процессов превращения в сланцы и гнейсы, может и должен наблюдаться в низших частях каждой серии осадочных пород и даже для Европейской России должен быть принят во внимание.

6. *Атмосфера и климатический режим.* Атмосфера является одним из главнейших деятелей земной поверхности, вызывая целый ряд разнообразных генетических циклов. Роль атмосферы не ограничивается газообразной оболочкой, окружающей Землю, но в еще большей степени сказывается в проникновении ее элементов в твердую земную кору и почву (по законам капиллярности и адсорбции) и в зону гидросферы как больших водоемов, так и текучих подземных вод. Основными геохимическими факторами атмосферы являются: химические элементы и соединения, H_2O , CO_2 , N, O, механическое передвижение частиц атмосферы, колебания и изменения в температурных условиях, колебания и изменения в величинах влажности, электрические разряды. Совокупность этих химических и физических факторов обуславливает химическое действие климата. Распространение каждого из перечисленных выше элементов в глубину подчиняется своим собственным законам: вода насыщает всю глубину Земли через массу капилляров и систему так называемых водоносных горизонтов, вплоть до определенной поверхности, называемой уровнем грунтовых вод; угольная кислота, так называемая вадозная, в противоположность ювенильной, проникает в глубину Земли не свыше 2—3 км, очень быстро исчезая из цикла химических превращений, благодаря образованию устойчивых и мало растворимых соединений; азот, благодаря электрическим разрядам и жизнедеятельности организмов, фиксируется в самых верхних частях литосферы в виде азотнокислых и аммиачных соединений, не проникая (или почти не проникая) ниже подпочвенного слоя; наконец, кислород, важнейший химический деятель атмосферы, не ограничивается только своей деятельностью окисления на поверхности и в биосфере (вместе с озоном), но проникает глубоко в земную кору, на пути используя и постепенно исчезая с глубиной. И теоретически, и практически можно наметить в глубинах границу его распространения, так называемую

кислородную поверхность, только выше которой идут процессы окисления. Эта кислородная поверхность, в зависимости от скорости эрозии или климатических факторов, может находиться на разных глубинах от 0 до $1\frac{1}{2}$ км, и изучение ее положения играет огромную роль в общем генетическом цикле данной местности.

Механическое движение атмосферы является химическим фактором постольку, поскольку ветер переносит соленые брызги моря на далекие пространства материка, обогащая хлористым натрием дождевую воду, путем дефляции облегчает доступ химических деятелей поверхности к более глубоким зонам литосферы, а у берегов моря, создавая движущие волны, изменяет газовый состав морской воды и его влияние на прибрежную полосу.

Таким образом, намечается серьезная и интересная роль самого климатического режима в геохимических процессах. Характеризуясь прежде всего определенным сочетанием температуры и влажности, климатический режим обуславливает то зонарное распределение поверхностных химических процессов, которое было выдвинуто в почвоведении В. В. Докучаевым, Н. М. Сибирцевым и развито К. Д. Глиной. Все разнообразие почвенного покрова есть частью прямой, частью косвенный результат климатического режима (и зависящих от него биохимических особенностей): слабый химизм в полярных широтах, почвенные зоны в средних и сложный химизм пояса пустынь являются тремя крупными генетическими циклами, причем каждому из них свойственны и свои химические явления и свой темп химических перегруппировок земной поверхности. Совершенно особенным химизмом отличаются области с вечной мерзлотой, где слой вечного льда образует трудно проницаемую броню для поверхностных растворов и химических деятелей атмосферы.

Наконец, влияние климатического режима на ход химических реакций земной поверхности проявляется еще в годовой периодичности некоторых химических реакций, очень чувствительных к изменениям температуры (таковы годовые кольца соли и ангидрита в осадках соляных озер, появление гидратов хлористого натрия в соляных источниках, выцветы солей в пустынном климате, сезонные изменения цеолитов и т. д.).

Последним деятелем в области атмосферы являются электрические разряды, которые в некоторых условиях должны быть рассматриваемы, как важный геохимический фактор: окисление кислорода в озон и образование солей азотной кислоты в субтропической зоне или осаждение самородных металлов в жильных процессах являются главными примерами такого минералообразования.

Наметим главнейшие генетические циклы, связанные с деятельностью атмосферы.

А. Цикл средних широт:

- 1) накопление гумусовых веществ;
- 2) поверхностное разрушение силикатов;
- 3) биохимическая фиксация азота воздуха и калия почвы;
- 4) накопление кремнезема (подзола) с образованием в глубине зоны орштейна (накопление Fe);
- 5) вынос гуминовых соединений железа реками;
- 6) накопление и осаждение железа в озерах и болотах.

Б. Цикл пустынный: фиксация азота воздуха разрядами электричества — механическое разрушение — накопление кварца (механическое) и красносмол (химическое) — энергичный перенос растворимых солей — начало генетического цикла соляного озера (см. ниже).

7. *Деятельность льда.* Химическая деятельность льда вообще уступает его механическому действию. Однако льдом производится огромная подготовительная работа истирания вещества, облегчающая дальнейшее течение химических реакций (ледниковая муть). Особое значение имеет вечная мерзлота (см. стр. 44).

8. *Наземные текущие воды.* Химическая деятельность наземных текущих вод достаточно общеизвестна: огромное выщелачивание, производимое текучими водами, и перенос растворимых солей Na, Mg, Ca, а также Cl, SO₃, SiO₂ и органических соединений составляют основные черты этого генетического цикла, отличающегося отсутствием твердых новообразований химического характера. Изменение базиса эрозии имеет огромное влияние на изменение водного режима водоемов, а тем самым на их геохимические процессы.

Смит (S m y t h. Journal of Geology, 1913) вывел следующую относительную растворимость окислов и процент выноса их из пород, приняв за 100 растворимость извести:

CaO	— 100
Na ₂ O	— 96,1
MgO	— 36,3
K ₂ O	— 11,7
SiO ₂	— 3,9
Al ₂ O ₃	— 2,6

Весьма любопытный материал, показывающий в цифрах деятельность текучих вод.

9. *Подземные воды.* Огромная роль подпочвенных вадозных вод тоже хорошо известна, причем их химическая деятельность в значительной степени определяется глубиной залегания поверхности грунтовых вод и отчасти положением кислородной поверхности. Равным образом играет роль и глубина углекислотной поверхности, определяющей границу проникания сверху вадозной угольной кислоты. Растворяющая деятельность поверхностных горизонтов сменяется цементирующей — в более глубоких. Основные химические деители, кроме самой воды: CO₂, SiO₂, O, H₂S и др. Для газообразных продуктов, особенно CO₂, играет роль давление насыщения этим газом, так как при выделении угольной кислоты происходит реакция выпадения карбонатов (сталактиты в пещерах).

10. *Болота* отличаются обилием органогенного материала, накоплением соединений N, H, C, P, S, Fe, отчасти Mn и K, окислительным ходом процесса при накоплении осадка и восстановительным типом реакций при его диагенезе.

Генетический цикл обычно таков: накопление продуктов распада органического вещества (гуминовые вещества) — фиксация сернистого железа в виде гидротроилита и мельниковита, а потом пирита и фосфорнокислого железа в форме вивианита — образование торфа.

В о з е р н ы х бассейнах с меньшим количеством перегнойного материала, где не наблюдается накопления торфа, генетический пикл нередко протекает так: принос реками гуминовых соединений — осаждение соединений железа (марганцевых и фосфористых) — бобовых и озерных руд.

11. *Соляные озера.* Основными чертами геохимических реакций являются: относительно высокая (до 70° C) температура, строгая закономерность последовательности осаждения и совместного нахождения разных солей (согласно ряду физико-химических законов Вант-Гоффа и Курнакова).

Г е н е т и ч е с к и й ц и к л : выщелачивание почвы и горных пород текущими водами — концентрация солей в бассейне в последовательности: сульфат кальция — хлористый натрий — двойная сернокислая соль калия и магния — двойная соль хлористого калия и магния (карналлит) — хлористый магний и соли брома и йода.

12. *Океаны* являются фактором исключительной важности в литогенезе, причем отличаются вообще низкой температурой главнейших геохимических процессов, огромным значением биохимических реакций в меньших глубинах и реакций, вызванных продуктами распада органического вещества,—в больших (H_2S , SO_3 , CO_2 , NH_3); далее, отличительной чертой океанических процессов является механическое накопление на дне четырех типов продуктов: космического происхождения (пыль), вулканического (пыль, пепел, подводные извержения), биохимического (раковины, скелеты, иглы, кости и т. д.) и сапрогенного (продукты гниения и распада).

С геологической и геохимической точек зрения океан подразделяется на зоны: 1) литоральная (от уровня до 40 — 80 м) — область прибоя; 2) сублиторальная (до 200 м), образующая вместе с первой континентальное плато; 3) батимальная (или пелагическая) — зона крутого падения до 1000 м и 4) абиссальная зона больших глубин.

Геохимический характер осадков определяется в первую очередь глубинами, во вторую — характером и близостью береговой линии, в третью — широтой местности, т. е. биогеографическими факторами. С глубиной вообще наблюдается уменьшение роли углекислых соединений и увеличение накопления кремниевых соединений и соединений марганца.

13. *Перемещение береговой линии* (трансгрессивное или регрессивное). Главное значение этого важнейшего геологического процесса заключается во влиянии его на биогеографическое распределение организмов и в вызываемом резком изменении режима, вымывании или даже массовой гибели одних и миграции других. Прекрасный пример такой массовой гибели и накопления органического вещества представляет накопление фосфоритов в русских меловых и юрских отложениях, для которых А. Д. Архангельский приурочивает скопления фосфора как раз к тем горизонтам, которые отвечают быстрому трансгрессивному перемещению береговой линии.

Изучая минералы наших осадочных образований, мы приходим к интересным выводам о значении в геохимии перемещения береговой линии. Мы знаем, что самым типичным образованием минерала является одновременное с тем горизонтом, который его включает, или же диагенетическое, в нем самом. Такой процесс минералообразования находится в тесной зависимости от батиметрических условий, с одной стороны, и биохимических — с другой. Однако, если бассейн подвергается быстрому регрессу, то наблюдается строго определенная последовательность геохимических явлений, и наиболее типичный цикл сводится к серии: известняк — глауконитовые отложения — пески. Крайней формой быстрого регрессивного движения является полное обмеление и непосредственное обнажение осадка в зоне атмосферы. Наступает момент к а т а г е н е з а п е р е р ы в а, в котором осадочная толща подвергается разрушению и геохимическому превращению, т. е. тому, что я называю г и п е р г е н е з о м.

Если в дальнейшем вновь наступает трансгрессия моря, то начинается наступание бассейна на материк, и на зону катагенеза перерыва начинает налагаться серия трансгрессивных осадков в последовательности: продукты переработки почвенного или мелководного покрова моря и образование основного конгломерата из них у берега (= катагенез трансгрессии), затем следуют песчаники и известняки.

никакими другими причинами: таково, например, накопление H_2S , NH_3 и CO_2 в продуктах гниения животного вещества на дне морских бассейнов, или же массовые скопления селенистых шламов в отбросах серноокислотных заводов.

Геохимическая роль биохимических и культурохимических реакций еще не оценена в достаточной мере: оценка первых сейчас производится, благодаря инициативе В. И. Вернадского, но для последних, как для совершенно новой страницы в геохимии, не сделано еще самых элементарных подсчетов, и до сих пор не было попыток выразить всю двадцативековую жизнь культурного человечества в цифрах геохимических реакций и дать количественную оценку промышленного переноса (миграции) и превращения химических веществ.

Главнейшая литература по генезису минералов

(См. также литературу в конце главы VI)

- A. Breithaupt. Die Paragenesis der Mineralien. Freiberg, 1849.
 H. Saint-Claire-Deville. Mémoire sur les émanations volcaniques. C. R. Acad. Sci., Paris, 1856, 43, 955.
 J. Walther. Einleitung in die Geologie. Jena, 1893—1894 (T. III, Lithogenesis der Gegenwart).
 E. Weinschenk. Minerallagerstätten, Gross-Venediger. Zs. Kryst. u. Min., 1896, XXVI, 337.
 L. Cayeux. Contribut. étude micrograph. d. terr. sédim. Mém. Soc. géol. Nord, 1897, IV, 2.
 J. Koenigsberger. Minerallagerstätten der Schweiz. N. Jb. Min., Geol. u. Paläont., 1901, BB. XLIII; там же, 1908, XXVI, 488.
 Ch. R. Van-Hise. Treatise on metamorphism. Monogr. U. S. Geol. Survey, 1904, XLVII, 932.
 A. Pelikan. Entstehung der Zeolithe. Tscherm. Min. Petr. Mitt., 1906, XXV, 113.
 A. Gautier. La genèse des eaux minérales. Ann. min. (10), mém. IX, 1906, 316.
 C. K. Leith. The metamorphic cycle. J. Geol., 1907, XV, 303—313.
 E. C. Sullivan. Interaction between minerals and water solution. Bull. U. S. Geol. Survey, 1907, № 312.
 W. H. Emmons. Genetical classification of minerals. Econ. Geol., 1908, 111, 611.
 R. Delkeskamp. Mineralquellen. Zs. prakt. Geol., 1908, XVI, 401—443.
 K. Andree. Ueber stetige und unterbrochene Meeressedimente. N. Jb. Min., Geol. u. Paläont., 1908, BB. XXV, 366.
 E. Philipp. Ueber das Problem der Schichtung. Zs. Dtsch. geol. Ges., 1908, LX, 346—377.
 H. Washington. Trans. Am. Inst. Min. Eng., 1909, XXXIX, 735. (Характер марм).
 F. Beyschlag, P. Krush und J. H. L. Vogt. Die Lagerstätten der nutzbaren Mineralien und Gesteine. Stuttgart, 1909, I, 1 (второе изд., 1914).
 V. M. Goldschmidt. Kontaktmetamorphismus im Kristianiagebiet. Vidensk. Schrift., № 1. Kristiania, 1911.
 V. M. Goldschmidt. Anwendung der Phasenregel auf Silikatgesteine. Zs. Electrochem., 1911, XVII, 686.
 V. M. Goldschmidt. Die Gesetze der Mineralass. von Standpunkt der Phasenlehre. Zs. anorg. Chem., 1911, LXXI, 313.
 J. Koenigsberger. Umwandlungen und chemische Reaktionen. N. Jb. Min., Geol. u. Paläont., 1911, BB. XXXII, 101.
 V. M. Goldschmidt. Ueber die Anwendung der Phasenlehre. Zbl. Min., Geol. u. Paläont., 1912, № 18.
 А. Е. Ферсман. К вопросу о генезисе минералов и их взаимных отношениях. Труды СПб. об-ва естествоиспыт., 1912, XLIII, вып. 1, 255.
 T. Wolff. Der Vulkanismus. Berlin, 1913, 1.
 А. Е. Ферсман. Соединения переменного состава в земной коре. Сборник в честь 25-летия научной деятельности В. И. Вернадского, М., 1914, 271.
 J. Koenigsberger. Paragenesis der Kieselsäuremineralien. Doelter's Handbuch der Mineralchemie, 1914, II (1), 27.

- K. Andrée. Ueber die Bedingungen der Gebirgsfaltung. Berlin, 1914.
 E. Leith and W. J. Mead. Metamorphic geology. New-York, 1915.
 F. Clarke. Data on geochemistry. Bull. U. S. Geol. Survey, 1916, № 616 (четвертое изд. 1920, № 695).
 F. Becke. Fortschritte im Gebiete der Metamorphose. Fortschr. Min., 1916, V, 210—264 (со списком литературы).
 Я. В. Самойлов. Palaeophysiology. [Палеофизиология.] Min. Mag., 1917, XVIII, 87.
 G. Berg. Zs. prakt. Geol., 1918, XXVI, 23.
 B. Brandt. Neuere Ansichten über den Aufbau der Erdrinde. Naturwissenschaft., 1920, 351.
 Я. В. Самойлов. Биолиты. Природа, 1921, № 1, 25.
 По вопросу о геологических циклах, помимо цитированной выше книги Лейта и Миа, см. особенно:
 W. Davis. Geograph. cycle. Geogr. J., 1899, XIV, 481.
 E. Haug. Le cycle des phénomènes géologiques. La science au XX siècle, 1903, 1, 343; 1904, 11, 17.

Глава VI

РАСПРОСТРАНЕНИЕ И РОЛЬ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Земная кора во всех своих оболочках составлена из 87 элементарных тел, распределение которых и составляет предмет изучения геохимии. Не имея возможности останавливаться в деталях на всех вопросах, относящихся к этой новой области знания, мы в дальнейшем вкратце дадим некоторые основные положения, в целях введения в понимание вопросов, освещаемых детальнее при изучении геохимии отдельных месторождений Европейской России. Нам придется остановиться, во-первых, на вопросе о количественном распространении отдельных элементов в земной коре и, во-вторых, на законах распределения этих элементов в разных оболочках и разных участках Земли. К первой части мы отнесем вопрос и о формах концентрации или рассеяния элементов¹.

Для удобства дальнейшего изложения я на следующей странице даю общую таблицу химических элементов по Менделееву, причем в каждой ячейке, кроме буквенного обозначения самого элемента, дан его атомный вес, среднее содержание в земной коре и порядковый номер, согласно данным физико-химической литературы 1921 г.

КОЛИЧЕСТВЕННОЕ РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ

Благодаря ценным работам, с новым освещением вопроса, В. И. Вернадского, а также трудам Кларка, Вашингтона, Ван-Хайза, норвежского минералога Фогта и др., средний состав доступной нашему исследованию земной коры, включая сюда и гидросферу и значительную часть атмосферы, вычислен с достаточной точностью и может быть передан как в весовых процентах, так и в процентах числа атомов (т. е. в объемных). Прилагаемые диаграммы (рис. 4 и 5) дают нам картину относительного распределения главнейших элементов, согласно обоим методам, причем для изучения

¹ Работы последних лет над природой химических элементов и ролью изотопов рисуют весь вопрос о распространении элементов в новом свете. Нет никакого сомнения, что эти идеи в приложениях к геохимии дадут много нового и поднимут ряд вопросов генетического характера. К сожалению, до настоящего времени у нас еще нет достаточно материала по этому вопросу. W. Bein. Das chemische Element. Berlin, 1920.

Таблица химических элементов¹

	0	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
1	—	1 H (4) 17,18	—	—	—	—	—	—	—
2	4 He (2) 10 ⁻⁶	6,9 Li (3) 0,02	9,1 Be (4) 0,01	11 B (5) 0,02	12 C (6) 0,58	14 N (7) 0,05	16 O (8) 53,81	19 F (9) 0,04	—
3	20,2 Ne (10) 10 ⁻⁸	23 Na (11) 1,80	24,3 Mg (12) 1,67	27,1 Al (13) 4,76	28,3 Si (14) 15,85	31 P (15) 0,06	32,1 S (16) 0,05	35,5 Cl (17) 0,1	—
4	39,9 Ar (18) 2·10 ⁻⁴	39,1 K (19) 1,04	40,1 Ca (20) 1,44	44,1 Sc (21) 10 ⁻⁷	48,1 Ti (22) 0,18	51,1 V (23) 3·10 ⁻³	52 Cr (24) 3·10 ⁻³	54,9 Mn (25) 0,03	55,9 Fe (26) 1,3 58,7 Co (27) 3·10 ⁻⁴ 58,7 Ni (28) 3·10 ⁻³
5	—	63,6 Cu (29) 1·10 ⁻⁵	65,4 Zn (30) 1·10 ⁻⁴	69,9 Ga (31) 10 ⁻⁷	72,5 Ge (32) 10 ⁻⁸	75 As (33) 1·10 ⁻⁶	79,2 Se (34) 40 ⁻⁶	79,9 Br (35) 2·10 ⁻³	—

Продолжение

	0	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
6	82,9 Kr (36) 10^{-1}	85,5 Rb (37) $2 \cdot 10^{-6}$	87,8 Sr (38) $2 \cdot 10^{-3}$	89 Y (39) $2 \cdot 10^{-4}$	90,6 Zr (40) $6 \cdot 10^{-3}$	93,5 Nb (41) $1 \cdot 10^{-6}$	96 Mo (42) 10^{-6}	?	104,7 102,3 106,7 Ru Rh Pd (44) (45) (46) $10^{-1} 10^{-1} 10^{-1}$
7	—	107,9 Ag (47) 10^{-7}	112,4 Cd (48) 10^{-6}	114,8 In (49) 10^{-7}	119 Sn (50) $7 \cdot 10^{-4}$	120,2 Sb (51) 10^{-6}	127,5 Te (52) 10^{-7}	126,9 J (53) $4 \cdot 10^{-5}$	—
8	130,2 Xe (54) 10^{-1}	132,8 Cs (55) 10^{-6}	137,4 Ba (56) $5 \cdot 10^{-3}$	139, — TR (57—72) 10^{-4}	172 Ta (73) $5 \cdot 10^{-5}$	181 Ta (74) $5 \cdot 10^{-5}$	184 W (75) $5 \cdot 10^{-5}$	?	190,9 193,1 195,2 Os Ir Pt (76) (77) (78) $10^{-1} 10^{-1} 10^{-1}$
9	—	197,2 Au (79) 10^{-7}	200 Hg (80) 10^{-7}	204 Tl (81) 10^{-7}	207,1 Pb (82) $4 \cdot 10^{-5}$	208 Bi (83) 10^{-7}	Po (84) 10^{-6}	?	—
10	222 Rn* (86) 10^{-1}	?	226,4 Ra (88) 10^{-1}	Ac (89)	232,15 Th (90) 10^{-6}	Pa (91)	238,2 U (92) 10^{-6}	—	—

* Цифры в скобках под названием элемента обозначают его порядковый номер по данным 1921 г. Сверху нанесены атомные веса, снизу — количества в земной коре, выраженные в объемных процентах, причем для количеств меньше 0,01 введены отрицательные степени. В величинах меньше 10^{-7} поставлена степень x , где x равно или больше 8.

* В настоящее время № 86 известен под названием радона (Rn). — Ред.

природных процессов я предпочитаю пользоваться второй диаграммой, дающей количественное распространение элемента независимо от его атомного веса.

Ниже приводятся данные о распространении 50 наиболее важных элементов земной коры, полученные вторым способом и расположенные в порядке уменьшения количества. Для вычисления этих цифр были взяты в основу цифры состава земной коры из сводки В. И. Вернадского (Опыт описательной минералогии, I, 1908—1914). Эти цифры были несколько

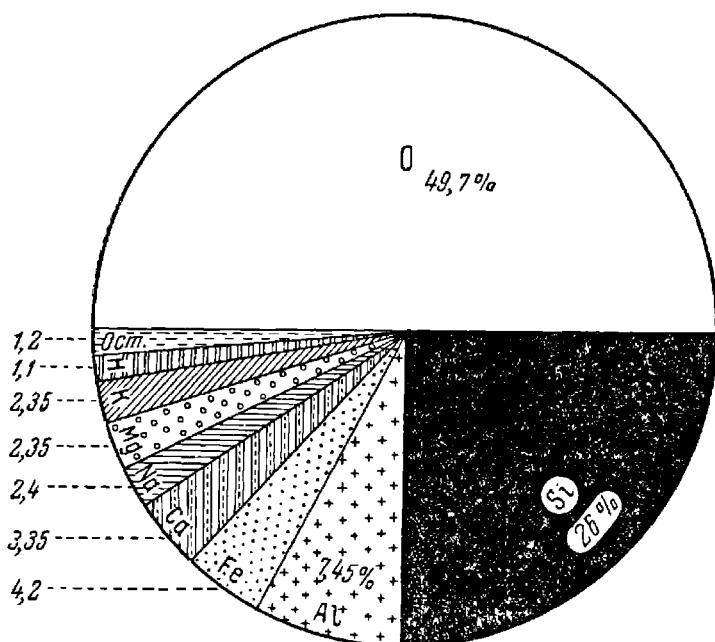


Рис. 4. Количественный состав земной коры в весовых процентах (по данным В. И. Вернадского 1908—1914 гг.).

видоизменены последующими работами Вашингтона и Кларка (1920), о чем подробнее сообщается ниже. Однако, ввиду спорности многих изменений, внесенных означенными американскими исследователями, я оставляю таблицу состава в атомных процентах в старом виде впредь до нового пересмотра всего вопроса.

Таблица 1

Кислород	53,81	Хлор	0,10
Водород	17,18	Фосфор	0,056
Кремний	15,85	Сера	0,054
Алюминий	4,76	Азот	0,049
Натрий	1,80	Фтор	0,036
Магний	1,67	Марганец	0,028
Кальций	1,44	Литий	0,025
Железо	1,30	Бор	0,017
Калий	1,04	Бериллий	0,009
Углерод	0,58	Цирконий	0,0057
Титан	0,18	Барий	0,0054

Ванадий	0,0034	Свинец	0,000042
Хром	0,0033	Рубидий	0,000020
Никель	0,0029	Иод	0,000014
Бром	0,0021	Медь	0,000013
Стронций	0,0019	Мышьяк	0,000011
Олово	0,00073	Молибден	0,000009
Кобальт	0,00029	Сурьма	0,000007
Иттрий	0,00019	Торий	0,000007
Аргон	0,00017	Неодимий	0,000006
Цинк	0,00013	Уран	0,000003
Церий	0,00012	Селен	0,000001
Лантан	0,00006	Теллур	0,0000006
Тантал	0,000048	Празеодимий	0,0000005
Вольфрам	0,000047	Таллий	0,0000004

В приведенной таблице набраны в разрядку элементы физиологического характера, т. е. играющие роль в современной биохимии. Повидимому, сюда же следовало бы отнести и марганец, фтор и алюминий. Иначе говоря, почти вся первая треть, кончая марганцем, должна быть отнесена к физиологическим элементам.

Как было указано выше, за последние годы американскими исследователями на основании нового аналитического материала все подсчеты среднего состава земной коры были проделаны наново, причем Вашингтон и Кларк пришли к ряду новых результатов.

Привожу прежде всего средний состав всех кристаллических пород по новейшим данным (1920).

Таблица 2

SiO ₂	59,09	H ₂ O	1,14	F	0,078
Al ₂ O ₃	15,35	TiO ₂	1,05	Cr ₂ O ₃	0,056
Fe ₂ O ₃	3,08	P ₂ O ₅	0,30	V ₂ O ₅	0,032
FeO	3,80	MnO	0,125	NiO	0,025
MgO	3,49	CO ₂	0,102	BaO	0,055
CaO	5,08	ZrO ₂	0,039	SrO	0,022
Na ₂ O	3,84	S	0,053	Li ₂ O	0,007
K ₂ O	3,13	Cl	0,056		

На основании этих данных Вашингтон дает следующий средний состав земной коры в весовых процентах, исключая, однако, элементы осадочных пород, гидросферы и атмосферы:

Таблица 3

O	46,43	Mn	0,096	Li	0,003	Hg	0,0000xx
Si	27,77	F	0,077	Cu	0,002	Sb	0,0000xx
Al	8,14	Cl	0,055	Ce и др.	0,001	Mo	0,0000xx
Fe	5,12	S	0,052	Be	0,00xx	Ag	0,00000xx
Ca	3,63	Ba	0,048	Co	0,00xx	W	0,00000xx
Na	2,85	Cr	0,037	B	0,000x	Bi	0,00000xx
K	2,60	Zr	0,028	Zn	0,000x	Se	0,000000xx
Mg	2,09	C	0,027	Pb	0,000xx	Au	0,000000xx
Ti	0,629	V	0,021	As	0,000xx	Br	0,000000xx
P	0,130	Ni	0,019	Cd	0,0000xx	Te	0,0000000xx
H	0,127	Sr	0,018	Sn	0,0000xx	Pt	0,0000000xx

Эту несколько искусственную таблицу можно пополнить указаниями, согласно Кларку, что если в состав земной коры включить осадочные породы, гидросферу и атмосферу, то мы получим лишь незначительное понижение большинства цифр, некоторые изменения для O (50,02), Si (25,8) Al (7,3), Cl (0,20), S (0,18) и включение азота с цифрой 0,03.

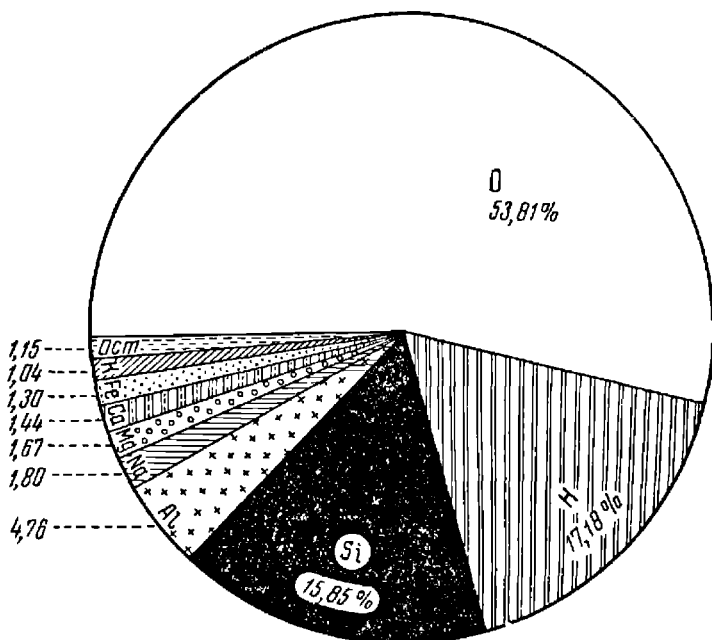


Рис. 5. Количественный состав земной коры в процентах числа атомов (в объемных отношениях) (по данным А. Е. Ферсмана 1912 г.).

Если мы сравним эти новые данные со старыми, принятыми в основу наших перечислений (стр. 52), то увидим изменение, главным образом, в следующем: повышено содержание Fe, Ti, F, Cr, V, Ni, Cu, As и Cd, причем первые три повышены не особенно сильно; с коэффициентом 2—3 повышены следующие три элемента: Cr, V, Ni; перешли в более высокую декаду As и Cd, но особенные изменения внесены в цифры меди, содержание которой возросло, по новым данным, в 100 раз. Наоборот, для других элементов цифры понижены: Mg, H, S, C, Li, B, Sn, W, Br. Для первых пяти это понижение не носит очень резкого характера, для последних четырех оно необычайно значительно.

Я не могу здесь входить в критический разбор этих изменений, но нельзя не указать, что проценты ряда металлов основных пород повышены и понижено содержание почти всей группы элементов биосферы и элементов кислых гранитных магм.

Есть данные, которые заставляют возражать против некоторых из этих цифр, подлежащих еще дальнейшей критической обработке, хотя для других, как, например, для меди, изменения совершенно справедливы.

Табл. 1 необыкновенно поучительна, так как показывает, что из 87 эле-

ментов природы первые 16 составляют более чем 99,9% всего состава, и что среди них на первые 4 приходится почти 92%.

Эти четыре элемента — O, H, Si, Al, как четыре стихии древности или как четыре кита, «на которых мир держится», составляют главную основу всей земной коры во всех ее зонах и глубинах.

Посмотрим далее на эту же таблицу. Среди первых 20 наиболее распространенных элементов мы не увидим ни одного тяжелого металла, и, кроме железа и марганца, атомный вес всех этих элементов ниже 50.

В первом приближении порядок этой таблицы следует повышению атомных весов. Интересен и ряд других выводов, которые можно сделать при рассмотрении этой таблицы.

Первый элемент — кислород, один из важнейших элементов земной поверхности, входящий в состав воздуха и обуславливающий жизнь на земле (атмосферу).

Первый и второй, вместе взятые, дают воду, т. е. основное вещество второй зоны — гидросферы.

Первые четыре элемента вместе представляют глину, т. е. один из обычных продуктов поверхностных зон разрушения (зоны гипергенеза).

Первые десять элементов дают нам представление о всей зоне катаморфизма и цементации.

Иначе говоря, в самых первых элементах нашей таблицы отражается вертикальная зональность геохимических процессов Земли, и по мере присоединения все новых и новых элементов мы последовательно с самой крайней зоны Земли — атмосферы — опускаемся в более глубокие зоны: сначала в гидросферу, потом в отдельные оболочки литосферы. К этим закономерностям ниже мне придется еще возвратиться при рассмотрении вопроса о распределении элементов в земной коре.

Есть еще одна сторона, на которую необходимо обратить внимание при анализе этой таблицы, — это ее несоответствие с вошедшими в наш обиход представлениями о редкости или обычности какого-либо элемента. Мы привыкли считать более или менее обычными такие элементы, как цинк или свинец, и совершенно игнорируем, считая их редкими, какой-либо титан, бериллий или иттрий. А между тем эти последние элементы во много раз более распространены, нежели первые: титан в 1000 раз более, чем цинк, и в 300 раз (по данным Вашингтона) более, чем медь. Даже редчайшего иттрия в полтора раза больше, чем цинка, а столь редкого и нужного для стали ванадия в 100 раз больше, чем свинца. Очевидно, что в этом различии в представлениях кроется какое-то

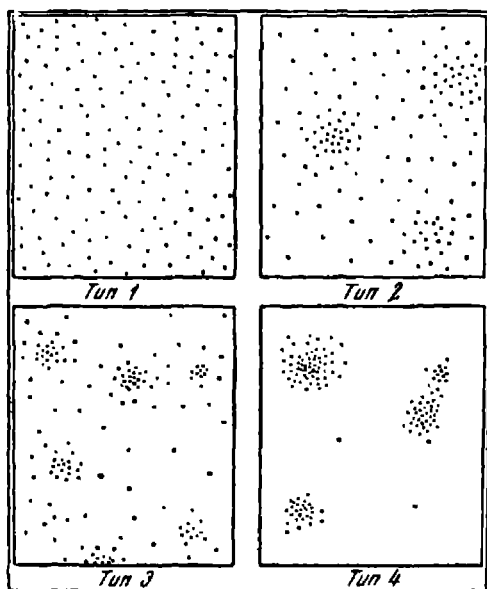


Рис. 6. Типы рассеяния 150 точек на одинаковой площади.

недоразумение, и на его выяснении мы должны остановить особое внимание, так как оно дает ключ к правильной оценке вышеприведенных цифр.

Среднее содержание элемента в земной коре есть лишь отвлеченное и суммированное представление о количественном распространении элемента. Но само по себе, с геохимической точки зрения, оно может заключать в себе разное содержание. Одна и та же средняя цифра получится и в случае равномерного распределения элемента по всей земной оболочке и в случае, если элемент в самой оболочке отсутствует, а в каком-либо одном месте сконцентрирован в большом количестве. Приведенный выше рис. 6 показывает четыре различных способа рассеяния тех же 150 точек на одинаковой площади, и это рассеяние, конечно, с геохимической точки зрения приводит к резко различным химическим результатам, хотя и выражается одинаковым средним числом.

Человек в своей промышленной и хозяйственной деятельности мало интересуется средними величинами; он использует только те скопления, в которых элемент накапливается в количествах выше средних, и эти скопления он называет месторождениями. Чем резче выражены эти месторождения, тем более доступны они для хозяйственной эксплуатации, и поэтому человечество построило свою культуру именно на использовании таких элементарных тел, кои по своим физико-химическим особенностям способны не столько к рассеянию, сколько к концентрации: свинец, цинк и олово вошли в обиход человеческого хозяйства не только по своим ценным качествам, но и потому, что они принадлежат к типу тех элементов, кои в природе легко образуют концентрированные скопления.

Действительно, с точки зрения рассеяния мы можем разделить все элементы на несколько групп: весьма рассеянных элементов, как то: лития, титана, циркония, иттрия; или весьма сконцентрированных, как то: меди, свинца, сурьмы, или, наконец, элементов промежуточного типа, например, стронция, бария, и т. д.¹

Изучение тех химических или физико-химических процессов, кои обуславливают явления рассеяния или концентрации, составляет одну из интереснейших и важнейших страниц геохимии, сближаясь непосредственно с задачами науки, изучающей полезные ископаемые и их месторождения.

ЗАКОНЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ В ЗЕМНОЙ КОРЕ

Нами было уже выше отмечено, что в самом количестве элементов, входящих в состав земной коры, наблюдается ряд закономерностей, которые заставляют видеть в них результат каких-то явлений, обуславливающих распределение элементов в земной коре.

К этому вопросу мы и перейдем, рассмотрев в известной последовательности:

- 1) совместное нахождение отдельных элементов,
- 2) совместное нахождение целых групп элементов (ассоциаций),
- 3) распределение отдельных элементов или их групп по различным частям земной коры или по различным эпохам.

1. Несомненно, что в основу наших представлений о совместном нахождении элементов в природе необходимо поставить точный эмпирический

¹ Вопросы рассеяния проанализированы В. И. Вернадским (см. Очерки геохимии, 1927, стр. 31, 52).— Позднейшее примечание автора.

материал по распространению каждого элемента в отдельности и по выяснению тех спутников, с которыми этот элемент обычно встречается в земной коре.

В этом направлении был уже давно накоплен обильный материал наблюдений, и, начиная с опытных данных фрейбергских рудокопов и Агриколы и копчая современными успехами горного дела, наметился целый ряд комбинаций элементов, вместе встречающихся в геохимических процессах. Эти закономерности совместного нахождения некоторых элементов уже вошли в обиход как самой науки, так и разведочной геологической деятельности, и такие сочетания, как Te и Au или Pb и Zn , Ag , являются настолько обычными, что их считают совершенно закономерным процессом, забывая, что этому сочетанию мы до сих пор не можем дать никакого рационального объяснения.

Причины, вызывающие совместное нахождение отдельных элементов, весьма многочисленны и далеко не исчерпываются только химической близостью самих элементарных тел.

В общем основными причинами, обуславливающими парагенезис элементов, надо признать:

1) Близость химических свойств элементов, обуславливающая образование одинаковых продуктов при геохимических реакциях земной коры. Такова, например, близость свойств редких земель, не только в лаборатории, но и в природе, редко отделяющей эти элементы друг от друга. Таковы также Nb и Ta , иногда Zr и Ti , Be и Al и т. д.

2) Второй важнейшей причиной, тесно связанной с первой, является способность данной группы элементов к изоморфному замещению: совместное нахождение в природе элементов одного и того же ряда Ретгера было во всей широте впервые подчеркнуто В. И. Вернадским; при близости ретгерсовских рядов к большинству вертикальных групп менделеевской таблицы (особенно выраженной в форме приложенной таблицы) мы наталкиваемся в природе на весьма частое совместное нахождение элементов одной и той же группы, например, K , Rb и Cs или Zn , Cd , или As , Sb и Bi и т. д.

3) Следующей причиной, согласно Фогту, приходится считать резкое различие в химических свойствах, обуславливающее образование прочных химических соединений, образующихся с большим выделением тепла; такова, например, связь S и Ba в BaSO_4 , K и O в K_2O и т. д.

4) Далее, причиной совместного нахождения элементов является генетическая связь некоторых из них, объединенных общностью происхождения при радиоактивном распаде; таково совместное нахождение He , Nt , Ra , U и радиосвинца, выраженное в определенной количественной зависимости этих элементов друг от друга, согласно уравнению радиоактивного равновесия.

5) Равным образом, в зоне биосферы, совместное нахождение ряда элементов объясняется их ролью в органическом веществе и их накоплением в связи с жизнедеятельностью растительных или животных организмов; такова обычная связь C , Fe , S , P в торфяниках, Ca с Si и O в раковинах моллюсков, P , Ca и F в костях и т. д.

6) Наконец, кроме всех этих случаев, мы имеем еще длинный ряд эмпирически найденных закономерностей, которые не укладываются в вышеприведенные рамки и до сих пор остаются необъясненными; таково, например, обычное сочетание Ag , Zn , Pb или же Ba и Mn , отчасти Th и U .

Из приведенных выше данных мы видим, что причины, обуславливающие распределение отдельных элементов в разных зонах земной коры,

весьма разнообразны и не укладываются в рамки каких-либо очевидных и простых химических закономерностей.

2. Несколько иначе складывается вопрос о распределении в земной коре целых групп химических элементов так, как он вырисовывается в современной геохимии. Суммируя весь материал наблюдений над распространением отдельных элементов, мы приходим к установлению нескольких больших групп, которые я буду называть типическими геохимическими ассоциациями.

Эти ассоциации были намечены еще в мемуаре Эли де Бомопа (Elie de Beaumont, 1847), но затем были осложнены огромным накопившимся в результате наблюдений материалом и только в самые последние годы вновь были совершенно самостоятельно выявлены трудами Фогта и де Лоне.

Эти ассоциации, на основании всего имеющегося у нас материала, отвечают четырем главным типам геохимических процессов, а именно: процессам биохимического характера, процессам магматического — кислого и основного характера и, наконец, процессам жильных эманаций (с серой). С геологической точки зрения эти ассоциации в схеме отвечают: первая — зоне биосферы; вторая — магматической зоне Sal, третья — такой же зоне Sima, причем часть ее элементов уже совершенно определенно говорит о зоне Nife. Все эти зоны пересекаются жилами с четвертой ассоциацией.

Типические ассоциации элементов

I. Поверхностные: H, C, N, O, отчасти благородные газы (Ne — Xe) ... 5 элементов.

II. Кислых магм: H, He, Li, Be, B, O, F, Na, Al, Si, K, (Ti), (Mn), Rb, Y, Zr, Nb, Mo, Sn, Cs, TR¹, Ta, W, (Au), Ra, Nt, Th, U ... 24 элемента.

III. а) Основных магм: C, O, Na, Mg, Al, Si, P, S, Cl, Ca, Mn, Br, J, Ba, Sr... 15 элементов.

б) Ультраосновных: Ti, V, Cr, Fe, Co, Ni, Ru — Pd, Os — Pt... 8 элементов.

IV. Жильные: S, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Se, Mo, Ag, Cd, In, Sn, Sb, Te, Au, Hg, Tl, Pb, Bi ... 22 элемента.

Несомненно, по отношению к целому ряду элементов возможны некоторые сомнения. Так, положение Ba и Sr совместно с другими элементами магмы выражено не очень определенно; не вполне ясно и положение Mn, все же встречающегося в основных породах в несколько больших количествах, чем в кислых.

Такой неопределенностью объясняется принадлежность ряда элементов к нескольким группам, причем очень разительной является двойственная природа Sn, идущая с двумя резко отличными геохимическими процессами, и отчасти Ti, разбивающегося между ультраосновными породами тихоокеанского типа и средними щелочными сиенитами атлантического.

Наконец, можно еще отметить постоянную и закономерную связь Zr с только что указанными щелочными сиенитами или же довольно обычную связь соединений Cu, As, Bi, Au с магмами определенно кислого типа.

Как ни многочисленны могут быть замечания² по поводу частных

¹ Знаком TR я условно обозначаю всю группу редких земель.

² Так, академик Вернадский считает благородные газы широко распространенными в земной коре, а Вг и J затрудняется связывать с основными магмами.

приведенной таблицы, но несомненно, что в первом приближении она наметает основные черты распределения элементов в земной коре.

Соотношение вышеприведенных четырех типических геохимических ассоциаций делается более очевидным, если мы отметим положение и характер каждого из элементарных тел на менделеевской таблице.

Для этой цели я помещаю ниже таблицу Менделеева (рис. 7) приблизительно в том виде, как она была дана ее автором в одном из первых мемуаров о периодических свойствах элементов, т. е. где соединены четные и нечетные ряды в длинные периоды.

Ряды	I	II	III	IV	V	VI	VII	0	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	Ряды
1	<u>H</u>	—	—	—	—	—	—	<u>He</u>	<u>Li</u>	<u>Be</u>	<u>B</u>	<u>C</u>	<u>N</u>	<u>O</u>	<u>F</u>	<u>Ne</u>	2
3	<u>(Na)</u>	<u>(Mg)</u>	<u>(Al)</u>	<u>(Si)</u>	<u>(P)</u>	~~(S)~~	<u>(Cl)</u>	Ar	<u>K</u>	<u>(Ca)</u>	~~Sc~~	<u>(Ti)</u>	<u>(V)</u>	<u>(Cr)</u>	<u>(Mn)</u>	~~(Fe)~~	4
5	~~Ba~~	~~La~~	~~Al~~	~~Si~~	~~P~~	~~S~~	<u>(Br)</u>	Kr	<u>Rb</u>	<u>(Sr)</u>	<u>Y</u>	<u>Zr</u>	<u>Nb</u>	~~Mo~~	?	~~(Lu)~~	6
7	~~Ag~~	~~La~~	~~Al~~	~~Si~~	~~P~~	~~S~~	<u>(J)</u>	Xe	<u>Cs</u>	<u>(Ba)</u>	<u>TR</u>		<u>Ta</u>	<u>W</u>	?	~~(Lu)~~	8
9	~~Ba~~	~~La~~	~~Al~~	~~Si~~	~~P~~	<u>Po</u>	?	<u>Nt</u>	?	<u>Ra</u>	Ac	<u>Th</u>	?	<u>U</u>	—	—	10

Рис. 7. Таблица химических элементов земной коры.

Элементы Земли расположены в порядке менделеевской таблицы, причем все редкие земли объединены в двух клетках под буквами TR (среди них один элемент неизвестен). Элементы в кружках связаны, главным образом, с породами средней кислотности; в двойных кружках — с породами ультраосновного характера; элементы подчеркнутые — кислых магм; элементы перечеркнутые — жильных процессов. Место вопросительного знака под Ta в настоящее время занято элементом протоактиний, со значком Pa, который, как связанный с кислыми магмами, должен был бы быть в таблице подчеркнут.

В основу таблицы я беру последние известные мне данные о природе элементов и их взаимных отношениях. В моей таблице в горизонтальном ряду 1—2 расположены элементы порядковых номеров 1—10; в рядах 3—4 порядковые номера 11—28; в рядах 5—6 — порядковые номера 29—46; в рядах 7—8 порядковые номера 47—78, причем на долю редких земель приходятся номера 57—72; наконец, в последних рядах порядковые номера 79—92, оканчивающиеся ураном. Неизвестными считаются пять элементов с порядковыми номерами 43, 75, 85, 87 и один из группы редких земель. Значительное число элементарных ячеек включает в себя серию изотопов.

В таком виде эта таблица дается мною, причем в ней элементы, относящиеся к первой группе (см. стр. 58), не отмечены ничем, ко второй — подчеркнуты, к четвертой — перечеркнуты, а к третьей — окружены кружком, причем двойной кружок включает элементы ультраосновных магм.

Анализ полученного в таблице распределения элементов весьма характерен и позволяет наметить ряд закономерностей, которые до сих пор не подмечались при изучении этих явлений и которые лишь вскользь в неясной форме подметил Карнелли в 1884 г. или, частью одновременно со мной, были высказаны совершенно независимо Гаркинсом (Harkins, 1917) и Кларком (Clarke, 1920¹).

Вся таблица разбита мною жирными линиями на три больших поля, которые я условно называю полями: о б ы ч н ы м (верхнее), ж и л ь н ы м (нижнее левое) и к и с л ы м (нижнее правое).

¹ См. список литературы к главе пятой. — *Ред.*

Каждое из этих наименований основывается на следующих соображениях.

Обычное поле, кончающееся никелем, кобальтом и железом, характеризуется тремя типами элементов, начинаясь с элементов кислого типа совместно с биохимическими, после Na переходит к элементам по преимуществу зоны Sima, а начиная с Ti — к элементам переходных областей зоны Sima и Nife.

В это поле входит почти исключительно очень распространенные элементы, и, если исключить благородные газы и скандий, то только для Со среднее содержание будет ниже $3 \cdot 10^{-3}$. Наоборот, среди элементов, не принадлежащих к этому полю, мы находим только Br, Sr и Ba, которые несколько сближаются количественно с содержанием кобальта; все остальные встречаются во много раз меньших количествах.

Этим положением вполне оправдывается наименование этого поля обычным.

Очень любопытным является то, что подавляющее большинство элементов типа средних и основных пород принадлежит как раз к обычному полю и, таким образом, как общее правило, может быть принято, что элементы зоны Sima с переходом в Nife (а не Sal) отвечают ближе всего картине распространенности элементов в земной коре.

Два нижних поля резко противоположны друг другу, состоя одинаково из элементов, играющих малую роль в геохимических процессах Земли; они отличаются тем, что левое — состоит из металлов резко выраженного электроположительного характера, образующих устойчивые соединения с серой, а правое — из металлов кислотного характера, не образующих соединений с серой (или образующих, по редко) и устойчивых в форме кислородных соединений. Теплота соединений является максимальной для первых — с серой, для вторых — с кислородом.

Только сравнительно немногие элементы в каждом из этих полей нарушают эти типичные свойства, что особенно характерно для VII и VIII групп. В общем, однако, исключений немного.

Левое поле отвечает тем химическим элементам, которые мы знаем в земной коре в виде сернистых соединений, обычно приуроченных к жильным процессам, дислокациям, выделениям сернистых фумарол и т. д. Связь этих элементов с определенным типом магм не может быть намечена; скорее, они носят безразличный характер, хотя одни из них, например, Au, As, Bi, Sn, Cu, более обычны для кислых пород, другие, как Ag, Pb, Zn, — для пород средней кислотности. В общем, однако, несмотря на большую растворимость сернистых соединений в магмах основного типа, мы должны, согласно де Лоне, скорее связывать всю эту группу химических элементов с кислыми или средними породами, чем с глубинно-основными.

Не менее замкнутую группу составляют элементы правого кислого поля. За немногими исключениями, перед нами типичные элементы кислых щелочноземельных гранитных магм. Подчеркнутые элементы всей правой половины нашей таблицы дают нам типичную картину гранитных пегматитов, и это поле еще более характерно обнимает собою элементы одного и того же парагенетического ряда.

Таким образом, при рассмотрении менделеевской таблицы мы устанавливаем известную закономерность распределения в ней четырех (или пяти, если выделить ультраосновную) групп элементов, т. е. тех типичских геохимических ассоциаций, которые мы установили на основании суммирования отдельных наблюдений и анализа минеральных ассоциаций в породах различной кислотности.

ОБЩИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ В ЗЕМНОЙ КОРЕ

Как указано было при анализе совместного нахождения отдельных элементов, причины, обуславливающие эти явления, весьма многочисленны и разнообразны; однако ни одна из них в частности, ни все вместе не могут дать рационального объяснения. В литературе мы находим ряд разнообразных точек зрения, пытающихся пролить свет на этот вопрос большого геохимического значения. Одни, как Эли де Бомон, связывали совместное нахождение элементов с электрическими токами земного поля, другие, как Фогт, — с дифференциацией магмы, согласно законам физической химии, третьи, как де Лоне, высказывали даже предположение о связи, основанной на генезисе и превращении элементов.

Несомненно, однако, что ни одно из этих предположений не может быть обосновано фактическими данными; распределение элементов в основе своей базируется, повидимому, на более глубоких причинах первичного распределения их в земном шаре, и роль всех физико-химических факторов теплового и физико-химического режима земной коры заключается лишь в перегруппировке и усложнении, может быть, более простых первичных схем.

Положив, таким образом, в основу геохимического распределения элементов явления, выходящие за рамки точного анализа наблюдаемых фактов, мы, тем не менее, не можем не отметить, что такой взгляд уже проник в современную научную мысль под влиянием обобщений Зюсса. Схема $Sal-Sima-Nife$, как схема трех батиметрических оболочек земного шара, является уже общепризнанной, и взгляды де Лоне лишь развивают и дополняют ее частности, а Вихерт распространяет ее на более глубокие слои земной коры¹.

Настоящие идеи и наблюдения как будто вносят некоторую поправку в установившуюся, хотя еще и не доказанную схему: приурочивание к поверхности элементов малых атомных весов (или, вернее, малых удельных весов), повидимому, ограничивается лишь нашим обычным полем менделеевской таблицы. В пределах этого поля, в грубых чертах схемы де Лоне, мы действительно видим последовательность более легких элементов в зоне Sal (Na, Al, H, Li, Be), более тяжелых в зоне $Sima$ (Al, Si, Mg, Ca, Ti) и, наконец, еще более тяжелых в зоне $Nife$ (Cr, V, Ti, Fe, Co, Ni). Но на этом схема обрывается: дальше следуют элементы, в которых никакой зависимости в духе этого закона нет, и даже наоборот, — далее следуют элементы именно более поверхностных зон Sal и более поверхностных жильных эманаций с тяжелыми металлами. Все кислое поле, связанное в своей геологической истории с зоной Sal , абсолютно противоречит основному закону концентрирования элементов от центра к периферии в порядке понижения их атомных или удельных весов. Этим наносится определенный удар распространенному толкованию той схемы распределения элементов, которая устанавливается фактами для первых двух больших рядов таблицы, резко отличных в своей геохимической истории от всех остальных.

Поразительное подтверждение этому мы имеем в распространении элементов в метеоритах; если мы, согласно данным Валя, аналогично земным процессам, составим естественную ассоциацию элементов космических тел, то получим такую картину: из 20 распространенных элементов 19 займут место в поле обычном и только один (Cu) — в поле жильных

¹ Новые более поздние взгляды позволяют еще расширить наши представления и включить еще одну сульфидную зону. — *Позднейшее примечание автора.*

образований; наоборот — из 25 элементов, обнаруженных только спектроскопом или в виде следов, только четыре займут место в обычном поле, а остальные разобьются почти поровну между нижними полями: девять — в поле жильном и одиннадцать — в поле кислом.

Естественная ассоциация элементов в метеоритах
(по Валу)

H	—	—	—	—	—	—	He	Li	.	.	C	N	O	.	—	—	.
Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	Ar	K	Ca	.	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni
Cu	Zn	Ga	.	As	.	.	.	.	Sr	Y	.	.	Mo	?	.	.	.
.	.	.	Sn	Sb	.	J	.	Rb	Ba	.	TR	.	W	?	Os	Ir	Pt
Au	.	.	Pb	Bi	.	?	.	?	.	.	.	.	.	.	U		

Примечание. Жирным шрифтом набраны элементы, играющие роль в составе метеоритов, корпусом — те, которые обнаружены в виде ничтожных следов или только спектроскопически. По последней сводке Меррилла (1919 г.) известны следы V, Pd, Ru, Ir и совершенно отсутствуют барий, стронций и цирконий.

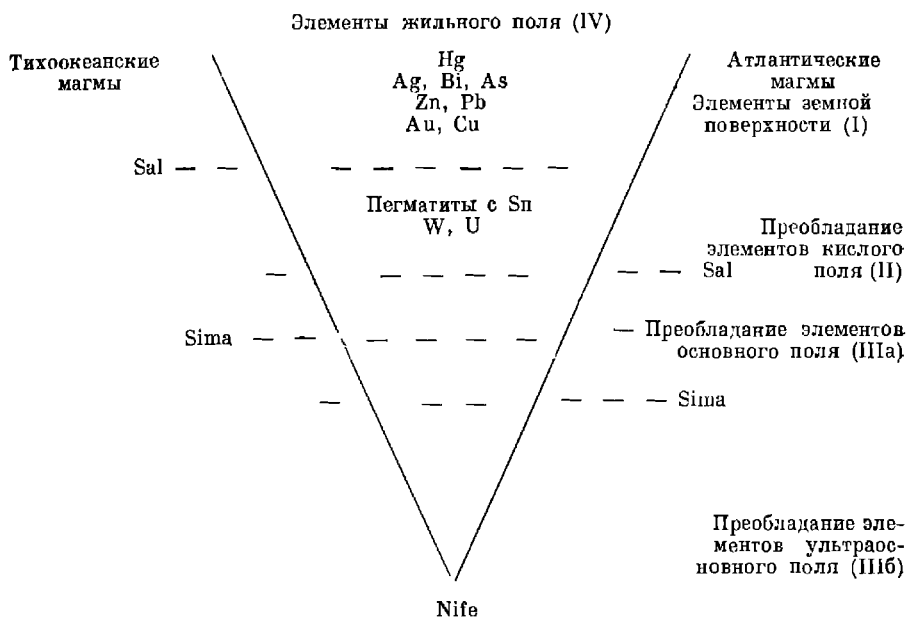
Иначе говоря, анализ распространения элементов показывает нам, что качественного различия между геохимическими ассоциациями теллурических и наземных процессов нет, что различие между ними только количественное и что наиболее важные элементы Земли являются одновременно и важнейшими элементами тех космических образований, кои положили начало метеоритам.

Из сказанного выше мы приходим к выводам, что в основе современного распределения элементов в земной коре лежит первичная¹ неравномерность их распределения по отдельным оболочкам земной коры, причем закономерность этого распределения наблюдается лишь для обычного поля нашей таблицы; для элементов более тяжелых, чем Fe, Co, Ni, Cu, нет никаких оснований предполагать их более глубинное происхождение, и наоборот, наблюдения заставляют относить их к более поверхностным зонам земной коры.

Таким образом, на основании современных данных мы можем нарисовать приближенную схему распределения элементов с глубиной, принимая во внимание отличие тихоокеанских и атлантических магм (см. стр. 63).

Во в р е м е н и эта схема намечает изменение закономерного характера и притом в нескольких направлениях: в первые геологические эпохи преобладали тихоокеанские магмы и в значительной степени магмы Sal; в виде древних гранитов и гранитогнейсов они нам хорошо известны. Из жильных процессов, как можно думать, благодаря эрозии верхних частей древних образований, сохранились только более глубокие части, чем и объясняется обилие в них элементов гранитно-пегматитового типа, золота и меди.

¹ Под «первичною» я условно подразумеваю те явления, которые лежат в н с области точного геологического исследования.



По мере хода геологической истории процессы перемещались слева направо; в новейшее время магмы атлантики стали преобладать (более глубокие), в других местах эрозия обнажила более глубокие зоны Nife ранее застывших массивов, а жильные процессы третичной эпохи принесли с собой металлы вышележащих зон жильного поля с Zn, Pb и т. д. Такова та схема, которая, согласно с наблюдениями, в основных чертах объясняет главные черты геологических особенностей земной коры.

Таким образом, на основании вышеприведенных соображений, мы считаем, что в современном распределении элементов в земной коре еще сохранились черты первичных форм распределения материи при образовании космического тела нашей планеты. Это первичное распределение видоизменялось в течение дальнейшей геологической истории Земли, с одной стороны, вследствие геохимических и магматических процессов, вносящих усложнение в вероятно сравнительно простую схему первичного распределения, с другой стороны, вследствие некоторого обмена веществ между нашей планетой и другими космическими телами. Этот обмен заключался, с одной стороны, в потере Землей атомов гелия и водорода, отдельные быстродвигающиеся частицы которых, согласно кинетической теории газов, могли преодолеть земное тяготение, с другой — вследствие постоянного прироста Земли под влиянием падения метеоритов и космической пыли.

Несмотря на все усложнения в химической схеме строения земного шара, мы различаем нижеследующие зоны с преобладанием некоторых элементов:

атмосфера — O, N

гидросфера — H, O, Na, Cl, отчасти S

литосфера — земная поверхность: O, II, Si, Al, C . . . Sal

более глубокие зоны: O, Si, Al, C, Ca, Mg, K, Na . . . Sima

глубинные зоны: O, Si, Fe, Cr, Ni, Cu, . . . Nife

СВЯЗЬ ОПРЕДЕЛЕННЫХ АССОЦИАЦИЙ С УЧАСТКАМИ ЗЕМНОЙ КОРЫ

Работы последнего времени наметили известные закономерности распределения элементов с глубиной, т. е. установили связь естественных ассоциаций элементов с геохимическими зонами Ван-Хайза — Лукашевича. Теперь попытаемся пойти в этом анализе дальше и посмотреть, не локализируются ли наши ассоциации еще иным способом и нельзя ли установить некоторую связь между этими ассоциациями и определенными участками земной коры или определяемыми геологическими эпохами.

Распределение химических элементов в отдельных областях является результатом химических и физических процессов, идущих в земной коре на разных ее глубинах, и поэтому зависит непосредственно от тех геологических явлений, которые наблюдались в данной области в течение всей ее геологической истории. Ввиду этого в земной коре могут быть намечены отдельные самостоятельные районы, обнимающие области распространения каких-либо крупных геологических факторов и объединяющие совокупность физико-химических процессов как результат первых.

Таковыми областями можно намечать, например, в Европейской России район Крымских мезозойских хребтов, область осадочных отложений Центральной России, Фенноскандинавский щит, хребет Уральский и т. д. Каждая из этих областей земной поверхности характеризуется комплексом химических элементов, играющих в ней роль и обладающих большей или меньшей в ней распространенностью. Совокупность химических элементов, встречающихся в таких геологически обособленных областях земной коры, я буду называть естественной геохимической ассоциацией; сравнение же таких естественных ассоциаций с типическими и установление сходства или различия между ними и составляет одну из наших задач геохимического исследования земной коры¹.

Изучая таким образом геохимические ассоциации элементов, свойственные определенным районам, я убедился, что такая ассоциация в значительной степени охарактеризовывает каждый данный район, являясь конечным выражением — результатом геохимических и физических процессов, которые шли или идут в данной области. Сравнение же этих естественных ассоциаций с типическими позволяет установить ряд таких характерных для данного района черт, которые, позволяя, с одной стороны, отнести его к одной из вышеперечисленных типических ассоциаций, с другой — намечают ряд отличий или отклонений, составляющих типические черты данной области.

Таким образом, первая задача, вытекающая из вышеприведенного метода изучения геохимических особенностей земной коры, приводит нас к возможности, путем сравнения типических и естественных ассоциаций, охарактеризовывать отдельные районы.

В дальнейшем я дам для всех отдельных областей такие геохимические ассоциации, как, например, для Крыма, гранитных пород Урала, Донецкого бассейна и связанных с ним герцинских процессов и каменноугольных отложений Центральной России и т. д. Помимо общей диаграммы, построенной по типу таблицы, приведенной выше (рис. 7), в каждом случае мною дается отношение числа элементов, входящих в каждую из четырех групп, приведенных на стр. 58.

¹ Надо иметь в виду, что при дальнейшем спектроскопическом исследовании минералов и расширении исследования названных В. И. Вербадским микрокосмических смесей наши сведения о распространении элементов сильно расширятся.

Нет никакого сомнения, что при этом способе графического изображения ассоциаций более резкие отличия создаются в областях кристаллических пород и сильно сглаживается распределение элементов в сериях пород осадочных. Для первых такая характеристика, в противоположность чисто петрографическому подходу, учитывает всю совокупность химических элементов, принесенных с собой магматическим процессом, а не только ту часть их, которая сохранилась в составе твердой горной породы. Благодаря этому получается более правильное освещение химической природы отдельных магм и дается возможность более полного подхода к их различению с геохимической точки зрения, чем это дается, например, современной чисто петрографической характеристикой. Только анализ пород атлантической и тихоокеанской магм¹ впервые позволил несколько подойти к этому вопросу с точки зрения относительного распространения химических элементов, но, к сожалению, ни Бекке, ни его последователи не довели своего положения до конца, ограничиваясь лишь анализом главных химических элементов. Разным образом такой подход дает и несколько более широкое толкование термину Спарра «металлогенические провинция»².

Установление этих естественных ассоциаций и связь их с геологической историей области определяют установление некоторой зависимости между химическими и физическими явлениями в земной коре. Так, группировки элементов IV поля несомненно связываются с процессами дислокационного характера (жил герцинской системы), складчатые образования без дизъюнктивных дислокаций связываются обычно лишь с перегруппировкой элементов обычного поля и то только в его первых двух третях (альпийские жилы). Вместе с тем мы наблюдаем приуроченность некоторых геохимических ассоциаций к определенным геологическим эпохам, чем намечается лишь дальнейшее развитие идей Линдгрена о металлогенических эпохах.

На основании сказанного мы признаем, что для анализа геохимических особенностей и определения геохимических областей представляется весьма удобным устанавливать совокупность химических элементов данного района и путем сравнения полученных данных с менделеевской таблицей выяснять характерные ее черты.

Этот метод представляет несомненные удобства для областей со сложной минерализацией и сложной геологической историей; к меньшего значения выводам приводит он при анализе комплекса осадочных пород, хотя и здесь намечается ряд любопытных закономерностей.

Таким образом, мы считаем необходимым заменить понятие о металлогенических или петрографических провинциях новым, более правильным понятием об «элементогенетических провинциях», широко обнимающим и то и другое понятие, а с точки зрения возраста связать эти же геохимические ассоциации с особыми элементогенетическими эпохами.

Главнейшая литература

- Elie de Beaumont. Note sur les émanations volcaniques et métallifères. Bull. Soc. géol. France, 1847, IV, 1249—1334.
A. Breithaupt. Die Paragenesis der Mineralien. Freiberg, 1849.

¹ Вопрос о полной обособленности этих двух магм опровергается геохимическим их исследованием, не дающим пока оснований допускать вполне резкое химическое различие между ними.

² См. в списке литературы статью Ф. Ю. Левинсона-Лессинга (1915).

- H. Saint-Claire-Deville. Mémoire sur les émanations volcaniques. C. R. Acad. Sci., Paris, 1856, XLIII, 955.
- E. Dana. Earths contract. Am. J. Sci., 1873, III (V), 423; VI, 6—14.
- T. Carnelleу. Ber. Dtsch. chem. Ges., 1884, XVII, 2287—2291. (Связь геохимии с мейделеевской таблицей).
- W. Crookes. Genesis of the elements. London, 1887.
- L. Bombicci. Sulla compos. fisico del globo terrestre. Atti Reale Accad. Sci. Ist. Bologna, 1887, VIII.
- J. Vogt. Zs. prakt. Geol., 1906, 217; 1899, 274; 1898, 420; 1899, 10; 1894, 382, 458; 1895, 145, 367, 444, 465; 1898, 271; 1901, 327.
- E. Wiechert. Ueber die Massenvertheilung im Innern der Erde. Nachr. wiss. Ges. Göttingen, 1897, 221—243.
- Sv. Arrhenius. Geol. Fören., 1900, XXII, 395, особенно 418. (Zur Physik des Vulkanismus).
- I. N. Lockyer. Inorganic evolution. London, 1900.
- G. Тамман. Krystallisieren und Schmelzen. 1903.
- F. Becke. Tscherm. Min. Petr. Mitt., 1903, XXII, 209—250.
- Daly. Bull. U. S. Geol. Survey, 1903, 209, p. 110. (Единая в глубине магма).
- G. T. Prior. Min. Mag., 1903, 61, 228. (Два типа магм).
- R. Dölkesskamр. Ueber Konzentrationsprocesse... Zs. prakt. Geol., 1904, 289.
- Ch. R. Van Hise. Treatise on metamorphism. Monogr. U. S. Geol. Survey, 1904, XLVII, 932.
- G. Steinmann. Ber. naturforsch. Ges. Freib., 1905, XVI, 50. (Роль глубоких осадков при горообразовании).
- L. De Launay. La science géologique. Paris, 1905, 627.
- R. Daly. Am. J. Sci., 1906, XXII, 195—216.
- H. Thiene. Temperatur und Zustand des Erdinnern. Jena, 1907.
- C. K. Leith. The metamorphic cycle. J. Geol., 1907, XV, 303—313.
- W. Y. Mead. Redistribution of elements. J. Geol., 1907, XV, 238—256.
- J. E. Spurr. Theory of ore deposits. Econ. Geol., 1907, II, 780. (Металлогенетические провинции).
- E. Suess. Sb. Wien. Akad., 1907, Abt. 1, 117, 1555.
- T. Wolff. Die vulkanische Kraft und die radioactiven Vorgänge. Zs. Dtsch. geol. Ges., 1908, LX, 431—465.
- J. Vogt. Physikalisch-chemische Gesetze der Krystallisationsfolge. Tscherm. Min. Petr. Mitt., 1908, XXVII, 105.
- F. Clarke. Data on geochemistry. 1908, Bull. U. S. Geol. Survey (пятое издание 1924).
- A. Bergéat. Stoffliche Inhomogenität des Magmas. Mitteilungen Geogr. Ges. München, III, 2, 1908.
- A. Harker. Natural history of igneous rocks. London, 1909, 23.
- F. Beyerschlag, P. Krush, V. Vogt. Die Lagerstätten der nutzbaren Mineralien und Gesteine. Stuttgart, 1909, I, 1, 149.
- W. Lindgren. Metallogenic epochs. Econ. Geol., 1909, IV, 409.
- В. И. Вернадский. Парагенезис химических элементов в земной коре. Труды XII Съезда естествоиспытателей, Москва, 1909.
- R. Daly. Origin of the alc. rocks. Bull. Geol. Soc. Am., 1910, XXI, 37—118.
- W. Wahl. Zs. anorg. Chem., 1911, 69, S. 52—96 (Состав метеоритов и Земли).
- V. M. Goldschmidt. Kontaktmetamorphismus im Kristianiagebiet. Krist., 1911.
- A. Wegener. Geologische Rundschau, 1912, III, 276—292.
- A. Е. Ферсман. Очерки по геохимии. Природа, 1912, 866. Его же: Геохимия и рудное дело. Уральский Техник, 1913, декабрь.
- T. Wolff. Der Vulkanismus. Berlin, 1913, I.
- L. De Launay. Les gîtes métallifères. 1913, I, 1—34, 241—288.
- E. Leitha. W. Y. Mead. Metamorphic geology. New York, 1915.
- Ф. Левинсон-Лессинг. Известия Политехнического ин-та, Петроград, 1915, XXIII, 459. (Дифференциация магм).
- W. Harkins. J. Am. Chem. Soc., 1917, XXXIX, 856.
- Р. Дели. Магматические горные породы (пер. Герасимова). Москва, 1920, II, 7.
- H. Washington. The chemistry of the earth's crust. J. Frankl. Inst., 1920, 190, 757.
- P. Niggli. Das Magma und seine Produkte. Naturwissenschaft., 1921, 9, 463.
- L. Cober. Bau der Erde. Berlin, 1921.

Глава VII

ГЕОХИМИЯ ОТДЕЛЬНЫХ ОБЛАСТЕЙ

Как указано было в первой главе, третьей задачей минералогического и геохимического описания всякой области является исследование распространения и роли отдельных химических элементов в ней. В этом направлении исследование должно опираться на детальные химические и спектроскопические данные и поэтому требует большой и детальной изученности всех химических соединений и процессов, наблюдающихся в данной области. Основные вопросы, которые могут быть поставлены при таком исследовании, следующие:

1. Учет всех встречаемых в области химических элементов.
2. Качественная и количественная оценка распространения, относительной роли и формы концентрации каждого из них.
3. Установление связи между отдельными химическими элементами:
 - » между элементами и горными породами определенных петрографических типов;
 - » между элементами и районами их распространения (элементогенетические провинции);
 - » между элементами и определенными геологическими эпохами (элементогенетические эпохи).
4. Роль отдельных элементов, характер их распространения, история миграции и связь с геологической историей края.
5. Роль элементов в промышленности человека и влияние этой промышленности на геохимию области.

Для правильного и полного обоснования геохимии каждой отдельной области необходимо применение к изучению данной местности всех тех идей, кои были высказаны мною выше в предыдущей главе. Вместе с тем для этой же цели должен быть принят во внимание тот графический метод изображения естественных ассоциаций, который связывает их с периодической системой элементов.

1. Учет всех элементов является одной из самых интересных задач геохимии и дает картину естественной ассоциации элементов в данной области. Нет никакого сомнения, что такая ассоциация тем более генетически однородна, чем однороднее по своей геологической истории изучаемая область. Так, например, ассоциация химических элементов всего Крымского полуострова не дает еще стройной и цельной картины, тогда как ассоциация элементов горной области Крыма или даже ассоциация только изверженных пород его дает такую группировку, которая может, путем сравнения с другими областями, дать ключ к разрешению ряда интереснейших геохимических проблем.

Для районов с простым геологическим прошлым, однородных по петрографическому составу пород или по типу геологических процессов (например, чисто пустынный тип), — число элементов, принимающих участие в химических процессах, в общем не велико.

Наоборот для районов, очень сложных по своему строению и своей истории, например для Уральской цепи, мы получаем почти всю менделеевскую таблицу, за немногими исключениями. Очевидно, однако, что такого рода различие в значительной степени обусловливается тем, что мы в наших таблицах учитываем лишь присутствие элемента, не касаясь его количественной стороны; а между тем указание на присутствие того или иного элемента зависит от методов его определения, и нет сомнения, что с уточнением спектроскопических и электрооптических методов ис-

следования в любой части земной коры можно будет обнаружить подавляющее количество всех элементарных тел. Но при современном уровне наших знаний мы условно ограничиваемся лишь теми элементами, кои обнаружены или могут быть обнаружены химическим способом, и только в скобках помещаем элементы, найденные спектроскопически.

Размещая элементы по клеткам таблицы Менделеева и пропуская неизвестные в данном районе, мы получаем графическое изображение естественной ассоциации элементов в данной области, очень характерное и позволяющее резко различать отдельные ассоциации.

Сравнивая эти ассоциации с типической (см. рис. 7), мы устанавливаем те геохимические особенности, которые характеризуют данную область в отличие от соседних, или, наоборот, те характерные черты, которые общие различным районам (например, Карпатам и Крыму) и т. д.

Таким образом, менделеевская диаграмма с разнесением по клеткам наблюдавшейся ассоциации элементов уже сама по себе достаточно может дать ряд ценных выводов, и она будет тем более характерной, если в ней, хотя бы в самой грубой форме, выразить и некоторые количественные соотношения (например, различая более или менее важные элементы типом прифита). Особая ценность ее заключается в наглядности выявления вопросов: преобладание в данной области элементов с низкими или высокими атомными весами (т. е. перх или пиз диаграммы), преобладание элементов щелочных или кислотных (левая или правая половина), накопец, преобладание некоторых вертикальных групп, т. е. определенных изоморфных рядов. Все эти вопросы, имеющие большое значение для оценки геохимических особенностей каждого района, вырисовываются в большинстве таблиц с большой ясностью. Однако практически пользование этим методом нередко представляет большие затруднения, благодаря трудности определения роли каждого элемента, в особенности если принять во внимание вопрос о типе концентрации или рассеяния элементов. Как отмечено было выше на стр. 56, тип рассеяния играет в каждом районе не меньшую роль, чем среднее количественное распространение элемента. Характер рассеяния должен быть учитываем с особым вниманием, но тем не менее не может быть с достаточной точностью выражен в наших таблицах; так, например, какой-либо элемент может быть рассеян в количестве менее 0,01 %, что могло бы заставить нас не включать его в таблицу элементов, тогда как в других условиях те же количества этого элемента могли бы быть сконцентрированы в виде совершенно определенного месторождения, которое, конечно, было бы при учете принято во внимание.

Все это показывает, что принятый нами метод геохимического сравнения отдельных районов страдает рядом недостатков и имеет лишь относительное значение в качестве только первого приближения в выяснении сложного природного процесса.

Особенно это касается принятого мной ниже разделения элементов на два типа, более или менее важных. Отсутствие для суждения о значении какого-либо элемента строго определенного критерия делает это деление весьма схематичным.

2. Еще труднее подойти ко второй задаче — качественной или количественной оценке относительной роли химических элементов в данной области. В принципе казалось бы правильным принять за норму средний состав всей земной коры; в этом случае всякое изменение этого состава в ту или иную сторону могло бы выражать

специфические отклонения в геохимической характеристике каждой области и было бы, конечно, возможно при глубоком химическом и притом количественном учете всех минеральных групп данной области. Однако, на деле таких данных мы не имеем и, вероятно, скоро иметь не будем, и поэтому приходится прибегать к косвенным, весьма несовершенным приемам для того, чтобы показать не столько абсолютное, сколько относительное преобладание одного элемента или по сравнению с другим, или же по сравнению с этим же элементом, но в других ассоциациях.

Элементы, предполагаемые в данном районе, но не доказанные, отмечаются в моих диаграммах мелким шрифтом с вопросительным знаком; элементы, обнаруженные лишь спектроскопически, поставлены в скобки; элементы, для которых мы в условиях данной области никаких особенностей, выделяющих их из условий обычного распространения, не наблюдаем, — набраны мелким шрифтом; все элементы, играющие существенную роль или количественно, или качественно — крупным шрифтом; подчеркнуты элементы, скопления коих достигают особых размеров, минералогически или даже практически заслуживающих внимания.

3. Третий цикл вопросов связан с изучением явлений совместного нахождения отдельных элементов и их связи с определенными геологическими явлениями и эпохами.

Детальное выяснение законов совместного нахождения должно быть проведено в тесной связи с выяснением генетических типов и установлением роли отдельных элементов в определенных геологических процессах области.

Из этой первой стороны совместного нахождения элементов вытекает и установление связи ассоциации элементов с определенными типами горных пород. Уже на стр. 58 нами была дана грубая схема такой наиболее типичной связи химических элементов с типами магм, и поэтому в пределах каждого описываемого района является весьма интересной и благодарной задачей глубже вникнуть в эту зависимость. Так, например, для Урала установление связи частных ассоциаций элементов с гранитами, мигмитами, пироксенитами, диорито-диабазами и т. д. дает ключ к разгадке целого ряда вопросов об их распределении и является с практической точки зрения базой для ряда важных горнотехнических выводов.

Установление районов распространения отдельных элементов или их группировок приводит нас к оконтуриванию областей определенного геохимического характера и этим путем намечает то, что выше мы называли элементогенетическими провинциями.

Последовательно изучая ход химических процессов области, мы подходим, наконец, к установлению некоторой связи между химическими элементами и геологическими процессами определенных эпох, что приводит нас в каждой области к выявлению элементогенетических эпох, согласно принятой выше терминологии.

Разрешение только что намеченного цикла вопросов возможно лишь в результате глубокого и всестороннего изучения каждой области с геологической, минералогической и геохимической точек зрения.

4. Четвертый вопрос в области геохимического обследования страны заключается в выяснении роли каждого отдельного элемента, характера его распространения, истории миграции и образования минеральных групп.

Если первый и второй вопросы ближе всего касались взаимоотношений общей химии и геохимии, третий — непосредственно связан с геологией в ее прошлом и настоящем, т. е. со всем физико-химическим комплексом

явлений Земли в исторической перспективе, то настоящий цикл вопросов вводит в непосредственную связь элемент с минералом, устанавливая те пути, по которым идет группировка или разделение химических элементов (миграция). Задачу этой части представляет выявление геохимических особенностей каждого данного элемента, судьбы его в геологической истории, характера связи с другими элементами, роли и судьбы образуемых им минералов. Несомненно, что именно для такой характеристики наши данные являются подчас очень скудными и поэтому обычно для характеристики ряда элементов оказываются недостаточными. Тем не менее опыт такого описания необходим, хотя бы с целью дать материал для дальнейших исследований и наметить те задачи и те непосредственные дефекты наших знаний, кои должны быть поставлены в основу дальнейших геохимических опытных исследований. Во всяком случае при описании каждого элемента возможно сравнение его свойств в данном районе с той характеристикой, какую ему приходится давать в общей геохимии.

Если для отдельных районов детальное изложение роли судеб отдельных элементов не всегда может быть плодотворно, то в грубых чертах оно может дать много интересного при общей сводке всех наших геохимических сведений об элементах Русской платформы.

Такая сводка намечена мной в конце описания отдельных районов и является синтезом наших сведений по химии отдельных элементов на всей территории Европейской России.

В этой сводке будет сначала дана краткая общая характеристика элемента и затем его особенности, наблюдавшиеся при изучении минералогии и геохимии Русской платформы¹.

5. Наконец, есть еще один вопрос в области геохимии, который вводит нас определенно в цикл человеческой культуры и фабрично-заводской деятельности на поверхности Земли, — учет влияния на геохимию человека с его культурой и хозяйством. Несомненно, что в настоящее время человеческая деятельность по своему масштабу и влиянию на химическую жизнь Земли сделалась уже соизмеримой с другими геохимическими факторами и не может быть оставлена без внимания. Поэтому в списке естественной ассоциации элементов интересно выделить те из них, которые представляют практический интерес и практически используются. Для научного освещения геохимии такого рода выделение имеет то значение, что показывает, с одной стороны, крупную концентрацию данного элемента выше его среднего содержания в земной коре, с другой, — что данный элемент, путем заводской деятельности, исчезает из обихода природы, распыляясь в новых формах человеческого хозяйства. Это извлечение элемента из природных условий не может не быть отмечено, так как уменьшает общие запасы его в данной области и, кроме того, благодаря тем или иным методам добычи, делает доступным его месторождение для новых химических реакций.

Для вопросов практического характера данные геохимического обследования районов являются материалом огромного значения. Изучение спутников различных элементов, выяснение происхождения месторождений и всей естественной ассоциации минералов и элементов дают возможность учитывать целый ряд вопросов практической геологии: количественные запасы, качества руды, возможность открытия новых элементов и т. д.

Нет никакого сомнения, что в этом направлении геохимия наметит новые правильные пути для изучения полезных ископаемых (ср. работы Дельексампа, де Лоне, Фогта и др.).

¹ Упомянутая сводка была включена в не законченный автором пятый том монографии «Геохимия». — *Ред.*

*Часть специальная***ОПИСАНИЕ ОТДЕЛЬНЫХ ГЕОХИМИЧЕСКИХ
ОБЛАСТЕЙ РОССИИ****В В Е Д Е Н И Е**

Разделение территории России на отдельные области представляет несомненно чисто искусственную задачу, с какой бы точки зрения мы к ней ни подходили. Если раньше топоминералогические описания обычно приурочивались к определенным административным или хозяйственным областям, то это имело свои основания чисто практического характера. Но для научного химико-географического обследования такое деление недопустимо: мы должны в определении областей исходить из геохимических принципов и обособлять те территории, которые характеризуются общностью геологических и геохимических явлений. Само определение области должно намечать районы со специфическими особенностями химической конструкции и поэтому оно может идти даже в разрез с орографическими или геоморфологическими данными. Более всего оно может быть сближено с понятием о петрографических провинциях, а в данном случае должно отвечать областям распространения естественных ассоциаций элементов.

Общие принципы нашего деления вытекают из основных черт геологии Европейской и Азиатской России. Два основных плита — Фенноскандинавский и Ангарский — занимают крайний запад и восток России, определяя те первичные устойчивые платформы, которые в истории Земли наметили первые черты современной земной поверхности.

На юг от замкнутого, ныне отделенного с юга и востока сбросами, Фенноскандинавского массива простирается Великая русская равнина, часть древней кристаллической платформы, много раз, однако, заливавшейся морскими трансгрессиями и много раз колыхавшейся под напором давления с востока. От берегов Финского залива через Москву до Казани и Самары мы намечаем западные границы наиболее важных морей, перемещающиеся в смене геологических эпох все более к востоку: на западе кембрийские и девонские отложения, далее каменноугольный Московский бассейн, еще более к востоку отложения пермских морей¹.

К югу начинается новая картина — осадки меловой трансгрессии и нивелирующий покров третичных отложений, протягивающийся до Черного и Каспийского морей и до молодых Таврокавказских хребтов. Три крупных и важных геологических явления усложняют картину юга. На юго-западе из-под покрова осадочных отложений высываются древние кристаллические породы, и глубокие геохимические аналогии позволяют сравнить их с породами Фенноскандинавского массива, — это Подольско-Азовский горст А. П. Карпинского и наполовину скрытый горст Воронежа. На юго-востоке под тем же покровом скрываются следы старых орогенетических движений, совершенно скрыты герцинские складки и герцинские геохимические процессы под поверхностью не только Донской степи, но и далеко далее на запад и на восток. А на самой поверхности, широко заходя в Астраханские степи и предгорья Кавказа и сливаясь по берегам Каспийского моря со степями Закаспия, перед нами вырисовывается чаща той широкой пустынной зоны, которая рядом соляных озер тянется

¹ См. А. П. Карпинский. Очерки геологического прошлого Европейской России, 1919, СПб. (изд. «Природа»). А. П. Карпинский. К тектонике Европейской России. Изв. Акад. Наук, 1919, 573.

к востоку вплоть до Маньчжурии, окаймленная с юго-запада у предгорий молодых хребтов выделениями нефти и летучих газов.

Два осколка новейших алтаид — Крым, созданный мезозойскими движениями, и молодой Кавказский хребет — являются отдельными частями

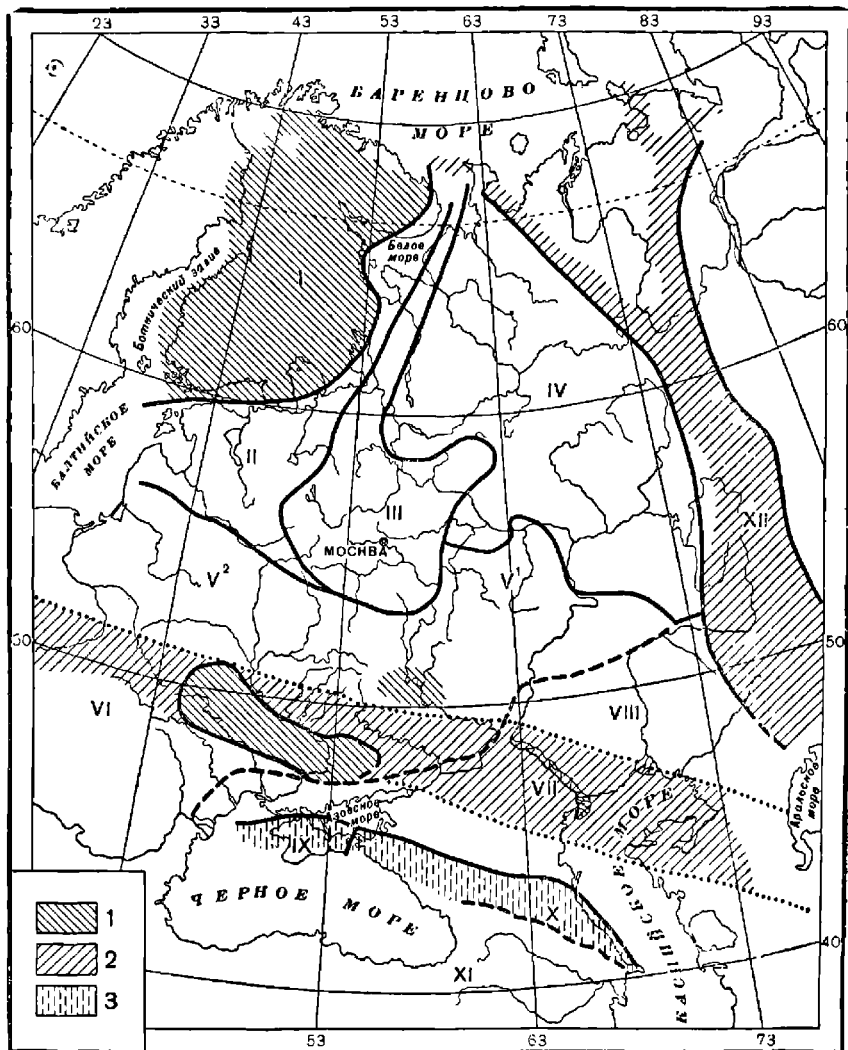


Рис. 8. Геохимические области.

1 — архейские щиты (горсты); 2 — зоны палеозойских дислокаций и интрузий;
3 — зоны мезозойско-третичных движений.

ми великой Альпийской системы. На юг от Кавказа мощные зоны опускания и на границах Армении — горы малоазиатских хребтов.

Такова картина Европейской России и, сообразно с нею, шаг за шагом мы намечаем и отдельные геохимические области (рис. 8)¹:

¹ В свою очередь эти 12 областей я группирую в три больших района: первый

- I. Фенноскандинавский щит.
- II. Кембросилур и девон русского северо-запада.
- III. Московский каменноугольный бассейн.
- IV. Пермские море и суша.
- V. Меловые и третичные отложения юга России.
- VI. Южный кристаллический щит.
- VII. Южная геосинклиналь и герцинские складки.
- VIII. Озерно-степной пояс.
- IX. Крым.
- X. Кавказский хребет.
- XI. Закавказье.

Наконец, областью XII мы считаем Тиман и Урал, стоящий на границе между Европой и Азией и представляющий поднятие геосинклинали между Ангарским щитом и Русской платформой.

Переходим теперь к Азиатской России.

Вокруг Ангарского щита и прислоненных к нему палеозойских отложений — нагромождение гирлянд старых и новых (постумных) алтаид. Внутри — излияния сибирских траппов, снаружи — мощные горные системы, пояса дислокаций и вздымания геосинклиналей. На крайнем западе — геосинклиналь и герцинская складка Уральского хребта, далее горный Туркестан, Алтай, Саяны с прибайкальскими хребтами, южные отроги Яблонового хребта, его северные продолжения и неясные гирлянды Хингана и Уссурийского края. На эту схему палагаются новейшие процессы; они оргографически сливаются с простиранием Яблонового хребта в Селенгинской Даурии, но далее на северо-востоке создают вулканические пояса островов и Камчатку. На западе пустынная зона Туркестана и Западной Сибири продолжает к востоку озерный пояс Прикаспия, тогда как Киргизские степи по своим геохимическим чертам сближаются с Западным Алтаем, сливаясь геохимически в общий Припиртыпский край.

Сложные гирлянды алтаид с трудом могут быть уложены в простые геохимические схемы, и при отсутствии достаточных исследований нам приходится довольно условно и гадательно расчленять их на составные части, из Саян выделяя Минусинский край, отделяя Южное Прибайкалье от восточных Саянских хребтов, а Селенгинскую Даурию — от южных Яблоновых.

Сообразно с основными чертами геологии Азиатской России мы можем наметить следующие основные сибирские районы:

XIII. Горный Туркестан.	XXI. Прибайкалье и Селенгинская Даурия.
XIV. Восточная часть озерно-степной области.	XXII. Южные Яблоновые хребты.
XV. Киргизские степи.	XXIII. Крайние восточные гирлянды.
XVI. Алтай.	XXIV. Вулканическая зона Тихого океана.
XVII. Ангарский массив.	XXV. Полярный край.
XVIII. Тунгусский бассейн.	
XIX. Минусинский край.	
XX. Саяны.	

Надо, однако, отметить, что если для Европейской России, при ее детальной изученности и сравнительной простоте геохимического строения,

обнимающий пять первых областей, связан с северным щитом и восточными меридиональными морями; второй, занятый южными трансгрессиями и процессами вокруг южного кристаллического щита (области VI—X); наконец, третью группу составляют чуждые Русской платформе — Закавказье (область XI) и Урал (область XII).

наши районы могут действительно отвечать определенным геохимическим областям, то для Азиатской России такое деление, при современном состоянии наших знаний, не может быть обосновано достаточными данными.

Как мы себе представляем, однако, геохимическую и минералогическую характеристику каждой из вышеприведенных областей? Определяя область преобладанием определенного геологического, тектонического или химического процесса, мы тем не менее далеки от мысли ограничивать наше химико-географическое описание исключительно данным характерным явлением, откладывая до другого очерка изложение явлений, связанных с другими геологическими процессами данной области. Так, описывая Крым, мы не ограничиваемся характеристикой минералов, элементов и процессов Крымской Яйлы, но захватываем и третичные отложения северной части полуострова и его озерные процессы, хотя последние составляют основную черту других областей (V и VIII). Я подчеркиваю, что моей основной задачей является детальное минералогическое и геохимическое описание отдельных территорий, причем границы этих территорий определяются преобладанием в них какого-либо геохимического цикла. Я далек от задачи дать геохимическую или минералогическую характеристику геологических отложений России, например, силура, юры, мела, или же выявить геохимические черты каких-либо определенных геологических явлений, происходивших на ее территории, например, герцинских складок или мезозойских хребтов. Такая задача, при всей ее заманчивости, мне кажется пока недоступной и может быть решена лишь в результате планомерного химико-географического изучения России.

Наконец, нужно сделать еще одно замечание: при описании отдельных районов я не предполагаю давать детальную топографическую или геологическую характеристику, а только краткое изложение или перечень тех орографических или геологических элементов страны и ее истории, которые вызвали определенные генетические циклы минералообразования. Таким образом, соответственные главы описаний носят всецело вспомогательный характер, намечая только вехи для изучения геохимической истории страны.

Область первая

ВОСТОЧНАЯ ЧАСТЬ ФЕННОСКАНДИНАВСКОГО ШИТА

ГРАНИЦЫ

Границы нашей первой области определяются легко, так как в общем образованы естественными географическими элементами: государственной границей с Финляндией на западе, Ледовитым океаном и Белым морем на севере и востоке, Финским заливом на юге и озерной полосой, которая определяется в грубых чертах финляндской границей, Ладожским озером, рекой Свирью, Онежским озером и приблизительно прямой линией от южной оконечности Онежского озера до г. Онеги.

По административному делению в область входят: большая часть Олонии — Олонецкой губернии, без южных и юго-восточных уездов (Лодейнопольского, части Олонецкого, Вытегорского и Каргопольского) и большая часть Архангельской, а именно: вся часть ее на запад от р. Онеги.

По своему географическому и геологическому характеру вся русская область массива складывается из трех частей:

- I. Кольского полуострова (К).
- II. Карелии или Поморья с островами Онежской губы (П).
- III. Олонии — части Олонецкой губернии (О).

В дальнейшем описании буквы в скобках будут приводиться для обозначения перечисленных трех районов.

ГЕОЛОГИЯ

Фенноскандинавский массив, помимо Швеции и Норвегии, занимает всю современную Финляндию, с юга отделенную широтной дислокацией по берегам Финского залива и Ладожского озера, северные уезды Олонецкой губернии и восточные уезды Архангельской (Александровский, Кемский и части прилегающих к ним). Он резко выделяется среди других районов Европейской России, являясь частью древнего первичного щита, почти совершенно не затронутого морскими трансгрессиями после палеозоя. Было бы ошибкой думать, что щит ограничивается видимой частью кристаллических пород: фактически он, очевидно, подстилает всю Европейскую Россию, обнажаясь на юге в виде южной кристаллической полосы и приближаясь, очевидно, к поверхности земли в целом ряде мест (Воронежский горст, вероятные подземные горсты в Минской губернии, в Тверской губернии и т. д.). Во многих отношениях он сходен с другими щитами, намеченными Зюссом в северном полушарии, — Ангарским, занимающим огромную часть северо-восточной Сибири, и Канадским: с юга и востока он окаймляется впадиной, занятой озерным пространством или морями с их заливами, на западе сливается в большую геотектоническую единицу со всем Скандинавским полуостровом и, может быть, Гренландией, вместе с которыми нераздельно протекала его геологическая история. Поэтому нам делается понятным не только поразительное сходство внешних геоморфологических или тектонических особенностей северных стран — Швеции, Норвегии, Финляндии или Гренландии и наших — Олонии, Поморья и Лапландии, но и близость самих деталей их конструкции, петрографического состава пород, общность геохимических процессов и поразительное сходство некоторых минеральных ассоциаций.

Повидимому, будет правильным признать, что Фенноскандинавский массив является одним из наиболее древних участков суши, возникшей при охлаждении огненно-жидкого ядра Земли. Именно на нем, как и на других щитах, мы можем проследить те сложные явления возникновения если не первичной земной коры, то все же тех образований, которые протекали в условиях еще высоких температур насыщенной парами воды и летучими газами атмосферы, сначала при отсутствии жидких водных масс, как факторов геологических или минералообразовательных процессов. Именно в этих условиях катархейского породообразования мы находим, в согласии с мнением А. П. Павлова, следы своеобразных процессов внедрения расплавленных масс в продукты разрушения первичной пустыни или первых потоков дождей (делювиальных скоплений). Тесно сплелись эти осадки с проникшими в них в глубине потоками постобтритийского гранита, образуя то, что мы сейчас называем древними гранитогнейсами.

Это древнейшее образование щита, вероятно, не раз до конца палеозоя опускалось под волны северного моря и, повидимому, не только девон (см. приложение, табл. I, № 13, столбец третий), остатки которого мы встречаем по краям Кольского массива, перекрывал поверхность массива.

Точная хронология осадков этого щита ускользает пока от нас: одни, вместе с финляндской школой, видят во всех образованиях как кварцитов и известняков, так и влиявших на них зеленокаменных пород, явления докембрийского времени, другие придерживаются мнения старой русской школы и относят песчаники к девону, известняки — к верхнему девону или нижнему карбону, а отдельные интрузии зеленокаменных пород протягивают от архейских до каменноугольных отложений. Лично я в дальнейшем изложении отношу указанные образования к докембрию, но должен отметить, что при отсутствии систематических исследований наших архейских областей мои сопоставления местами приобретают весьма гадательный и смелый характер.

В разное время дизъюнктивные дислокации, сбросы и разломы ограничивали наружные контуры щита — горста; современные направления береговой линии Белого моря и Ледовитого океана в значительной степени следуют этим дислокациям, время которых остается для нас загадочным, частью связываясь с движениями каледонской системы, уже налегшими на докембрийские складки и сбросы, в меньшей степени совпадая по времени с герцинскими движениями и, наконец, по мнению Седергольма, широко разливаясь в третичную и отчасти послетретичную эпохи.

Остается до настоящего времени загадочным и характер южных границ Фенноскандинавского щита; в то время как одни видят в границах озерной области типичный грабен, другие, подобно Э. Зюссу, рассматривают эту область лишь как линию размыва, придавая обрывистому южному берегу Финского залива характер глинта, т. е. не сбросовое, а чисто эрозионное или абразионное происхождение. С последним толкованием в значительной степени сближаются и данные геохимического характера, не устанавливающие здесь никаких следов элементов жильно-глубинного типа.

Совершенно обособленное положение в этой картине занимает огромный щелочной массив центральной части Кольского полуострова и отчасти его аналог на северном берегу Кандалакшского залива у Умбы. По своему геохимическому и петрографическому характеру он сближается с аналогичными изверженными массивами Христиании, Гренландии и южной Канады, а с некоторыми из них, например, с массивом Игалико (месторождение Нарсарсук) в Гренландии, он настолько сходен, что сравнительное их изучение, вероятно, даст ключ к целому ряду интереснейших разгадок. Все эти щелочные массивы по большей части окаймляют большой арктический щит, а по возрасту относятся к докембрийскому (Канада), или девонскому (Христиания), или последевонскому времени (иолитовый массив Финляндии). Во всяком случае выход этих магм вряд ли наблюдался в этом районе после палеозоя и было бы, может быть, правильным связывать образование Умштеко-Хибинского массива со временем не позднее начала карбона.

И так мы можем следующим образом определить основные черты геологии этой области, имеющие значение для ее геохимии:

1. Область представляет собой остаток древнего кристаллического щита, продолжающегося на юг под русской осадочной платформой, вплоть до Черного моря, но в своих современных контурах горста, ограниченного сбросовыми линиями.

2. Осадочные образования палеозоя по большей части смыты и остались на Кольском полуострове лишь в ничтожных обрывках девона (?), не имеющих сейчас никакого геохимического значения, или в виде зажатых на юге и метаморфизованных известняков и песчаников (если пред-

положения русской школы правильны), или, наконец, в контактно измененных осадках девона, окружающих центральный Кольский массив.

3. Весь цит прорезан и окаймлен дислокативными дислокациями различных возрастов, особенно сильными на юго-востоке и определяющими комплекс особых геохимических процессов.

4. Материковая, а потом ледниковая эрозия снесла все верхние части массива и тех отложений, которые его раньше покрывали, обнажив более глубокие зоны геохимических процессов (глубинные мигматические породы, лакколиты, батолиты и прочие субкрупные образования Седергольма).

5. Совершенно обособленную геохимическую провинцию составляет Умтеский щелочной массив и, может быть, связанные с ним Умские щелочные жилы, принадлежащие бесспорно к наиболее молодым интрузиям, но все же не допускающие точного определения возраста.

ОРОГРАФИЯ И МЕСТОРОЖДЕНИЯ

В связи с общей геологической историей находится и орография местности, сглаженной постпалеозойской эрозией и ледниковым покровом, — мягкими округлыми линиями вырисовываются остатки древних тектонических процессов. Карелия и значительная часть Олонии представляют низкую, поросшую лесом местность, покрытую густым, но не глубоким почвенно-торфяным покровом, и под этим сплошным покровом трудно обнаружить коренные месторождения и изучить детали геохимии. Лишь по извилистой береговой линии Белого моря, на берегах озер, по рекам и особенно по гарям на каменистых или скалистых склонах сельг¹ или варах² можно наблюдать сглаженные выходы коренных пород. В Олонии для сбора материала и изучения геохимии используются отчасти, кроме того, железнодорожные выемки, а также хаотические и заброшенные разработки полезных ископаемых (медные рудники с их отвалами, месторождения шунгита, ломки барита на Оленьем острове, многочисленные мраморные каменоломни Тивдийского района и т. д.).

В Карелии главные обнажения, доступные для научных исследований, сосредоточены по берегам многочисленных озер и по узкой полосе Беломорского побережья, где на сглаженных склонах и островах вырисовывается с тем же изяществом и ясностью, как на берегах Балтики у Стокгольма, вся картина сложной глубинной интрузии послелоботийского и, может быть, перхнеотийского пегматитового гранита.

Гораздо больше естественных обнажений дает нам Кольский полуостров, орографическое строение которого резко отличается от типично финляндского ландшафта Карелии. Высоты свыше 1200 м сосредоточены в центральной части полуострова, по берегам они достигают 500—700 м, намечая горный ландшафт с характером норвежских фьордов, совершенно не передаваемый нашими картами. От уровня океана на севере до высоты 300 м на юге все покрыто лесной, таежной растительностью, заболочено, покрыто торфяниками и мхами; здесь изучение возможно лишь по берегам быстрых стремнин, в очень редких выемках железной дороги, и лишь вдоль побережья открывается широкая возможность наблюдать старый щит и прорезающие его рудные и магматические жилы.

Зато выше линии лесной растительности, в высокогорных районах центральных массивов или у самых берегов океана на севере мы встречаемся

¹ Водораздельные возвышенности. — *Ред.*

² Покрытые лесом возвышенности. — *Ред.*

с обстановкой полярной тундры, частью совершенно задернованной, частью каменной, где сплошное обнажение или каменные россыпи сменяют болотистые и заиленные пространства. В условиях этих образований геохимические наблюдения облегчаются, и местами, как, например, в центральном Хибинском массиве, выше 300—500 м наблюдается сплошное обнажение частью; в виде неприступных обрывов и скал, частью в виде крутых осыпей и грандиозных каменных россыпей элювиального типа.

А. Архейский щит

Породы

Совершенно исключительные затруднения встречаем мы при описании петрографии русской части Фенноскандинавского щита. При всем ее разнообразии, с одной стороны, и большом сходстве с финляндской частью, с другой, мы имеем такой отрывочный и ничтожный описательный материал, что для общей характеристики области, как определенной петрографической провинции¹, у нас совершенно нет данных. Достаточно указать, что за исключением некоторых основных пород, особенно диабазов и доломитов Олонии, у нас нет никаких химических анализов и большая часть пород Архангельской губернии может быть охарактеризована исключительно качественно — на основании только микроскопических исследований.

При таком состоянии наших знаний мы почти не можем дать продуманной геохимической характеристики пород области, хотя и очень целью в своих геохимических основах.

Первую группу пород составляют кристаллические сланцы: слюдяные, хлоритовые, тальковые, гранатовые, амфиболовые, андалузитовые, хнастолитовые, кордиеритовые и силлиманитовые; одни переходят в горшечный камень, другие связаны рядом переходов с интрузиями зеленокаменных пород, третьи через филлиты могут переходить в глинисто-углистые толщи (Олонии), и для них весьма вероятен более молодой возраст. Наконец, значительная часть незаметно переходит в гнейсы. Среди этих сланцеватых пород мы, по видимому, можем различить несколько типов пород: первый — это глубинные сланцы, близкие к гнейсам, измененные инъекцией ботнийских гранитов; особую группу представляют гранатовые и андалузито-ставролитовые породы, образование коих можно связать с интрузией того же верхнеботнийского гранита; третью группу представляют метаморфические сланцы средней зоны — тальково-хлоритовые, серицитовые ятульского возраста. Должен, однако, отметить, что такая классификация носит лишь характер рабочей гипотезы.

Сами гнейсы не менее разнообразны: слюдяные, амфиболовые и, прежде всего, гранатовые очень богато развитые около Мурманска и по Кандалакшскому заливу. Трудно отличимы от типичных гнейсов и граниты, обычно имеющие гнейсовую структуру, то серые (постботнийские), то более молодые (иотнийские?) — красные и белые. Первые, с тесно связанными с ними аплитами, пегматитами и кварцевыми жилами, составляют ту главную массу, которая инъектировала сложную свиту катаржейских и архейских осадков, положив начало мигматическим породам.

¹ Подчеркиваю, что геохимическое описание щелочных массивов следует отдельно, см. стр. 96.

Однако главная минерализация и богатейшие образования пегматитов с их богатством слюдой и пневматолитическим воздействием на соседние породы, несомненно, связаны с более молодыми, может быть, верхне-иоттийскими гранитами (10)¹.

Вторую группу пород составляют более основные — зеленые — каменные породы различных типов и разных возрастов, сильно динамометаморфизованных, а поэтому очень плохо генетически расшифрованных, и в значительной части для архейских свит объединенных под названием метабазитов.

В самой карельской зоне гнейсов мы предполагаем существование ряда габбро-норитов с их лейкократовыми разностями (лабрадоритами или анортозитами), которые, однако, в последующих процессах архейского метаморфизма частью превращены в своеобразные друзиты, амфиболиты, цоизито-скаполитовые породы и т. д. Тесно связаны с ними также архейские диабазы, оливковые диабазы или глубинные перидотиты — дуниты.

Вторую, более молодую серию основных пород, не затронутых архейским динамометаморфизмом, составляют авгитовые порфириты Кольского полуострова, диабазы Мурманского побережья (11), частью превращенные в эпидиориты, и, наконец, по данным русской школы, еще более молодые диориты и диабазы Олонии (9), лучшие других пород изученные русскими и финскими геологами.

Наконец, третью группу составляют типично осадочные и отчасти гидрохимические образования — песчаники, глинистые сланцы, кварциты и точильные камни Южной Олонии различных возрастов, начиная от сливных кварцитов очень древнего возраста (калевские?) и кончая мало измененными песчаниками иоттийских отложений. Петрографически сходные с ними породы — песчаники и мергелистые песчаники, повидимому, девонского возраста — окаймляют в ряде мест Кольский полуостров, сохранившись в виде опустившихся полос вдоль дислокаций, обрамляющих Кольский горст.

Наконец, совершенно особое значение имеют в этой области и звестковые породы. Весьма любопытно, что в архейской толще севера они нам не известны, кроме нескольких мало исследованных пунктов в среднем течении р. Варзуги (Кольский полуостров) или отдельных валунов кальцитовых жил, находящихся изредка на берегах оз. Имандры.

Несколько более развиты карбонатные породы в Олонии, где, по мнению некоторых русских геологов, их можно отнести к верхнему девону или к нижнему карбону, тогда как финляндская школа их определенно связывает с ятульскими отложениями (6). Во всяком случае, их крайняя метаморфизация, обогащение доломитом, кварцем, а иногда и силикатами (флогопитом, полевыми шпатами), заставляет видеть в них осадки не моложе тех зеленокаменных интрузий, которые сыграли столь значительную роль в геохимической истории Олонии, и тех тектонических процессов, кои метаморфизовали породы Фенноскандии в доиоттийское время. Часть этих пород, благодаря своеобразной комбинации обломков силиката, кварца и доломита, была выделена как самостоятельный вид породы и названа Шмидтом кривозеритом.

Мы не имеем точной картины среднего состава архейских и катархейских толщ Фенноскандинавского массива, но уже те данные, которые дают подсчеты Озана вообще для древних щитов, показывают, что доналеозойские остовы древних горстов в общем, по сравнению со средним составом

¹ Цифры, стоящие в скобках после названий пород, относятся к третьему столбцу геохимической табл. I (см. приложение).

земной коры, характеризуются недостатком железа, кальция и магния. Все остальные элементы присутствуют приблизительно в количествах, равных среднему составу. Отсюда можно сделать вывод, что для того, чтобы могли отложиться большие количества CaCO_3 в силурийских морях, должны были произойти огромный механический размыв и извлечение солей Са и Mg. Эта механическая стадия разрушения и выщелачивания и протекала в период отложения мощной свиты кембрийских песков и песчаников, во время образования которых силурийское море обогатилось К, Са, Mg и Fe. Отсюда нам понятна возможность скопления калиевого глауконита и затем образования известковых пород в нижнем силуре (см. далее описание второй области).

Минералы

С минералогической точки зрения русская часть¹ Фенноскандинавского массива изучена очень плохо. Лучшее других нам известна юго-восточная часть — Повенецкий уезд, благодаря обстоятельным трудам А. А. Иностранцева, да и вся Олонецкая губерния, в ряде работ освещенная П. А. Борисовым, В. М. Тимофеевым и др. Все побережье Белого моря от Онежской бухты до Кандалакши с прилегающими островами до сих пор минералогически почти совершенно не описано, хотя за последние годы весьма усердно посещалось рядом геологов: И. И. Гинзбургом, Д. С. Болянкиным, Б. М. Куплетским, В. И. Соколовым, Д. В. Соколовым, А. Э. Купффером и некоторыми другими. Весь Кольский полуостров для минералогов еще *terra incognita*, если из него исключить часть Терского берега и Кандалакшскую губу и, конечно, центральные Умтукский и Луявский массивы — Хибинские горы. Между тем минералогия архейского щита очень сложна и, вероятно, гораздо богаче, чем это можно нарисовать на основании современных данных. Особенно поражает отсутствие химических исследований минералов этого района, и только руды в валовых анализах или полезные ископаемые Олонии сколько-нибудь детально изучены в этом направлении.

В общем нам известны в русской части Фенноскандинавского массива следующие главнейшие минералы:

Для самородных элементов мы имеем здесь совершенно исключительную область с металлической медью, золотом и серебром.

Весьма разнообразны и богато представлены, особенно в Олонии, серпистые соединения: пирит, пирротин иногда большими скоплениями в фальбандах и кварцевых жилах, весьма обычный халькопирит, борнит, ковеллин, галенит, сфалерит и редкие арсенопирит и халькозин. В старой литературе встречаются еще для Воицкого рудника указания на блеклую и кирпичную медную руду. Большинство из них (кроме сфалерита на Медвежьих островах) неизвестно нам в кристаллах. Отмечается и м о л и б д е н и т в листочках в кварцевой жиле с медным колчеданом у Кемлуды (в Карелии).

Очень бедны г а л о и д н ы е соединения; флюорит редок.

Весьма разнообразны о к и с л ы, хотя особого минералогического изящества или красоты форм они не достигают: это или микроскопические обычные минералы пород (циркон, ильменит, рутил, очень редкий корунд) или же довольно редкие первичные выделения магм (магнетит, титаномагнетит) и жильных процессов — гематит, гетит (онегит), кварц, аме-

¹ Я, конечно, исключаю из перечня Финляндию, но при описании самих процессов принужден неоднократно основываться именно на аналогии с западной частью Фенноскандии.

тист (гора Корабль и Волк-остров). Очень редок рутил в пегматитовых жилах (Карелия). Зато богаты различные озерные руды — лимониты с содержанием марганца самых разнообразных форм и величин. Известны под именем онегита красивые иглы гетита в аметистах Волк-острова. Черные аспидные сланцы местами носят яшмообразный характер лидита, а зальбанды рудных жил и их тело в некоторых местах, например на Воицком руднике, приобретают характер яшмы. К своеобразным кислородным соединениям севера мы должны отнести и лед, который в некоторых местах высоколежащих Хабинских тундр и, вероятно, других массивов Кольского полуострова никогда не тает, постепенно превращая зимний снег в постоянный фирновый лед.

Из углекислых наше внимание привлекают сплошные доломиты (мраморы), с редкими кристалликами того же минерала, кальциты, разнообразные выплеты углекислых медных солей и особенно редкий минерал стронцианокальцит (скорее — смесь стронцианита и кальцита) прожилками в шунгите.

С геохимической точки зрения к этой же группе надо отнести столь излюбленный в этом районе жемчуг — в пресноводных раковинах как Олонии, так и Карелии, а на севере — в долинах Туломы и Колы.

Наконец, совершенно загадочное образование представляют беломорские рогульки — веретенообразные кристаллы, повидимому, представляющие псевдоморфозы кальцита по гейлюситу (согласно архивным данным Минералогического общества — в океане против западной части Мурманского берега, а не в Белом море, как это до сих пор считалось).

Сравнительно бедны сульфаты, очень редок гипс во вторичных корочках на сернистых соединениях; мелантерит известен в больших количествах лишь в составе марциальных минеральных вод (О), и только барит образует большие скопления прекрасными щетками на Оленьем острове Онежского озера, в меньших количествах он отмечается в рудных жилах западного Мурманского берега.

Фосфорнокислые соли представлены только апатитом, как микроскопической составной частью пород, или изредка красивым сине-зеленым минералом гранитных пегматитов. Из солей других кислотных кислот ничтожное значение имеет крокоит (?), найденный Е. С. Федоровым в одной жилке Кандалакшского залива.

Наибольший интерес во всем районе, как можно было ожидать по его геологической истории, представляют силикаты, но и в них мы по большей части встречаемся с образованиями чисто микроскопического характера (оливин, серпентин, хлориты, тальк, авгит, пироксены, ромбические и моноклинные, роговые обманки, антофиллит, паргасит, силиманит, цоизит и др.). Лучше выражены: тальк, серпентин и плотный стеатит, актинолит и более редкий тремолит (в мраморах).

В качестве составных частей горных пород, но все же в скоплениях более значительных, мы должны отметить актинолит, альмандин, образующий целые россыпи, гранат типа андрадита —grossуляра, эпидот, скаполит, тальк, лабрадор или близкие к нему плагиоклазы и красивый синий кианит (в Кемском и Сорочком районах). Реже — ставролит и андалузит в хороших кристаллах. Очень любопытен кордиерит, который, по данным Рабо и Велсна, образует зерна до 1 см величиной в гнейсе у Зашеек (Кольский полуостров).

Наибольшего внимания, конечно, заслуживают силикаты в гидротермальных или пегматитовых жилах, но надо сказать, что и в них они не имеют широкого распространения: в доломитах Олонии мы знаем палы-

горскит, в прослойках шунгита — новый, ближе не изученный минерал из группы кальциевых силикатов, типичного асбестовидного строения; в гранитных пегматитах мы встречаем мусковит, биотит, микроклин, кислые плагиоклазы, красный гранат и изредка кианит или черный турмалин (последний также в кварцевых жилах). Наконец, самыми интересными минералами являются аксинит, встречающийся наравне с лучистым эпидотом вместе с медными рудами Олонии, и очень редкий апофиллит — спутник амethysta и флюорита.

Остается еще упомянуть о знаменитом шунгите, как крайнем члене группы углеродистых соединений и черных сланцах или черной земле, характеризующих район Петрозаводского уезда и с генетической и химической точек зрения еще нуждающихся в исследовании.

Элементы

Если исключить щелочные массивы Кольского полуострова, то мы с геохимической точки зрения получим очень типичную ассоциацию, в которую входит 30 элементов. Вся ассоциация элементов делается особенно типичной, если мы из нее выделим те элементы, кои бесспорно связаны с позднейшими постархейскими процессами (девона? карбона?), а именно: Zn, Pb, Ba. Если эти элементы особенно типичны для палеозойских, в частности герцинских химических процессов, то остальные и в особенности Al, Cu, Fe, Co, Ni явно более характерны для древних щитов и докембрийских платформ.

В диаграмму на стр. 84 не включен хром, найденный, если только верно его определение, в фукситовой слюдке среди известняков и доломитов Оленьего острова (в Онежском озере) и как будто бы в крокоите рудной жилы Кандалакшского залива, и только условно включена сурьма.

Геохимически не видно большого различия между отдельными областями щита, но вообще его южная часть более разнообразна и более богата геохимическими процессами.

Перехожу к описанию отдельных химических элементов области.

Водород. Никаких особенностей в его геохимической истории не наблюдается.

Бор. Обилие кислых пород должно было бы вызывать большее распространение бора, чем это наблюдается. Повидимому, верхние части гранитных пегматитовых жил, богатые летучими соединениями, снесены ледниковой эрозией, тогда как в нижних частях черный турмалин хотя и встречается, но сравнительно редко (Карелия). Гораздо любопытнее нахождение аксинита, соединения бора, вместе с медными и цинковыми рудами, что генетически связывает этот тип медных жил с медноколчеданскими или меднотурмалиновыми месторождениями Боливии.

Углерод в своих кислородных и водородных соединениях преимущественно связан с южной частью щита, где в области Олонии довольно широко распространены карбонатные породы. Здесь же мы находим в глинистых сланцах своеобразное месторождение почти чистого углерода — шунгита и ряд скоплений графитового вещества в сланцах и так называемой олонечкой черной земле. Много беднее углеродом и его соединениями Карелия и Мурман: очень редки пласти карбонатных пород, еще более редки прослойки неизученного графита в метаморфической серии Поморья.

Кислород. Для всего района кислород интересен в том отношении, что зона поверхностного окисления уничтожена ледниковой эрозией и абразией, а послеледниковые и современные процессы разрушения в об-

щем опережают углубление кислородной поверхности, почти отвечающей самой земной поверхности. Благодаря этому здесь в жильных и рудных месторождениях отсутствует окисленная зона железной шляпы и лишь ничтожные выплеты углекислых солей обычно покрывают поверхность сернистых руд.

Фтор. В гранито-гнейсовой толще фтора очень мало; это повторяется и в других частях Фенноскандинавского массива и, по всей вероятности, стоит в связи с огромной ледниковой эрозией, совершенно снесшей верхние части пневматолитических и гидатогепных жил. Только этим можно объяснить отсутствие фтора даже в калиевых слюдах, почти полное отсутствие плавикового шпата в пегматитах и в рудных жилах. Только месторождение горы Корабль и рудные жилы северного побережья Канда-лакшского залива содержат плавиковый шпат, что, может быть, объясняется близостью щелочных массивов и щелочных жил.

Натрий играет значительную роль в архейском и катархейском щите, но особенно типичен для щелочных массивов и жил Кольского полуострова.

Магний. Несомненно, магний — один из важных элементов района, перегруппировка соединений которого составляет всю сложность изменения основных пород при процессах метаморфизма. Особенно любопытными являются: фиксация магния углекислыми породами Олонии и ряд процессов хлоритизации и амфиболитизации (уралитизации) диорито-диабазовых выходов. Этот интересный процесс совершенно выяснен анализами К. Шмидта, отметившего частичный вынос магнезии при метаморфизме — эпидотизации основных кристаллических пород.

Алюминий играет обычную роль в алюмосиликатах щита, пигде не накапливаясь в особенно больших количествах; лишь в многочисленных иголочках силлиманита или пластинках дистена и изредка зернышках корунда обнаруживается высокое содержание глинозема в тех первичных породах, мигматизация и метаморфизация которых привели к образованию архейской толщи.

Кремний играет огромную роль в процессах геохимической перегруппировки элементов архейского щита.

Хлор в общем в Фенноскандинавском щите играет ничтожную роль, и если где-либо его приходится отмечать, то только при процессах скаполитизации, когда анортозитовые или лабрадоритовые породы переходят в цоизито-скаполитовые агрегаты. При этом в них частью концентрируются хлор (по анализу Баклунда, 1%) и сера. Совершенно ничтожно содержание хлора в марциальных железных водах (у Кончезера), где, впрочем, как и в других источниках южной части Олонии, мы угадываем отдаленную связь с девоном, столь богатым NaCl (см. описание второй области).

Я не говорю об апатите, который, очевидно, является материнским веществом для части галоидов области.

Тем более поразительным является богатство хлором щелочных массивов Хибинских гор. Если последний, действительно, ворвался в девонские осадки и частью растворил их, как это подозревает Рамзай, то не в этом ли заключается объяснение обилия в нем хлора?

Кальций никаких геохимических особенностей не выявляет.

Кальций никаких особенностей геохимического характера не обнаруживает, интересно лишь обогащение им основных пород при метаморфизации в связи с накоплением эпидота.

Титан. Отсутствие точных анализов не позволяет нарисовать полную картину распространения титана. Любопытно отметить, что хотя нигде титан не образует очень крупных, практически годных скоплений, тем

не менее его распространение в Фенноскандинавском массиве довольно характерно: в основной массе гранито-гнейсовой толщи мы не находим его соединений, поскольку больше его в интрузиях кристаллических пород — гранитов, где титан входит в состав магнетитов и в небольших количествах в слюды (0,2 % TiO_2). В основных породах мы его встречаем в титаносодержащих пироксенах друзитов (Карелия), а также в диабазах, где, по данным Валя, для Южной Олонии количество его окиси доходит до 2,5%.

Однако главное и совершенно исключительное распространение получает титан в щелочном массиве Хибинских гор (для умбских щелочных пород у нас нет сведений).

Для Олонецкого района мы имеем целый ряд магнетитов, переходящих в титаномагнетиты.

Марганец. Первично марганец входит в состав разнообразных силикатов архейской толщи, не обнаруживая при этом никаких особенностей. Любопытно нахождение марганцевых соединений в баритовом месторождении острова Оленьего.

Вторичное накопление Mn идет в колоссальных количествах вместе с железом в болотных и озерных рудах.

Железо. К сожалению, история железа недостаточно изучена в условиях Фенноскандинавского щита, между тем концентрация этого элемента наблюдается не только в процессах современного поверхностного режима, но и в магматических и гидротермальных явлениях прошлого.

С одной стороны, мы имеем дело с типичным накоплением магнетита в связи с контактами диоритов, с другой, — нам известны в той же Олонии настоящие кварцевые жилы с гематитом. Наконец, часть гематитовых месторождений Олонии, например, богатое Туломозерское в Олопецком уезде, связана с метаморфически измененными слоями осадочной свиты, аналогично магматическому кварциту Кольского полуострова.

Геохимическая диаграмма
Олонии, Кольского полуострова и Поморья (без щелочных массивов)¹

Ряды	I	II	III	IV	V	VI	VII	8	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	Ряды
1	H	—	—	—	—	—	—	.	.	.	B	C	.	O	F	.	2
3	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	.	K	Ca	.	Ti	.	.	Mn	Fe Co, Ni	4
5	Cu	Zn	.	.	As	.	.	.	.	Sr	.	.	.	Mo	?	.	6
7	Ag	.	.	.	(Sb)	.	.	.	.	Ba	.	.	.	.	?	.	8
9	Au	.	.	Pb	.	.	?	.	?	.	.	.	.	.	—	—	10

¹ Пользование настоящей диаграммой облегчается при сравнении ее с теоретической таблицей Менделеева, помещенной выше (рис. 7); вопросительный знак обозначает неизвестность вообще в природе элемента, занимающего данную клетку, точка — отсутствие данного элемента в изучаемой геохимической области России, тире — пустую клетку. Жирным шрифтом обозначаются элементы, играющие роль в области, мелким шрифтом — элементы меньшего значения.

Гораздо шире идет концентрация железа в современных озерных и болотных процессах, о чем см. ниже.

Н и к е л ь и к о б а л ь т — очень редкие элементы архейского массива, но все же они очень характерны для фальбандов и для ряда сернистых жил глубинного типа. Хотя мы не знаем чисто никелевых или кобальтовых соединений, но, по всей вероятности, они входят в состав особенно ширротина и некоторых других сернистых соединений и обнаруживаются по выпетам солей этих двух металлов. Сотые доли процента NiO обнаружены Валем в диабазах Южной Олонии.

М е д ь. Медные соединения играют сравнительно ничтожную роль в самом архейском щите; в Карелии и на Кольском полуострове медные соединения встречаются лишь изредка, спорадически, в ничтожных количествах. Совершенно иначе складываются многочисленные, но очень плохо изученные месторождения Олонии, по мнению большинства исследователей, определенно приуроченные к более молодым (потийским?) интрузиям диабазо-диоритовой магмы.

Ц и н к. Распространение цинка довольно широко, но нигде очень крупных скоплений он не образует. Любопытно отметить почти полное отсутствие цинка, как и свинца, в архейской и катархейской свитах (например в фальбандах) и приуроченность к более молодым породам основного типа, диоритам или молодым диабазам. В Олонии цинк сопровождает медь в известковых жилах с аксинитом и роговой обманкой в Петрозаводском уезде, а также и в Олонецком.

М ы ш ь я к. Точных сведений о нахождении соединений мышьяка у нас нет. Целый ряд указаний на арсенопирит в фальбандах и жилах Карелии, видимо, основан только на определении на глаз и нуждается в проверке.

С т р о н ц и й обнаружен в ряде соединений в Олонии, причем исключительно в связи с углистыми доломитами и черными углистыми породами шунгитового месторождения. П. А. Борисов связывает происхождение стронция с интрузией диоритовых магм.

М о л и б д е н с несомненностью в Олонии не констатирован, хотя отмечается в кварцевых жилах среди диоритов района на запад от р. Выг; и в других районах он отмечался неоднократно, но, несмотря на многочисленность этих указаний, у нас нет сколько-нибудь проверенных данных. И. И. Гинзбург отмечает молибденит в кварцевой жиле у Кемлуды в Поморье.

С е р е б р о известно на Медвежьих островах. Отмечается вместе с золотом и в фальбандах Керети. Наконец, постоянно серебро сопровождает небольшие жилы и включения галенита Олонии и обычно в медных колчеданистых рудах той же области. Неизменный спутник золота.

Б а р и й встречается в жилах как на Мурманском побережье, где барит частично заполняет рудные жилы в гранито-гнейсах, так особенно в Олонии, где генетически мощные скопления бариевых соединений П. А. Борисов связывает с интрузией диоритовой магмы. По возрасту соединения бария приходится приурочивать к более молодым геохимическим процессам (потийским или, скорее всего, эопалеозойским). Любопытно ничтожно содержание (0,04 %) ВаО в диабазах Южной Олонии. О барии в озерных осадках см. ниже.

З о л о т о распространено в целом ряде областей как самого архейского щита, так и более поздних интрузий, причем и в том, и в другом случае является связанным не с кислыми, а скорее средней кислотности — эфелюкаменными породами.

В самой архейской свите золото, вместе с серебром, входит в состав фальбандов побережья Белого моря.

В жильных процессах более позднего времени, связанных на юге с диоритами, золото тесно связано с медными рудами и в них или содержится мелко рассеянным в кварце, или образует скопления.

Наконец, известно накопление золота в россыпях, подобно некоторым финляндским довольно бедное. Во всяком случае местами ледниковые процессы накопили этот тяжелый металл, что мы видим не только по самому Фенноскандинавскому массиву, но и далеко на юге за его пределами, где золото встречается в ледниковых напосах (например, Московской губ., см. ниже).

С в и е ц приурочен не к архейскому щиту, а к позднейшим интрузиям, не захваченным региональным метаморфизмом. Свинцовые и цинковые руды, генетически связанные в Олонии с более молодыми интрузиями диоритов, на Мурманском побережье хотя и образуют пластовые жилы, но, повидимому, значительно более молодые (эопалеозой?).

Общая геохимическая характеристика

Из вышеизложенного и из анализа геохимической диаграммы, данной на стр. 84, можно сделать ряд весьма любопытных выводов.

Прежде всего бросается в глаза преобладание элементов обычного поля, совершенно исключительно слабо представлено кислое поле, довольно полно — жильное поле. В обычном поле мы видим, сверх того, преобладание элементов средней кислотности, причем особенно характерным для глубокого района является весьма слабое развитие элементов ультраосновных глубинных пород.

Весьма своеобразным является отсутствие ряда обычных спутников кислых магм, которые сами по себе играли очень большую роль в геохимии Фенноскандинавского щита; объяснение этому мы можем видеть лишь в полном уничтожении всей верхней части гранитных массивов и гранитных интрузий, богатых как раз большинством элементов кислого поля. Тем не менее несколько необычным является отсутствие более тяжелых металлов (Nb, Ta), столь характерных для иотнийских гранитов соседних районов Финляндии. Элементы жильного типа связаны, главным образом, с двумя периодами дислокаций, захвативших район: с одной стороны, архейской и доархейской (= гуронской) металлоносностью Олонии, с другой — со следами каледонских движений, с которыми можно связать главные рудные жилы Кольского полуострова.

В общем бедность этой части Фенноскандии элементами объясняется колоссальным смывом сначала больших древних хребтов, а затем и целого осадочного покрова эопалеозойских пород; благодаря этим процессам, с одной стороны, оказались сейчас обнаженными лишь корни жильных геохимических процессов, более бедные минерализаторами и летучими соединениями, с другой, — был дан основной материал для образования осадочных пород всей северной половины Европейской России вплоть до конца карбона.

Генетические типы

Распределение минеральных образований, сведенных в особой геохимической таблице по отдельным генетическим типам, представляет весьма значительные затруднения, благодаря малой изученности генетических процессов области. Между тем длительная и сложная геологическая исто-

рия области необычайно усложнила всю картину разнообразнейших химических явлений, переплетающихся и налагающихся одно на другое.

Особенно любопытна и сложна картина осадочных пород, остатки которых мы встречаем в геохимической табл. I под № 1, 4, 5, 6, 8, 13 (см. приложение). Из всех этих пород различных возрастов только песчанистые отложения 4, 5, 8 и 13 мы видим сейчас сколько-нибудь в том виде, в котором произошло сингенетическое образование минералов. О первичном состоянии катархейских пород мы почти ничего сказать не можем, сильно видоизменены и породы ятульских осадков. Преобразование осадочных пород можно отнести к следующим типам:

1. **Метаморфизм инъекции и мигматизации** — это относится к древнейшим осадкам, в которые проникли ботнийские и пост-ботнийские граниты, превратив осадки в гнейсы, гранито-гнейсы и кристаллические сланцы глубинной зоны.

2. **Метаморфизм давления** — к этому типу сланцев средней зоны я отношу преобразование осадков в хлоритовые, тальковые и кремнистые сланцы (4, 5).

3. **Метаморфизм контакта** — к этому типу относится ряд сланцев со ставролитом, андалузитом и гранатом, связанных с контактным изменением пород под влиянием гранита. Весьма незначительные контактные явления наблюдаются при воздействии диорито-диабазовой магмы на песчаники.

4. К особому типу **гидатометаморфизма** необходимо отнести и своеобразное изменение некоторых доломитов с возникновением в них вторичных полевых шпатов и слюд.

Для изверженных и кристаллических пород мы тоже получаем довольно сложную картину, причем и в данном случае сингенетические первичные минералы нередко уступали место новообразованиям.

Прежде всего мы можем здесь выделить ряд глубинных динамометаморфических процессов, превративших древние основные породы в роговообманковые сланцы или в так называемые метабазиты или друзиты Федорова.

Еще значительнее чисто **гидатогенная** переработка пород в менее глубоких зонах земной коры: такова мощная эпидотизация диоритов Олонии, образование из основных пород скаполитов, змеевиков, тальков и т. д.

Как для осадочных, так и для кристаллических пород почти не наблюдается явлений **катагенеза** и особенно **гипергенеза**. Это связано не столько с отсутствием этих процессов переработки пород, сколько с быстрой механической эрозией, опережающей скорость химических процессов на поверхности.

Наконец, третью большую группу генетических типов приходится относить к **жильным** процессам.

С одной стороны, к этой группе относятся гранитные выделения, переходящие в пегматиты и кварцевые жилы, с другой — рудные жилы, связанные по преимуществу с породами основного или среднего типа, местами тесно связанные с эруптивными массами (например, с диоритами и диабазами Олонии), местами носящие характер типичных посторогенических процессов (жилы Кандалакши).

Типичные гидротермальные жилы развиты необычайно слабо: к ним можно отнести жильные образования с флюоритом и амethystом горы Корабль и (с некоторой натяжкой) обогащение ятульских доломитов баритом под влиянием диоритовых интрузий (Олений остров).

Наконец, к серии древних жильно-пневматолитических процессов, по всей вероятности, следует относить и образование зон фальбандов в древней свите Карельского берега.

Генетические циклы

Очень сложную задачу представляет геохимическое описание нашей области в той естественной последовательности, которая правильно отнеслась бы прошлым судьбам этого края. Отсутствие сколько-нибудь планомерных и систематических исследований не позволяет здесь за шагом проследить изменения в условиях образования минеральных ассоциаций, и нам приходится лишь с большими оговорками пытаться воссоздать геохимическую картину прошлого.

В общем мы можем наметить четыре основных этапа геохимических процессов.

Совершенно ускользают от нас те далекие доархейские периоды, когда в своеобразной обстановке первых застывших участков земной коры, в вихрях первой пустыни и грязевых илистых потоках первых дождей-ливней, рождались первичные осадки земной коры. Об этой первой фазе прошлого мы лишь догадываемся по слабым остаткам ее первичной структуры. Вторую фазу принесли с собой мощные геологические и геохимические процессы метаморфизма первичных осадков в тот длинный период времени, который мы называем архейским. Наконец, третий период, который еще больше ускользает от точной хронологии, переносит нас в постархейское, вероятно, эопалеозойское время, когда ослабели динамометаморфические процессы, заменившись разломами, сбросами и связанными с ними излияниями основных магм. В сложной последовательности покрывались древние складки новыми осадками эопалеозойских отложений, почти без остатка размытых последующей эрозией.

Затем новые и последние картины приносят нам сначала третичные разломы, наметившие современную конфигурацию горста, а затем и мощный Скандинавский ледник.

Таковы те четыре основных этапа геохимических превращений, которые мы намечаем в этой области, главные и сложнейшие процессы которой, по видимому, протекали еще в докембрийскую эпоху.

Докембрийская эра

На блестящих, сглаженных ледником остатках старого шита, мы, подобно другим областям Фенноскандии, видим сложную картину метаморфизованных и инъецированных первичных осадочных пород. Серые и красные гнейсы в пестрой картине переслаиваются с кварцевыми или биотитовыми разностями, то обогащенными красным гранатом с переходом в красивые гранатовые породы, то переходящими в амфиболовые разности — в амфиболиты. Изредка породы обогащаются дистеном (Кемский и Сороцкий районы), в области карельского берега всегда богаты силлиманитом, изредка обнаруживаются прослойки активолита или же скаполитовых пород (р. Канда). Вся эта сложная ассоциация минералов дает нам картины магматических инъекций в осадочные свиты пород, а аналогия последних с физляндскими заставляет читать в них то остатки прибрежных илов, то эоловые образования древнейшей пустыни.

Местное обогащение глиноземом (в дистене и силлиманите), частое увеличение содержания магнезии и кальция говорят о глинистых породах в первом случае и мергелях — во втором. Изредка прослойки графитового

сланца (например, у озера Кукас в районе Ковды) говорят нам о каких-то остатках органической жизни.

Сложная, сдавленная и поставленная часто наголову свита этих мигматизированных ботнийским гранитом пород составляет кангу, на которой разыгрывались уже дальнейшие стадии геохимической истории: внедрение в нее как кислых иотнийских гранитных магм, так и основных — различного возраста. И те, и другие в своей истории тесно связаны с более молодыми образованиями архейского времени, врываясь обычно в виде пластовых жил, внедряясь между слоями различных осадков — то прибрежных, то глубоководных, или же заставляя в виде отдельных линз и лакколлитов, имеющих северо-западное простирание в области Белого моря и канинско-гиманское — у берегов Ледовитого океана.

К двум главным периодам приурочено проникновение в область нашей части щита гранитных масс: сначала в ботнийское время, когда шла мигматизация в глубине древнейших осадков, и потом в иотническое время, характеризующееся на юго-западе (в Финляндии) массивами рапакиви.

В сложной обстановке динамометаморфического изменения архейской свиты на больших глубинах при высоких температурах шло постепенное видоизменение старых осадков и более молодых, ворвавшихся в них, частью кислых гранитных, частью зеленокаменных пород. От нас ускользает еще картина той геохимической лаборатории, в которой шла переработка этих образований, сначала в чисто магматической стадии (мигматизация по Седергольму), потом в метаморфически гидротермальной. К этой последней стадии мы относим ряд очень характерных процессов, почти совершенно скрывающих первичную природу измененных пород: это широко идущие процессы превращения пироксено-плагноклазовых пород или в скопления цоизита — альбита или в скаполитовые породы, или в друзиты с загадочной концентрической кристаллизацией минералов и, наконец, широкой уралитизацией или, вернее, амфиболитизацией пород. Эти четыре процесса мы отмечаем для основных как меланократовых, так и лейкократовых пород, широко идущая эпидотизация характерна для пород гранитного типа (например, у кандалакшской насыпи железной дороги или у Александровска).

В самом конце архейской эры эти иотнийские гранитные интрузии принесли с собой пегматиты и кварцевополевошпатовые жилы с довольно богатой минерализацией.

Пегматиты Беломорского побережья уже давно привлекли к себе внимание своим богатством калиевой слюдой, тем «москвитом», который из Москвы вывозился за границу еще в XV веке. Пластовые жилы, то в виде тоненьких прослоек, то расширяющиеся в линзы и вздутия или, что значительно чаще, жилы секущие — вкрест простирания гнейсовых толщ, в общем более мощные и более богатые слюдой. Красные пегматиты богаты биотитом и ортоклазом, белые — олигоклазом и мусковитом; и те, и другие мало захвачены общими метаморфическими процессами и тесно связаны с интрузией молодого гранита, простираясь преимущественно в направлении СЗ 330°.

Но как ни грандиозны процессы пегматитов, все же они очень бедны геохимически, вся плеяда элементов обычного кислого типа отсутствует, и лишь мусковит, полевошпат и кварц (иногда гранат) являются основными минералами, к которым в редких случаях присоединяются бор (в виде турмаллина), фосфор в форме зеленоватого апатита (Хитоварака), а в кварцевых разностях и кианит. Ничтожно количество рудных минералов (магнетита), изредка лишь наблюдается светлый зметист и еще реже кальцит, как последний продукт жильного процесса.

Исключительная бедность пегматитовых жил элементами (помимо, K, Al, Si — немного P, S, B, следы Ti и F) свидетельствует о том, что мы имеем здесь дело лишь с самыми глубокими зонами жильных процессов, главная часть которых, богатая пневматолитическими минералами, снесена абразивной и эродирующей деятельностью ледника.

В тесной зависимости от тех же пегматитовых дериватов находятся мощные и иногда весьма длинные по простиранию кварцевые жилы, изредка с кальцитом и черным шерлом больших размеров.

Вторую серию внедрений в осадочную толщу составляют «зеленые» породы, к сожалению, плохо изученные, но весьма разнообразные по своему составу и строению, чаще всего объединяемые в описаниях термином амфиболитов и метабазитов для более древних, или диабазов и диоритов — для более молодых.

Так, в районе Карелии отмечаются настоящие амфиболиты, гранатовые амфиболиты, перидотиты (гарцбургиты), т. е. настоящие основные оливинные породы.

Целый геохимический цикл процессов архейского времени связан с выше описанной интрузией основных пород и их метаморфизмом. К сожалению, чисто петрографическое исследование Е. С. Федорова не дает нам разгадки таинственных еще пород — друзитов с обильным железистым гранатом контактного типа и довольно кислым плагиоклазом в последних стадиях застывания породы. Вряд ли, однако, может быть сохранен взгляд на них, как на нормальные эруптивные породы, и скорее мы могли бы видеть в них продукты метаморфизации каких-либо жил и штоков габбро-норитовых пород. Но если вся эта сторона интересного превращения жильных или глубинных пород в друзиты с оливином, титановыми пироксенами и известково-железистыми гранатами до сих пор ускользает от нашей геохимической оценки, благодаря неизученности, то гораздо очевиднее и яснее проходит перед нами серия тех минералообразовательных процессов, которые положили начало фальбадам и рудным жилкам, непосредственно связанным с зеленокаменными породами.

В непосредственную связь с зеленокаменными породами Олонки приходится ставить и различные медные месторождения южного района; здесь медные соединения различного типа или непосредственно связаны с диоритами или же приурочены к их контактам и связанным с ними кварцевым или известковым жилам. Сопровождаясь хлоритами или эпидотами, сернистые руды (халькопирит, борнит, пирротин, халькозин) богаты, подобно фальбадам севера, золотом или серебром и переходят, таким образом, в типичные золотые жилы.

Хотя практическое значение многочисленных медных месторождений этого края до сих пор не выяснено, но с научной точки зрения их характер является в достаточной степени очевидным и довольно постоянным на большой территории.

Но не только выносом медных растворов характеризовались излияния этих магм; их воздействие на окружающие породы, которые они метаморфизировали и в которые внесли часть новых элементов, выразилось в ряде сложных процессов. Повидимому, под их влиянием шли окремнение и доломитизация известняков, превратившая их в мраморы (знаменитые мраморы Тивдии), песчаники превратились в сливные кварциты, стронциевые и бариевые соединения накапливались в известняках и глинистых толщах; на границе глинистых сланцев и диабазов на Волк-острове возникали те окремненные породы, которые дали нам знаменитые друзья дымчатых кварцев и аметистов с иглами онегита.

Может быть, к этому моменту нам приходится относить и возникновение шунгита, образовавшегося путем метаморфических процессов и воздействия диоритовых магм из пегматовых нам углистых прослоек. Много разных взглядов было высказано о происхождении этого своеобразного материала и некоторые думают, что, аналогично антраксолиту других мест, мы имеем здесь дело с накоплением углеродистых веществ из вулканических эманаций диоритовой магмы.

К этому же архейскому времени мы относим неведомые нам осадки Ятульского моря, которые проникли в области Олонии далеко на север, отложив мощные скопления известковых пород. Может быть, знаменитые розовые мраморы Тивдии, красивые полосатые доломиты Повенецкого уезда являются остатками этих древнейших карбонатных отложений, лишь измененными более молодыми интрузиями «зеленокаменных» пород?

Одновременно с образованием глинистых и кварцевых осадков и с накоплением мощной серии известняков Олония сделалась страной крупных вулканических процессов, о чем свидетельствуют вылившиеся на поверхность земли лавовые потоки и застывшие в глубинах жилы диоритодиабазовой магмы.

Однако последней интрузией архейского времени надо признать внедрение иотнийского гранита, сначала серого, а потом более богатого калием — красного. Этот гранит, частью сохранивший гранито-гнейсовое строение, образует почти весь мурманский берег, часть терского, сменяясь гнейсами в центральной и южной части.

Повидимому, этим заканчиваются первая и вторая фазы генетических циклов Фенноскандинавского массива, начинается третья, почти совершенно не захваченная динамометаморфическими процессами, по озаменованная обильными разломами, дислокациями и сбросами, повидимому, продолжавшимися еще в третичное и отчасти послетретичное время и сохранившими сейчас для всего этого района характер горста.

Но раньше, чем мы перейдем к этому новому этапу в геохимической истории, я должен еще отметить минеральное тело, лишь в последние годы открытое и на русской территории — месторождение магнетитовых кварцитов, образующих пластовую залежь на обоих берегах Хольского залива. Образую с несомненностью продолжение знаменитой киркенесской серии в Норвегии, это месторождение чистого магнетита, рассеянного в зернах среди кварца и редкой роговой обманки, лежит согласно с простиранием главной гранито-гнейсовой толщи.

Относительно происхождения этих скоплений высказывались разные взгляды. Одни, как Фогт, склонны видеть в них продукт магматического выделения из гранитной магмы при ее интрузии в древнюю свиту пород, другие, и я склонен примкнуть к последним, видят происхождение железа в первичном скоплении этого элемента в каких-либо первичных катархейских осадках; лишь путем гранитной интрузии эти железистые осадки неведомых нам древних геохимических процессов превратились в нынешнюю кварцево-магнетитовую породу.

П а л е о з о й с к а я э р а

... Но вот мы оставили архейские складчатые образования, покинули некогда мощные здесь хребты, складки и сбросы и должны перейти к более новым картинам исторической летописи — последним, правда еще многочисленным фазам геохимических процессов Фенноскандинавского щита.

Прекратились складчатые образования, застыл в виде мощного массива весь Фенноскандинавский щит и отдельными сбросами и разломами выявились его контуры как древнего щита — горста. Повидимому, много раз повторялись эти дизъюнктивные дислокации и в разное время давали начало и рудным жилам, и выходам основных пород, и прорывам значительных масс щелочных (атлантических) магм. Интересно отметить, что одни и те же тектонические направления сохранялись в этих движениях разных геологических возрастов и вместе с тем в своих основных чертах они отвечали и повторяли те старые линии, по которым шли складчатые движения и вытягивались геохимические зоны еще в архейские времена: это, с одной стороны, направление мурманского берега, столь определенно повторяющееся на Канине и в Тимане, с другой — направления более меридионального типа (ССЗ), отвечающие карельскому берегу Белого моря, его пегматитовым жилам и в глубине Кандалакшского залива сталкивающиеся с более широтными сбросами.

Мы не можем более детально и глубоко проследить геохимическое значение этих двух направлений; но как будто широтное и северо-восточное отвечает более обычному простиранию серебро-свинцовых жил как южной, так и северной части Кольского полуострова, тогда как второе (ССЗ — ЮЮВ, ясно выраженное в Карелии) отвечает большинству интрузий архейского возраста, его фальбандам и большей части пегматитовых жил.

Первые картины, которые нам рисуются на эопалеозойском горсте, это внедрение по трещинам и жилам основных пород, сначала пироксенитов, а потом диоритов и диабазов (по наблюдению А. А. Полканова). Штоками и жилами обнаруживаются они по мурманскому побережью, обрываясь на границе с осадочной девонской толщей, опустившейся по линиям разломов тиманско-канинского направления. Повидимому, с этими диабазами и особенно диоритами связаны многочисленные рудные жилы как Кольского полуострова, так и Северной Карелии¹. Настоящие рудные жилы с рудными брекчиями заполнены кальцитом или кварцем, реже баритом с сернистыми соединениями свинца, цинка, меди и серебра; они частью следуют параллельно жильным интрузиям основных пород, но большей частью секут в направлении СВ — ЮЗ метаморфическую древнюю свиту.

Но вот после ряда дислокационных процессов мы снова подходим к более точно определяемому с хронологической точки зрения моменту: это образование осадков, повидимому, девонского возраста; правда, они сохранились лишь отдельными обрывками, в опустившихся участках краев Скандинавского горста, но уже в них мы узнаем те глинисто-песчаные образования, которые типичны для девона всего северного крыла². Повидимому, мощный размыв Фенноскандинавского массива и покрывших его пород давал материал для этих кластических образований, и хотя нам неизвестно, покрывало ли девонское море всю поверхность Кольского полуострова, но во всяком случае могучая эрозия архейских складок намечала процессы химических превращений в мелководных частях этого девонского моря. Шли ли здесь и более глубокие геохимические превращения, наблюдались ли здесь и более глубокие осадки карбонатных пород, об этом судить

¹ Седергольм в 1903 г. был склонен считать эти рудные жилы ютнийскими.

² Из геохимических особенностей этих песчанистых пород Кольского полуострова надо отметить прорезывание их на Турьем мысу щелочными жилами магматических пород и тонкими прожилками флюорита, а также интересные гидротермальные образования (аметиста, плавикового шпата и др.) на горе Корабль. Нельзя при этом не отметить, что еще старые авторы совершенно основательно подчеркивали сходство минералов горы Корабль и Волк-острова на Онежском озере.

трудно. Долгие континентальные эпохи, могучая эрозия ледника уничтожили эти памятники прошлого (если они были), и, может быть, только в частях покрова, уцелевшего по краям Хибинских гор, можно еще сейчас видеть остатки этих палеозойских осадков.

Огромный промежуток времени от запалеозоя вплоть до наступления ледниковой эпохи проходит для нас без памятников прошлого, и только совершенно новые и чуждые прошлому щелочные магмы врываются в осадочную свиту пород; но и они не дают нам точных указаний, а лишь предположительно мы можем говорить об их карбоновом возрасте. Грандиозные вторжения атлантической магмы положили начало Хибинским массивам и сложным, совершенно своеобразным геохимическим процессам (о них см. стр. 96).

Ледниковая и современная эпохи

Новый генетический цикл начинается только с ледниковой эпохи. На границе Швеции, Финляндии, России и Норвегии, приблизительно в верховьях р. Паза, намечается мощный центр обледенения и горный ландшафт, оставшийся материком в течение всей новейшей геологической истории, подвергается эрозионной деятельности ледниковых масс.

Ими было завершено уничтожение старых цепей и хребтов, срезаны были верхи всех складок, жил и штоков, и в результате глубокой эрозии были обнажены глубинные корни архейских и катархейских процессов. Уничтожен был покров, скрывавший щелочные массивы, обнажились древние лакколиты, глубинные жилы, выпаяны были глубокие долины, а послеледниковая эрозия довершила дело разрушения, отложив огромные селыги и озы сортированного материала. В течение сильной эродирующей деятельности шли и геохимические процессы, накапливались магнитные железняки в наносах рек, изредка скоплялось золото в небольших золотоносных россыпях Финляндии и Олонии.

На юге глубокие дислокации и разломы обрывали южную границу горста, а опускавшиеся участки земной коры заливались морями и озерами, сначала иольдиевым, потом анцилловым и литториновым. В этом прошлом закладывались черты современной озерной области, окружающей с юга Фенноскандинавский массив, и еще сейчас мы читаем в этих озерах историю их прошлого.

Почти непрерывной зоной тянутся эти водные бассейны, опоясывая Скандинавский горст, Балтийское море с Финским заливом, Ладожское и Онежское озера, Белое море и, наконец, Ледовитый океан.

В медленных процессах минералообразования на дне этих водоемов шло осаждение различных химических осадков и накопление мелкого ила. В работах Гильзена вырисовываются эти осадки, песчаные в южных частях Онежского и Ладожского озер, всюду бедные или совершенно лишённые карбонатов, но обогащающиеся железом и марганцем¹.

Процессы образования железисто-марганцевых конкреций и бобовых руд широко захватывают весь наш север, как один из важнейших геохимических процессов, который идет на наших глазах в болотах, в озерах, морях и на глубинах Полярного океана.

Не только наши озера Олонии дают огромное количество железных руд, но и дно Ледовитого океана в некоторых своих частях настолько богато железистыми стяжениями, что смело могло бы считаться сплошным железным месторождением.

¹ Среди всех анализов осадков особенно интересен анализ глубоководного ила Онежского озера с глубины 85 м, в котором обнаружено TiO_2 —1,06% и BaO — 0,1%, а в марганцевых стяжениях того же озера BaO — 0,2%.

Очень типично идет накопление железных стяжений в болотах и торфяниках, концентрируя вместе с тем большие количества фосфора и частично марганца; более определенный тип осадков представляют образования северных озер Олонии, в которых количество Fe_2O_3 доходит до 60%, а Mn в разных степенях окисления до 15%, при содержании P_2O_5 около 3%.

Совершенно аналогичны железистые желваки Онежского озера.

Лишь спорадически попадаются желвачки в Ладожском озере, довольно широко распространены они в Финском заливе; однако, главное их распространение в Карском и Баренцевом морях.

В этих грандиозных процессах минералообразования и концентрации железа и марганца бросается в глаза увеличение марганца за счет железа на больших глубинах, в длительных процессах глубоких морей, так что в последних мы имеем дело с железисто-марганцевыми осадками¹, тогда как в озерах — с марганцево-железистыми.

Перед нами встает интересная картина минерогенезиса², постепенно раскрываемая работами Ашана, И. И. Гинзбурга, Б. Л. Исаченко и др. Нет никакого сомнения, что в общем причина накопления железисто-марганцевых масс две. Одна связана с окислением сернистых соединений железа, которое протекает в черных сернистых илах, образуя на них корочки гидратов окиси железа. Вторая причина связана с переходом в гидротермы не без содействия микроорганизмов коллоидальных соединений железа, припесенных текучими водами вместе с гуминовыми веществами. Мы знаем сейчас, что первая причина имеет сравнительно небольшое значение; в наших северных озерах черные сульфидные илы редко играют какую-либо роль, хотя во многих из них обнаружены следы сероводорода и открыты железистые пленки.

Несколько иначе, вероятно, складывается процесс на больших глубинах морей и океанов. Хотя, согласно исследованиям Б. Л. Исаченко, настоящие черные илы с сульфидными процессами встречены лишь в прибрежных частях мурманского побережья и у берегов Новой Земли, тем не менее огромные скопления марганцево-железистых конкреций Карского и Баренцева морей генетически, хотя и косвенно, связаны со сложными восстановительными процессами сернокислых соединений.

Этот мощный процесс накопления Fe и Mn является, очевидно, лишь продолжением, и притом совершенно неизбежным, процессов материкового почвообразования, ибо на дне водоемов накапливается все то, что не может удерживаться или накапливаться в условиях северных почвенных процессов. Огромные количества гуминовых соединений ежегодно выносятся полуторные окислы, и в бурно-ржавых весенних водах вырисовывается перед нами этот процесс оподзоливания почвенного покрова. Правда, в почвах северных подзолов часть железа и марганца накапливается в более глубоких горизонтах, давая даже начало скоплению болотных руд, но все же огромное количество железа, алюминия и марганца выносятся северными реками в морские и озерные бассейны.

Так, сложной цепью явлений связываются вместе биохимические реакции растений, извлекающих из разрушающейся дресвы кристаллических горных пород содержащееся в них железо и отмирающих осенью, действие бурых и красноватых весенних вод, сложные химические процессы осадков дна, превращающихся в результате медленных бактериальных или чисто

¹ В 1921 г. обнаружены особые скопления железисто-марганцевых конкреций у гирл Белого моря.

² Ср. A s c h a n n. Zs. prakt. Geol., 1907, XV, 56.

физико-химических процессов в конкреции, шарики и корочки марганцево-железистых минералов.

Хотя отдельные этапы этого современного нам химического процесса ускользают от нашего анализа, все же основной ход переноса железа, марганца и глинозема и их новая колоссальная концентрация совершенно очевидны.

Первые начальные стадии процесса лежат в явлениях почвообразования, в накоплении гумусовых веществ, в противоположность субтропическому климату, где гумус быстро сгорает в экзотермической реакции до угольной кислоты и воды. В северных широтах ход химических реакций и является вообще замедленным, и при значительном механическом разрушении почти незаметно протекают процессы выветривания. Трудно себе представить большую свежесть пород, чем та, которая характеризует образования Кольского полуострова и Карелии; если породы и метаморфизованы, то во всяком случае не современными деятелями поверхности, а теми сложными динамическими процессами, о которых мы говорили выше; жилы с сернистыми соединениями совершенно свежи; идеально чисты и прекрасны минералы Хибинских щелочных массивов; кислотная поверхность только иногда в долях миллиметра опережает ход механической эрозии, и только поверхностные ржавые пятна и потеки покрывают глубинные фальбанды или выходы рудных жил.

Так медленно текут геохимические процессы на древнем материке — Скандинавском горсте; медленно текут они в морских глубинах, то накапливая по берегам Ледовитого океана черные илы с сернистыми соединениями железа, то покрывая свои глубины пятками и шариками марганцево-железистых конкреций, то накапливая по берегам в водорослях ценный иод и калий (мурманское побережье), то, наконец, в своеобразной северной фауне собирая на небольших глубинах CaCO_3 иль образуя загадочные «беломорские рогульки».

Так слагаются основные черты геохимии настоящего этой области.

Заключение

На основании приведенного материала по геохимии самого цита (без щелочных массивов и жил) мы можем прийти к следующим основным выводам:

1. Геохимически русская часть Фенноскандинавского массива весьма сложна и мало выяснена.

2. Геохимическая ассоциация элементов типична для пород средней кислотности, чему, в общем, отвечает и однообразие петрографической провинции, объединяющей породы этой области (вне щелочных).

3. Наиболее характерными генетическими типами области являются: глубинная мигматизация древнейших пород, сложный метаморфизм архейской серии, рудные жильные образования, связанные по большей части с основными интрузиями, и, наконец, пегматитовые и аплитовые процессы, главным образом, молодого юттийского гранита.

4. Очень характерным для всего района является почти полное отсутствие процессов гипергенеза при очень усиленной концентрации некоторых элементов (Fe, Mn) в пресноводных и морских бассейнах.

5. Геохимическая картина описываемого района в общем не может быть дана из-за отсутствия точных минералогических, геохимических и петрографических данных и точного описательного материала.

Б. Щелочные массивы

Геология

Грандиозную, нигде не повторяемую картину рисуют нам щелочные массивы Кольского полуострова. До высоты в 1230 м возвышаются сейчас вершины этих массивов и красивой цепью, покрытой большую часть года снегами, рисуются эти своеобразные горные плато, разрезанные глубокими долинами ледниковой эрозии.

Мягкими, сглаженными кажутся контуры окружающих их гранито-гнейсовых массивов, и хотя некоторые из них достигают не менее значительных высот, их очертания лишены сказочности Хибинского массива, занимающего вместе с Луавруртом площадь свыше 1600 км².

И перед этой грандиозной картиной лишь отдельными неясными обрывками нам представляются сведения о второй области щелочных пород. На берегу Кандалакшского залива у полуострова Турья они впервые были открыты Е. С. Федоровым в 1891 г. в виде отдельных жил иолита и уртита — этих двух меланократовых мелкозернистых пород щелочного типа. То прорезающими древние песчаники, много реже гнейсовые породы, то на них налегающими, то включающимися в неведомую пока крупнозернистую породу (элеолитовый сиенит?) представляются нам эти породы. Велика ли здесь область их распространения, или они ограничиваются немногими жильными тилами, сохранив свой очаг где-либо в глубине? Или, может быть, здесь целый центр щелочных пород, которые будут открыты новыми исследователями? Может быть, наконец, в центральных частях Кольского полуострова мы найдем еще другие центры щелочных магм?¹

Все это вопросы, на которые сможет ответить лишь детальное будущее исследование, а пока мы можем сколько-нибудь детально говорить лишь о двух центральных щелочных массивах.

С геохимической точки зрения мы имеем в ассоциации минералов этих массивов совершенно замкнутую, специальную химическую провинцию, сходную с аналогичными массивами, особенно юго-западной Гренландии.

Породы

С петрографической точки зрения мы имеем здесь огромную область щелочных пород, весьма хорошо изученных финскими геологами Рамзаем и Хакманом. Основу и главную массу обоих лакколитов составляют элеолит-сиенитовые породы или крупно- и беспорядочнозернистые хибиниты, или гнейсовидные луавриты. Некоторые из этих пород переходят или в крупнозернистые пегматиты, или же в порфиroidные жильные разновидности.

Более основную группу жильных пород составляют: тералит, мончикит, тингуайт, а также уртиты, тавиты, иолиты, — все разные представители жильных пород, то более, то менее меланократовые.

Вторую группу пород района представляют образования контактного происхождения, опоясывающие оба массива, — это весьма разнородный комплекс пород, представляющих по существу изменение базов, кварцитов и глинистых сланцев и сводимых к сложной и запутанной группе горнфельсов и кристаллических сланцев (хлоритовые и амфиболитовые

¹ В соседней Финляндии нам известен ряд небольших щелочных районов, лежащих весьма близко к русской границе: Ийваара, Пихекуру, Энонтекис и др. Рабо отмечал еще массив элеолитового сиенита на берегу Нотозера.

сланцы, так называемые имандриты, гиперстен-кордиеритовые роговики, хлоритизированные лабрадорпорфиры, оливино-актинолитовые кремнистые породы, силлиманитовые гнейсы и т. д.). Рамзай в этой мелкозернистой группе пород различает первичные остатки девонских осадочных и изверженных образований (13 — по моей схеме, табл. I).

Минералы

Минералы Хибинского и Луаврского массивов распадаются на две группы, связанные только что указанными группами кристаллических пород. С минералогической точки зрения говорить о минералах второй (контактной) группы почти не приходится, так как в их мелкозернистой массе мы почти не встречаем сколько-нибудь крупных выделений тех минералов, которые различаются в шлифе (кварц, альбит, энидот, хлорит, кордиерит, гиперстен, тремолит, антофиллит, оливин, силлиманит, шпинель и некоторые другие).

Наше внимание привлекают лишь самые массивы и их эндоконтакты, минералогические богатства коих еще мало выявлены и почти не изучены.

С а м о р о д н ы х и с е р н и с т ы х соединений мы здесь совершенно не знаем, и только редкие кристаллики пирита, содержащего немного меди или халькопирита, попадают нам в пегматитах и в жильном мончиките. Из г а л о и д н ы х известен частый, но не обильный флюорит, из о к с и д н ы х исключительно редок магнетит, совершенно единичен кварц (см. ниже), нередки налеты марганцевых окислов, но зато в жилах и контактах часто встречаются ильменит, повидимому, базаномелан и с ним очень редкий циркон. К окислам мы относим воду и фирновый лед вершин и ущелий. Совершенно нет карбонатов, кроме ничтожных корочек кальцита (см. ниже), нет сульфатов, а из ф о с ф а т о в нам известен весьма частый и типичный зеленый фторапатит, образующий целые жилы.

Несомненно, что главное богатство составляют с и л и к а т ы, очень часты п и р к о н о с и л и к а т ы, т и т а н о с и л и к а т ы, т и т а н а т ы и с и л и к а т ы с р е д к и м и з е м л я м и.

К первым мы относим: полевые шпаты (микроклин, ортоклаз, альбит), нефелин, содалит, нозеан, канкринит, анальцит, натролит, томсонит, эгирин, арфведсонит и близкие к нему роговые обманки, титановый пироксен, эгиринавит. В жильных породах еще биотит, оливин, обыкновенная роговая обманка и змеевик.

Ко вторым относятся обильные и прекрасные энколит и эндиалит и, вероятно, ловенит и лампрофиллит.

К титаносиликатам — энigmatит и весьма частый астрофиллит, а к цероиттросиликатам, вероятно, мозандрит и близкий к нему открытый нами в нескольких пунктах минерал из группы ионструпита.

Кроме того, среди жильных выделений массива отмечаются, как составная часть пород, оливин, серпентин, биотит.

Наконец, к группе комплексных силикатов примыкает весьма обычный сфен, к титанатам — перовскит (только микроскопический) и открытый И. Г. Кузнецовым лопарит из группы инопита, а в качестве ниоботанталата вероятный, но еще не доказанный пироклор.

Повидимому, этим не исчерпываются минералы района, и внимательное минералогическое исследование откроет еще ряд совершенно новых минеральных видов¹.

¹ Новые, до сих пор не определенные минеральные виды привезены моими экспедициями 1920 и 1921 гг.

На основании приведенных данных мы видим, что минеральная ассоциация щелочных массивов весьма типична и что для нее характерен ряд редких и очень сложных минеральных тел, среди которых самыми редкими, как это ни странно, являются кальцит и кварц, найденный только в одном месте эндоконтакта хибинита.

Элементы

Геохимия центральных щелочных массивов не может быть пока выяснена с достаточной детальностью, так как отсутствуют не только анализы ряда редких минералов, но даже их простое видовое определение¹. Мы можем только сказать, что из 23 известных здесь элементов складывается необычайно стройная картина геохимии щелочных пород вообще, с фактически полным отсутствием поля жильного, слабым содержанием Mg, Fe, Ca, преобладанием Na над K, огромным развитием Ti и Zr и мало заметным содержанием группы Y, TR, Nb, Ta и Th.

Нижеследующая таблица передает ассоциацию элементов в том несовершенном виде, в котором она сейчас может быть дана без анализов минералов.

Водород в виде гидроксильной группы и в виде водных соединений играет довольно интересную роль. В то время как каолинизация массива идет в ничтожных размерах, при ближе не изученных, но совершенно специальных условиях выветривания, гидротермальная цеолитизация в центральной части Умштека носит характер крупного геохимического процесса, охватывающего целые зоны преимущественно в центре самого излияния магм.

Щелочные массивы Кольского полуострова

Ряды	I	II	III	IV	V	VI	VII	0	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	Ряды
1	H	—	—	—	—	—	—	.	.	.	.	C	.	O	F	.	2
3	Na	Mg	Al	Si	P	(S)	Cl	.	(.)K	Ca	.	Ti	.	.	Mn	Fe	4
5	(Cu)	.	.	.	.	.	.	.	.	.	Y	Zr	(?)Nb	?	?	.	6
7	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	TR	(?)Ta	?	?	.	8
9	.	.	.	.	.	.	?	.	?	.	.	Th (?)	.	.	—	—	10

См. примечания к таблице на стр. 84.

Углерод играет ничтожную роль в минералах массива: в качестве первичной составной части углерод входит в редкие микроскопические зерна канкринита, часть которого, несомненно, первична, тогда как другая как будто связана с гидротермальным изменением элеолита. Кальцит является редчайшим минералом района (наравне с кварцем), и единственная корочка его, найденная не *in situ* руководимой мной экспедицией 1920 г., хранилась как редкость. Никаких признаков карбонатных пород или мощ-

¹ Еще меньше у нас геохимических данных о минералах щелочных пород Умбы

ных моффетных выделений мы не имеем. Только экспедиции 1921 г. удалось в ущелье Гекмана открыть пегматитовые жилы с довольно крупными выделениями канкринита, в которых его образование, вероятно, связано с цеолитной фазой гидротермального или эпимагматического процесса.

К и с л о р о д не играет какой-либо особенной роли в соединениях масивов, содержащих большое количество недоокисленных соединений (FeO , например). Играет он некоторую роль в процессах поверхностного разрушения массива, в которых в связи с накоплением гумусовых веществ идет образование комплексных гуминовокислых соединений окиси железа.

Ф т о р. Среди немногочисленных пневматолитических элементов главную роль играют F и Cl , первый в меньших количествах, чем в норвежских жилах. Наибольшее количество фтора связано с апатитами и флюоритом, немного фтора должно входить в ловенит и мозандрит, если их определения окажутся правильными. Флюорит, как таковой, в жилах не очень редок, но лишь в ущелье Рамзая, как и в контактах северо-восточной части Умштека, встречается не в виде ничтожных вкраплений, а в более крупных количествах.

Вообще роль фтора, как элемента минералообразования, незначительна, но как агента минерализации — громадна, что мы видим по широкому распространению флюорита в районе Умбы.

Н а т р и й преобладает над другими щелочными и щелочно-земельными металлами, и его количество в породах доходит до 17 % (в уриттах). Поражает обилие натровых силикатов не только в магматической стадии, но и в гидротермальной — это основной элемент щелочной провинции, определяющий ход ее химических реакций.

М а г н и й в нормальных породах встречается в небольших количествах, лишь изредка скопляясь в количестве до 6 % в основных жильных выделениях. Поражает отсутствие магния в большинстве даже меланократовых минералов (эгирине, астрофиллите, эвдиалите, энigmatите).

А л ю м и н и й — один из весьма важных металлов. Он определяет очень высокое содержание глинозема в среднем составе пород — обилие полевых шпатов и эеолита определяет высокий процент глинозема, количество которого в меланократовой части, однако, невелико.

К р е м н и й. При сравнительно не очень низком среднем содержании пород кремнезема поражает почти полное отсутствие кварца; во всем массиве (исключая, конечно, контактные зоны) кварц абсолютно отсутствует и нигде, даже в шлифах, в качестве каких-либо вторичных соединений не обнаружен. Единственные находки кварца Рамзаем относятся к своеобразным контактным брекчиям северо-восточной части массива Умштека, где разведенные остатки кварца и плагиоклазов сопровождаются фиолетовым флюоритом. Наконец, в качестве минералогической редкости кварц был обнаружен экспедицией 1921 г. в больших и красивых кристаллах горного хрусталя в эндоконтакте эеолитового сиенита.

Ф о с ф о р. Апатит является в некоторых жильных процессах довольно обычным, причем вместе с ильменитом он образует своеобразные жилки в западной части массива, а в многочисленных пунктах центральной части образует своеобразную, еще не изученную жильную эгирин-эеолит-апатитовую породу.

С е р а принадлежит к очень редким элементам и в соединении с тяжелыми металлами нам совершенно неизвестна, если исключить мельчайшие зерна пирита и халькопирита, обнаруживаемые в мончикитах и ряде отдельных пегматитовых жил. Сера входит в виде S и частично SO_3 в первичные минералы области — в особый содалит и нозеан.

Х л о р является очень важным пневматолитическим элементом как самой щелочной породы, так и ее пегматитов, занимая несомненно более важное место, чем фтор. Значительные количества этого элемента рассеяны в составе эвдиалита — эвколита и первичного содалита.

К а л и й уступает очень сильно натрию в минералах и играет лишь подчиненную роль.

К а л ь ц и й, по сравнению с магнием, встречается в несколько больших количествах, но все же в среднем составе пород не превышает 2—3%, достигая 12% лишь в некоторых основных породах. Довольно высокое содержание кальция обнаруживается в пегматитовых жилах, так как он входит в состав эвдиалита, апатита и плагиоклаза.

Т и т а н принадлежит к наиболее типичным и важнейшим элементам самого массива. Правда, он нигде не образует очень больших скоплений, нигде не может быть отнесен к практически важным ископаемым, но его геохимическая роль огромна. В среднем содержание TiO_2 в породах достигает 2,5% причем наиболее важными минералами, концентрирующими этот элемент, являются: ильменит в больших пластинках контактных пегматитовых и специальных ильменит-полевощпатовых жил, титановые роговые обманки и авгиты нескольких типов, местами очень обильный сфен, весьма обычный, особенно в Лужеве, астрофиллит и лампрофиллит и, наконец, еще до сих пор не анализированный, но богатый титаном энigmatит. Среди ближе не определенных редких минералов (мозандрит, ловенит, перовскит, лопарит и др.) имеется ряд соединений титана. Во всяком случае, титан является одним из типичнейших элементов всей щелочной провинции.

М а р г а н е ц в общем в породах не очень обычен, но, по сравнению с тоже не очень распространенным железом, играет некоторую роль, изредка накапливаясь в больших количествах (астрофиллит, энigmatит).

Ж е л е з о, как только что указано, очень большой роли не играет, по преимуществу находясь в закисном состоянии. Интересно отметить большую бедность пород магнетитом, заменяемым ильменитом. Даже в более основных и меланократовых породах железо в своих кислородных соединениях не превосходит 10—12%.

М е д ь встречена в пчитожных зеленых выцветах при окислении редких зернышек колчедана в нескольких пунктах массива.

И т т р и й. Мы пока не можем говорить определенно о нахождении этого элемента, хотя присутствие его весьма вероятно в ряде неопределенных минералов (например, в мозандрите).

Ц и р к о н и й наравне с титаном играет огромную роль в массиве в составе ряда сложнейших цирконосиликатов — эвдиалита, ловенита, мозандрита и, вероятно, ряда других (вероятно, и лампрофиллита). Этим и объясняется довольно высокое содержание окиси циркония в самой породе массивов. Любопытно отсутствие среди первичных минералов эвтеолитового сиенита циркона, который впервые встречен нашей экспедицией в ильменитовых и цеолитовых жилах более поздней генерации.

Н и о б и й и **т а н т а л** химически не доказаны, но весьма вероятны в часто встречающемся минерале, близком к пирохлору.

Р е д к и е з е м л и, по видимому, присутствуют, но до сих пор аналитически доказаны только в лопарите.

Генетические циклы

По взглядам Рамзая и других исследователей, щелочные массивы Кольского полуострова представляют мощные лакколиты, внедрившиеся в об-

ласти зоны опускания между архейским щитом и покрывающими его палеозойскими осадочными породами.

Главная масса массивов застыла спокойно под покровом осадочных пород, в глубинах получая крупное зерно беспорядочно расположенных минералов, частью совершенно идиоморфных и сохранившихся неизменными. В более высоких горизонтах, охлаждаясь параллельно стенкам, изверженная масса застыла в своеобразных глубинных покровах, получив гнейсовидное строение, и, застывая в известной последовательности сверху вниз, разбилась на ряд горизонтальных слоев — поясов дифференциации: наверху — лампрофиллитовый луаврит, далее — эвдиалитовый луаврит, затем — типичный луаврит и, наконец, хибинит. На востоке вся эта свита пород сохранилась, на западе она оказалась размытой грандиозными до- и послеледниковыми процессами эрозии, сохранились лишь глубинные части. Одновременно с этим пло и распределение отдельных химических элементов: Fe, Zr и Ti оказались в более высоких горизонтах, тогда как в глубинах сохранились лейкократовые части, богатые нефелином и полевыми шпатами. Одновременношло образование мощных трещин, заполнявшихся пегматитами, тесно связанными с самой породой. В сложном одновременном процессе кристаллизации здесь отлагались крупные индивидуумы редчайшего энigmatита, прекрасные розовые кристаллы эвдиалита обволакивались лучистым эгиринном, а золотистые пластинки астрофиллита и лампрофиллита перескакали массами буровато-красного эвколита. Лишь изредка оставались свободные пустоты, в которых высывались кристаллики ильменита, арфведсонита, цеолитов и редкого циркона.

Сложные процессы пегматитовой кристаллизации еще только исследуются; они дадут блестящую картину химических реакций, в которых принимал участие ряд редких элементов.

И одновременно с этими процессами дифференциации и выделения пегматитов шла контактная переработка окружающих лакколиты пород: горячим дыханием, бедным летучими сильнодействующими элементами, видоизменялись эти гнейсы, глинистые сланцы и песчаники; ближе к контакту видоизменялся и сам сленит, беднее эвколитом, но тем сильнее и неоднороднее проявлялось в нем образование жил и пегматитовых образований и тем интереснее шла его минерализация.

Мы не видим здесь ни сильных эманаций, ни сольфатарной, ни мофетной деятельности. Главным деятелем метаморфизма были пары воды. После прекрасно выраженной фазы магматических выделений, мы почти не видим тех образований, которые составили красоту норвежских месторождений: почти совершенно отсутствует фаза пневматолитическая с летучими соединениями Be, B, F и Li, но зато перед нами богатая гидротермальная стадия, дающая начало различным цеолитам, вместе с молодым эгиринном и редким плавиковым шпатом.

Новые пароксизмы вулканического процесса принесли с собою новые более основные магмы — темные породы типа иолита и тералита внедрились в еще не остывший Хибинский массив, и на смену им, уже после остывания, пришли частью более кислые, частью более основные породы — жилы с тингуаитами и мончикитами.

Наступил длительный период покоя, и в течение долгого континентального периода, который тянулся, вероятно, от карбона до первых северных ледников, мощная эрозия смывала покров, скрывавший погребенные в нем лакколиты, разрушая архейский щит, размывая и освобождая из-под палеозойского покрова древние массивы. Еще до наступления ледниковых масс уже намечалась современная конфигурация Хибинского мас-

сива: покрылись доверху общим ледяным покровом и щит Фенноскандии, и щелочные горы, а могучие ледники, наступая с запада, далеко разнесли по северо-востоку России валуны щелочных пород, посеяв их в изобилии даже за Вологдой.

Огромная послеледниковая эрозия завершила работу воды и льда, и постепенно вырисовался современный ландшафт горных хребтов в их прекрасной химической неприкосновенности и свежести. И действительно, трудно говорить о большей неприкосновенности и большей свежести, чем та, которой отличаются массивы Умптека и Луавра, — химического выветривания здесь почти нет, и только механическое разрушение в грандиозном масштабе ведет свою работу измельчения минералов пород. Их дальнейшая судьба нам неизвестна, но на восточных берегах живописной Имандры, под лесным покровом лесной тайги еще таятся интереснейшие химические процессы: превращение в почвенный покров механического мелкозема полевых шпатов, нефелина, арфведсонита и эгирина, выщелачивание растворимых щелочных элементов и накопление среди гумусовых остатков соединений железа, титана и марганца.

А у подножья величайшего в мире щелочного Хибинского горного массива бурные белые реки намыывают странные, незнакомые нам пески: из них сложены берега прекрасного озера Имандры, из них на далекое протяжение складывается своеобразный почвенный покров, обогащенный кислыми элементами; в этих песках все нам непривычно — и довольно крупное зерно, и зеленоватый цвет, и самый состав: черные крупинки — это арфведсонит, эгирин, энigmatит, зеленовато-серые — эеолит и полевые шпаты, и только в небольших количествах (не свыше 25 %) среди мельчайших песчинок мы различаем кварц и красный полевой шпат, принесенный с запада, с древних гнейсовых вершин Мончи- и Чуньтундры.

Заключение

На основании сказанного, с геохимической точки зрения, мы приходим к следующим выводам:

1. Щелочные массивы центральной части Кольского полуострова и, вероятно, ряд других аналогичных выходов этого района принадлежат к особой естественной ассоциации элементов, характеризующимся избытком Na, Ti и Zr.

2. Самым богатым генетическим типом этих областей являются пегматитовые жилы разных типов, обогащенные редкими элементами.

3. Совершенно особым типом процесса является образование пегматитовых жил в центральной части, по своему строению связанных с механическими процессами передвижения магмы при застывании массива.

4. Весьма вероятно нахождение в жилах этих массивов, равно как на контактах, редкоземельных соединений.

5. Химическое выветривание *in situ* почти отсутствует, заменяясь выносом щелочей, сильным механическим измельчением и сносом мелкозема в долины и к берегу озера Имандры.

6. Геохимически Хибинские массивы сходны с некоторыми массивами южной Гренландии, отчасти Арканзаса, и позволяют не только их сравнивать между собой, но и взаимно пояснять генетические процессы.

Главнейшая литература

Для сравнения по Фенноскандии вообще

- W. C. Brögger. Die Mineralien der Syenitpegmatitgänge der Südnorwegischen Syenite. Zs. Kryst. u. Min., 1890, XVIII.
- W. Ramsay a. H. Berghell. Geol. Fören. Stockholm, 1891, XIII, 300. (Jiwaara).
- J. Sederholm. Arch. Eruptivgesteine. Tscherm. Min., Petr. Mitt. 1891, XII, 97.
- W. Ramsay u. Nyholm. Bull. Com. géol. Finl., 1895, № 1. (Канкринитсепит).
- J. Sederholm et W. Ramsay. Guide d. exc. du VII Congrès géol. SPb., 1897. (Les excursions en Finlande).
- J. Sederholm. Ueber eine archaische Sedimentf. Bull. Com. géol. Finl., 1897, № 6.
- V. Hackmann. N. Mitt. über den Jolothmassiv in Kuusamo. Bull. Com. géol. Finl., 1899, XI, p. 45.
- J. Sederholm. Om granit och gneiss. Bull. Com. géol. Finl., 1907, № 23.
- J. Sederholm. Bull. Com. géol. Finl., 1910, № 24 (Roches préquat. de la Fennoscandie).
- N. Ussing. Meddel. Grönland, 1912, XXXVIII. (Щелочные массивы Гренландии).
- П. П. Сушинский. Материалы по изучению контактов глубинных пород с известняками. Труды СПб. Об-ва естествоиспыт., 1912, XXXVI, вып. 5.
- J. Sederholm. Die Bruchfalten von Fennoskandia. Bull. Soc. géol. Finl., 1913, № 37.

По геологии

- И. М. Ренованц. Bemerkung über die Fortsetzung Schwedischer Gebirge ... zwischen dem Weissen Meere und dem See Onega. [Заметка о продолжении шведских гор... между Белым морем и Онежским озером]. Neue Nord. Beiträge, 1781. Jena — Leipzig, 132.
- Широкшин. Горн. журн., 1835, I (кн. III), 397. (Кандалакша).
- В. Бетлинг. Bericht über eine Reise durch Finland und Lappland. [Сообщение о путешествии по Финляндии и Лапландии]. Bull. Acad. Sci. 1840, VII.
- А. Ф. Миддендорф. Beiträge zur Kenntniss des Russischen Reiches. [Материалы к познанию Российского государства]. СПб., 1845, II (XI), 137 (Bericht... Inner-Lappland).
- А. А. Иностранцев. Материалы геол. России, 1877, VII. (Повенецкий уезд).
- Г. П. Гельмерсен. Geolog. Beobacht. Olonez. Bergrevier. [Геологические наблюдения по Олонецкому горному округу]. 1882. Beiträge zur Kenntniss des Russischen Reiches (II F.), V. [Материалы к познанию Российского государства]. С приложением химических исследований К. Шмидта.
- Н. Кудрявцев. Кольский полуостров. Труды СПб. об-ва естествоиспыт., 1882—1883, XII, 233, XIV, 13, особ. 97.
- Б. Б. Коленко. Материалы геол. России, 1885, XII, 23. (Геологические очерки Заонежья).
- И. С. Поляков. Физико-географическое описание юго-восточной части Олонецкой губ. Зап. Русск. Геогр. об-ва, 1886, XVI, № 2.
- С. В. Работ et С. В. Velain. Explorat. de la Laponie. Bull. Soc. géogr. Paris, 1889, X, 457; 1890, XI; 1891, XII, 49; 1892, XIII.
- W. Ramsay. Nephelinsyenit von Kola. Fennia, 1890, III, 5—7; 1892, V, № 7—8; 1894, XI, № 2; 1897, XV, № 2, 4 (1900, XVI, № 1).
- М. Мельников. Зап. Мин. об-ва, 1893, XXX, 105, 240, 391.
- Eichleiter. Verhandl. Geol. Reichsanst., Wien, 1893, № 9, 217. (Анализы умпекских пород).
- М. Миклуха-Маклай. Геологический очерк Олонецкого уезда. Материалы геол. России, 1897, XVIII, 111 — 264.
- Б. А. Риппас. Изв. Русск. геогр. об-ва, 1899, XXXV, 292—312. (По Варзуге и Поною).
- А. Шеповальников. Горн. журн., 1901, I, 337. (Железные руды Туломозерской дачи).
- Ф. Н. Чернышев. Зап. Мин. об-ва, 1901, XXXIX, I, прот. 29—33.
- B. Frosterus. Bull. Com. géol. Finl., 1902, 13.
- W. Ramsay. Geol. Olonetz. Gouv. Fennia, 1904—1905, XXII, № 7.
- В. Мironov. Геологический очерк островов Великой губы. Труды студ. научных

- кружков, СПб. унив., 1910, II, 59.
- П. А. Борисов. Очерк геологии полезных ископаемых Олонецкой губ. СПб., 1910. (Список литературы).
- W. Ramsay. Über die Verbreitung der Nephelinsyenitgeschiebe. Fennia, 1912, XXXIII, 1—17.
- В. М. Тимофеев. Геологический очерк бассейна р. Свири. Путев. геол. эскп. I Всеросс. геол. съезда. Пг., 1922, 86.
- Б. М. Куплетский и А. А. Полкавов. Геологический очерк Хибинского массива. Там же, стр. 107.

По минералогии и геохимии

- Энгельман. Горн. журн., 1838, I, кн. 2, 191—249.
- Комаров. Горн. журн., 1842, I, 189.
- Д. Киль. Горн. журн., 1873, II, 310. (Рудные жилы Мурманского берега).
- A. Stelzner. N. Jb. Min., Geol. u. Paläont., 1880, II, 102. (Петрография кристаллических сланцев Кандакшской губы).
- С. Буквецкий. Горн. журн., 1884, II, 320. (Галенит Мурмана).
- В. Рожков. Бергкомпания на Медвежьих островах. Горн. журн., 1885, II, 274.
- Ф. Ю. Левинсон-Лессинг. Олонецкая черная земля. Труды СПб. об-ва естествоиспыт., 1885, XVI (вып. II), прот. засед. 91.
- Ф. Ю. Левинсон-Лессинг. Олонецкая диабазовая формация. Труды СПб. об-ва естествоиспыт., 1888, XIX.
- Подгаецкий. Мурманский берег и его рудные богатства. Горн. журн., 1891, I, 88.
- Е. С. Федоров. Друзиты Белого моря. Изв. Сельскохозяй. ин-та Петр.-Раз., 1896, № 1.
- Б. Попов. Зап. Мин. об-ва, 1900, XXXVIII, прот. 28—31.
- Е. С. Федоров. Горн. журн., 1904, II, 98, 186, 368; III, 80. (Минералогическое и петрографическое описание берегов Белого моря).
- W. Ramsay. Beiträge geol. präkambr. Bild. Gouv. Olonetz. Fennia, 1904—1905, XXII, № 7.
- С. Яковлев. Труды СПб. об-ва естествоиспыт., 1905, XXXIII, 53. (Аплитовые жилы в диабазах ю.-з. Олонии).
- С. Яковлев. Über die Ostgrenze des präcambrischen Systems in Finland. [О восточной границе докембрийской системы в Финляндии]. Zbl. Min., Geol. u. Paläont., 1906, № 19, 600.
- W. Ramsay u. Wahl. Fennia, 1908, XXIV, 3. (Диабазы Южного Прионежья).
- Д. Попович. Изв. Арх. об-ва изуч. русск. сев., 1911, № 19. (Жилы Мурмана).
- С. Кюранди. Изв. Геол. ком., 1912, XXXII. Годовой отчет, стр. 120; XXXIV, № 2, 325—338.
- А. К. Болдырев. Зап. Акад. Наук (VIII сер.), 1913, XXXI.
- С. Яковлев. Прот. СПб. об-ва естествоиспыт., 1913. (Химический состав диабазов юга Олонии).
- Б. Л. Исаченко. Исследования над бактериями Северного Ледовитого океана. Пг., 1914 (изд. Деп. землед.).
- П. А. Борисов. Кристаллические силикаты из доломитов окрестностей г. Поленца. Изв. Акад. Наук, 1917, 1289.
- О. О. Баклувд. Скаполит с р. Кавды. Изв. Акад. Наук, 1917, 19. (Кемский уезд).
- Th. Vrenner. Theralit und Ijolith von Umptek. Bull. Com. géol. Finl., 1920, LII.
- Е. Костылева и Э. М. Бонштедт. Предварительный отчет о минералогической экспедиции 1920 года на Хибинский массив. Труды Сев. научно-промысл. эксп., 1921, X.

Область вторая

КЕМБРОСИЛУР И ДЕВОН СЕВЕРО-ЗАПАДА РОССИИ

ГРАНИЦЫ

На геологической карте Европейской России вторая геохимическая область вырисовывается очень рельефно, в виде большого треугольника — так называемого девонского поля, с углами приблизительно в Виндаве,

Рославле и Тихвине. От главного поля отходят два крыла: северное, тянувшееся до Онеги на Белом море, и южное, огибающее с юга центральный каменноугольный бассейн. Это последнее частично включено мной в описание третьей области.

В административном отношении в область входят: полностью Курляндия, Эстляндия и Лифляндия, Петроградская, Псковская, Витебская губернии, частично северная часть Ковенской губ., небольшая северная часть Могилевской губ., все западные уезды Смоленской губ. без южной части Рославльского уезда, западные уезды Новгородской губ., юго-восточные части Олонецкой губ. и весьма небольшая часть Архангельской (около Онеги).

ГЕОЛОГИЯ

С геологической точки зрения область характеризуется рядом полеозойских отложений, если и хорошо изученных стратиграфически, то все же не позволяющих показать полной картины палеогеографического характера. Область, занятая кембросилуром и девоном, представляет берег большой фенноскандинавской суши, гранитные и гранитогнейсовые массы которой, равно как и складки древних интрузивных пород, были оборваны с юга и востока системой сбросов.

Кембрийское и нижнесилурийское моря протягивались в широтном направлении к Уралу, сменяя мелководные фации нижних горизонтов на более глубокие осадки верхних. Накопление осадков шло не без перерывов; так, в западной части мы наблюдаем ясный перерыв между глауконитовой и ортоцератитовой толщами, причем в основании этих толщ легли конгломераты с чечевичками бурого железняка и окатанными фосфоритами.

Заключив свиту отложений эхиносферитовыми горизонтами, море значительно сузилось к началу верхнесилурийских отложений, лишь в виде отдельных заливов врываясь в новый материк, лежавший у подножья скандинавских массивов. Море отступало к западу; эта суша в нашем районе сохранялась и в период нижнего девона, и в то время как на востоке с одной стороны и на западе с другой — было глубокое море, в описываемом районе мы наблюдаем материк или прибрежные полосы мелкого моря. К среднему девону море залило и эту поверхность, положив начало в главном поле смене песчаников известняками и вновь песчаниками, а в северном крыле отложив только прибрежные пески.

Из этой картины в грубых чертах мы можем сделать нижеследующие важные для нас выводы. Кембрийские и силурийские отложения, вплоть до эхиносферитовых известняков, на востоке не обнаруживают перерывов, хотя и появились в результате крупных колебаний уровня моря, тогда как на западе наблюдаются перерывы после глауконитовой толщи. На востоке на эту свиту (или даже на ортоцератитовый известняк) непосредственно ложатся известняки и песчаники среднего девона, обнаруживая перерыв материковой фазы или широкий размыв ее, вплоть до обнажения синей глины. На западе частично этот перерыв захватывает только нижний девон. Сами девонские осадки носят в подавляющем количестве прибрежный характер, и лишь средние горизонты главного поля обнаруживают перед нами мергелисто-доломитовые и известняковые слои более глубоководных или лиманных отложений.

Верхнедевонское море сменяется мелководными прибрежными отложениями и, отходя на восток, перекрывается такими же мелководными осадками каменноугольных бассейнов: наша область остается во всю

дальнейшую геологическую историю материком, и лишь ледниковая эпоха приносит новые явления в геологическую характеристику области. Ледниковая эрозия из пентра, расположенного на севере границы Финляндии, Норвегии и России, с одной стороны эродировала нижележащие палеозойские слои, вероятно по большей части покрывавшие весь Фенноскандинавский щит, частично смяв края финского глинта (р. Поповка) и вызвав в них частные поверхностные складки и сбросы, частью же покрыв ее ледниковым покровом с северными валунами.

Довольно широкое льдильное арктическое море залило озерный район, соединив на время Финский залив с Белым морем, а потом, сузившись в пресноводный бассейн (анциллово море), наконец, приобрело границы, очень близкие к современным в виде литоринового моря.

Частью к третичным, частью даже к послеледниковым процессам Седергольм относит главные сбросы по южной границе Фенноскандинавского щита и опускание озерной полосы, окаймляющей с юго-востока этот массив. Хотя возраст этих сбросовых линий, предопределивших современные контуры моря, и не является доказанным, но очень важно отметить, что геохимически они не оказали влияния на общие судьбы области, и до сих пор ни один геохимический процесс севера мы не можем поставить в связь с этими дислокациями большого масштаба, если только действительно они приурочены к столь недавним моментам исторического прошлого, как это думает финляндский геолог.

Ледниковый покров, сковавший весь район своими глинистыми и песчанистыми осадками, подчинил себе геохимически процессы почвенного покрова и в сложной, пока еще мало раскрытой картине подзолообразования положил начало тем же биохимическим реакциям, которые кратко отмечены были при описании первой области.

Примечание. В противоречии с геологической картой Геологического комитета, значительная часть русских геологов относит к описываемой области также кварциты Прионежья, хотя геохимически они тесно связаны с самим Фенноскандинавским массивом. Представляя собою единственные метаморфизованные механическими деятелями отложения девона, они прекрасно иллюстрируют влияние орогенических процессов на химические осадки. Однако как эти кварциты, так и «каменноугольные» известняки Олонии рассматриваются мною при описании Фенноскандинавского массива, тем более, что финляндская школа совершенно определенно признает за ними по большей части архейский возраст.

Совершенно особняком в западной части Курляндии стоят небольшие островки пермских, юрских и меловых отложений. Если первые представляют часть более западных отложений, то три последних являются лишь остатками западных крыльев больших южных морей, простиравших свои воды к северо-западу. Большого геохимического значения эти отложения не имеют.

ОРОГРАФИЯ И МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Равнинный и плоский характер основного юго-западного поля не дает благоприятных естественных условий для сбора минералогического материала, тем не менее в отдельных пунктах более расчлененного рельефа мы получаем хорошие обнажения. Если на востоке линия глинта, т. е. край размыва эопалеозойской свиты балтийскими волнами, носит мягкий и пологий характер склона, то на западе она местами приобретает характер обрыва с массовым накоплением обломков в отдельных пунктах. Большое количество естественных разрезов с великолепными местами для наблюдения геохимических процессов и сбора минералогического материала представляют многочисленные каньонообразные долины ручьев и рек, пересекающие линию глинта (и частью являющиеся очень старыми, до-

девонскими ущельями); таковы, например, знаменитые Поповка и Пулковка около Петрограда, ущелье у Капорья и т. д.

Вторая группа естественных обнажений расположена по течению рек Западной Двины и Великой, классические выходы пород вдоль берегов которых дают совершенно незаменимый научный материал. К этим естественным обнажениям нашей области присоединяется и большое число крупных и мелких каменоломен, выработок песку, известняка, плиты, гипса, глины и красящего глауконита, а в самое последнее время и крупные выработки кукурсита. Хотя в общем в области известно лишь незначительное количество полезных ископаемых, тем не менее значительные потребности крупных городов в строительных материалах создают вокруг них целые области искусственных выработок, столь ценных для геолого-минералогических исследований. Не меньшее значение имеют и буровые скважины на воду, особенно замечательные в Петрограде и отчасти в Ревеле.

МИНЕРАЛЫ

Минералы не разнообразны и мало интересны с чисто минералогической или кристаллографической точек зрения; они сравнительно недурно изучены и сведены К. И. Гревингом почти для всего района.

Из самородных элементов отмечается сера, как обычный продукт окисления скоплений колчеданов. Такое мнение, однако, не совсем верно, и за серу обычно ошибочно принимаются сульфаты окиси железа, тогда как сера выделяется в самородном виде лишь при обжиге этих колчеданов и лишь в исключительных случаях образуется как продукт процесса естественного окисления. В качестве серного цвета сера осаждается при окислении сероводорода сернистых источников, вытекающих из среднедевонских отложений.

Из сернистых соединений сколько-нибудь большие скопления, кроме H_2S , образуют только пирит и марказит. При этом очень характерно преобладание пирита как в диктионемовом сланце, так и в глауконитовом песчанике и некоторых горизонтах известняков, тогда как марказит как будто бы исключительно приурочен к верхним горизонтам кембрийских песков непосредственно под диктионемовым сланцем. Последнее образование, повидимому, связано с разложением вод водоносных горизонтов, богатых сероводородом.

Чисто минералогическое значение имеют вкрапления сфалерита и галенита в разные горизонты, а также скопления медьсодержащего колчедана или даже халькопирита.

Из окислов отмечаю: кварц, преимущественно в виде механического осадка, трещет в новейших отложениях торфа, манганит в продуктах окремнения девонских рыб и гидраты окиси железа, главным образом, в виде железистого осадка источников и бобовых озерных и болотных руд.

Из галогидных можно говорить не столько о самом галите, сколько о псевдоморфозах кальцита, доломита и гипса по каменной соли в среднедевонских и в меньшей степени в верхнесилурийских отложениях.

Азотнокислые соли представлены только калиевой селитрой (современного происхождения), углекислые — рядом карбона ов кальция (кальцит, известковый туф), магния (доломит) и меди. Отсутствие сколько-нибудь ярко выраженных катагенетических реакции обуславливает однообразие этих образований.

Сернокислые соединения представлены более характерно и интересно: гипс, барит и целестин (последние два очень редки), эпсомит, мелантерпт, кв. цы. Последние три минерала связаны с окислением

колчеданов. Из фосфатов отметим довольно редкий вивианит и фосфорит как в виде типичных желваков, так и целых раковин *Obolus*. Среди силикатов известны только: глаукозит, образующий огромные скопления большого научного и практического интереса, калиевая слюда, попадающаяся в кембрийских и девонских песчаниках, вероятно как продукт изменения других алюмосиликатов кристаллических пород, и мельчайшие кристаллики полевого шпата в известняках различного возраста.

Очень своеобразна и интересна группа соединений углерода: антрацитоподобное вещество, бурый уголь, янтарь, асфальт, кукурсит (см. углерод, стр. 109).

ЭЛЕМЕНТЫ

Геохимические особенности силура и девона русского северо-запада, благодаря трудам дерптской школы химиков и минералогов, изучены весьма обстоятельно, и, может быть, ни для одного района России, кроме еще окрестностей Киева, мы не имеем столь детальных химических анализов и учета распространения отдельных элементов, как для района Ревель — Дерпт — Рига — Петроград. Повидимому, вряд ли скольнибудь крупные изменения или дополнения смогут быть внесены в геохимическую схему района, довольно сложную и весьма характерную.

Всего нам известно 26 химических элементов, из коих большинство относится к обычному полю, а 9 — к необычному. При этом весьма характерным, хотя и очень редким, является рассеяние двух элементов Pb и Ba и отчасти Cu и Zn, которые характеризуют строго определенные горизонты всей свиты. Повидимому, основным источником для этих элементов является инфильтрация из девонских отложений или девонского материка, к каковому времени (среднему или верхнему девону) мы могли бы приурочить тот первоисточник этих металлов, который обогатил ими некоторые из нижележащих слоев. Отчасти эта мысль находит себе подтверждение в том, что на востоке эти образования, совершенно определенно приуроченные к ортоцератитовому горизонту, тем не менее проникли в него из покрывающих и внедряющихся в силур глин девонского возраста (р. Волхов). В большинстве случаев мы должны искать источник этих металлов в периоды не глубинных морских процессов, а процессов, связанных с прибрежными отложениями и размывом материковых массивов¹. Никаких непосредственных следов гидротермальной или жильной деятельности мы не наблюдаем.

Особенно типичной для района является ассоциация химических элементов, создаваемая, с одной стороны, осадком моря небольших глубин (Si, K, Mg), с другой, — и это особенно характерно, — минеральными озерами (Mg, Na, Cl, Br, S). Эти элементы совершенно определенно намечают собой чисто химический цикл осадков, в противоположность биохимическим элементам, какими являются в данной области Ca, P, F, C, N, Fe, S; из последних часть связана с растительными процессами жизни (C, O, H), другая — с животными (Ca, N, P, F, C, Fe, S). Таким образом, наиболее отличительными чертами геохимической ассоциации являются: преобладание обычных элементов и распространение в отдельных горизонтах Ba, Pb и серы как в сульфидной, так и в сульфатной форме.

¹ B. S i m m e r s b a c h. Das Vorkommen von Gold und Silber. Der Geologe, 1918, № 21.

Практически важные и сколько-нибудь большие накопления элементов нам известны лишь для Cl, Br (источники), H_2S , SO_2 (источники), S в сульфатной форме в виде гипса, Ca в форме известняка и C в форме кукурсита.

Геохимическая диаграмма элементов кембросилура и девона северо-запада России

Ряды	I	II	III	IV	V	VI	VII	0	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	Ряды
1	H	—	—	—	—	—	—	.	.	.	.	C	N	O	F	.	2
3	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	.	K	Ca	.	Ti	.	.	Mn	Fe	4
5	Cu	Zn	.	.	.	.	Br	.	.	Sr	.	.	.	.	?	.	6
7	(Ag)	.	.	.	.	.	J	.	.	Ba	.	.	.	.	?	.	8
9	(Au)	.	.	Pb	.	.	?	.	?	.	.	.	.	.	—	—	10

См. примечания к таблице на стр. 84.

В о д о р о д. Для этого газа мы не видим в истории северо-западного района никаких особенностей, которые заставляли бы о них говорить особо. Важно только иметь в виду, что воды, связанные с девонской и силурийской толщей, почти всегда минерализованы и содержат много солей (одни — $NaCl$, другие — $CaCO_3CO_2$). Особенно любопытным является частое содержание в водах сероводорода, что связано с восстановлением гипса в одних горизонтах (средний девон) и разложением колчеданов в других (верхние горизонты синей глины). Нельзя забывать для водорода и соединений в виде углеводородов, асфальтов и углей.

У г л е р о д. Соединения углерода в области заслуживают очень большого внимания. Не говоря о кислородных соединениях, которые в форме карбонатов кальция и магния слагают целые горизонты, необходимо отметить своеобразное распространение этого элемента в форме углистого сланца (диктионемового горизонта), кукурсита (кукерского яруса), своеобразных мало изученных асфальтов (в глауконитовом, пентамеровом и среднем девоне), торфяной массы и сапропеля (в современных и послеледниковых отложениях). Если к этому еще прибавить нахождение антрацитового вещества (грахамита) в ортоцератитовом и эхиносферитовом горизонтах, то мы получим довольно своеобразную и мало ясную с генетической точки зрения картину. Эта картина еще более осложнится, если к ней прибавить бурые угли верхнеюрского возраста по р. Видаве и янтарь, вымываемый морем из коренных олигоценых месторождений.

Несомненно, что определенно первичный тип накопления углеводородов представляют лишь диктионемовый и кукерский сланцы, из коих, вероятно, путем дистилляции, как нам приходится объяснять, образовались

другие незначительные по количеству скопления асфальтоподобных тел в других горизонтах.

Весьма интересные газовые струи метана известны нам на острове Кок-шер: их происхождение, по мнению Миквица, связано с валунными глинами, переработанными кембрийскую глину, однако более вероятно связь с теми же горячими сланцами¹.

Азот. Для азота весьма интересным является накопление совместно с углеводородом в кукерских и диктионемовых битуминозных сланцах, причем в последних, как связанных с животным происхождением, он встречается в несколько больших количествах. Совершенно особняком стоит образование калиевой селитры, как выплетов современных скоплений гуано в девонских известняках. В. И. Вернадский обратил мое внимание на постоянное нахождение азотнокислых солей в подземных водах Прибалтики.

К и с л о р о д. Роль его не велика, кислородная поверхность залегает очень неглубоко, сохраняя в неприкосновенности пириты целого ряда горизонтов. Процессы окисления обычны и не имеют никаких особенностей, приводя обычно к гидратным формам (гидроокиси железа, марганца, водные сульфаты и т. д.).

Ф т о р. Входит в состав фосфоритов ортоцератитового горизонта известняков, сохраняя с фосфорной кислотой отношения, отвечающие фторапатиту. Вероятно в небольших количествах фтор входит в состав обоих чечевичных слоев вместе с 3% фосфорной кислоты. Однако наибольшие количества фтора в виде того же соединения должны быть накоплены в углистых обломных песчаниках. Никаких переменений или миграции соединений этого элемента нам неизвестно.

Н а т р и й. В небольших количествах входит в состав глинистых продуктов различных горизонтов или с хлором образует галит, извлекаемый источниками.

Ма г н и й. Очень большую роль играет магний: в геохимической табл. III (см. приложение) роль магниевых соединений не велика, если исключить те немногие проценты магнезии, кои входят в состав глауконитов или того доломита, который частично замещает кальцит аттраконитовых стяжений диктионемового сланца.

Зато в табл. II роль магниевых соединений огромна, выражаясь в широкой доломитизации, частью первичной, частью вторичной, целых комплексов пород девона.

Интересно отметить, что при окислении пиритов, аналогично образованию гипса в известняках, в доломитах возникает эпсомит, который в виде налета покрывает трещины девонского доломита.

А л ю м и н и й. Почти никакой роли при миграции химических элементов не играет, никаких скоплений нигде не образует, а вместе с кремнеземом широко распространен в виде глинистого вещества различных горизонтов известняков и особенно синей кембрийской глины.

Повидимому, частично при окислении пиритов образуются квасцы.

К р е м н и й большой роли не играет и вообще для него очень характерно чисто пассивное отношение во всех катагенетических реакциях области. В этом отношении здесь наблюдается полная противоположность тем химическим процессам окремнения, которые в столь значительных количествах идут в известняках каменноугольных отложений (см. ниже,

¹ Очень любопытна по всем этим вопросам статья: В. D o s s. Über die Möglichkeit der Erhöhung v. Naphtalagerstätten bei Schmarden in Kurland. Korrespondenzblatt d. Naturf. Vereins zu Riga, 1900, XLIII, 157, особ. 162, 163, 194, 195. См также: L i n s t r o w. Der Krater von Sall. Zbl. Min., 1919, p. 326.

стр. 145). В качестве первичных форм накопления кремния надо отметить: во-первых, кварцевые пески, частично исключительной чистоты, как в кембрии, так и в девонских отложениях верхних и нижних горизонтов; во-вторых, глины как в составе так называемой синей глины, так и в горизонтах известняков, в состав которых входит большее или меньшее количество глины. Наконец, значительное количество кремнезема фиксировано в форме силиката глауконита. Единственные горизонты известняков, в которых химически накоплен кремнезем, — это эстляндские и пентамеровые слои верхнего силура, в которых не только отмечаются кремни, но и кристаллы кварца в трещинах. За исключением этих новообразований в катагенетическом процессе, мы можем отметить еще слабую цементацию некоторых верхних горизонтов кембрийских песков аморфным кремневым цементом и новообразование мельчайших кристалликов полевого шпата (ортоклаза, микроклина, анортклаза и альбита) в известняках глауконитовых, ортоцератитовых и девонских. В общем кварц и халцедон в осадках химического характера являются редкими минералами.

Фосфор. Кроме накоплений вивианита в торфяниках, фосфор связан с рядом фосфоритов в ортоцератитовом ярусе с чечевичными слоями, в которые он входит в небольших количествах и особенно в раковинки *Obolus*, которые составляют весьма внушительные скопления в верхних горизонтах кембрийских песков.

Очень значительные количества фосфора собираются в болотных рудых и железо-марганцевых желваках Балтийского моря.

Сера. Среди других органогенных элементов весьма важным является в области распространение серы, причем для нее типична связь с тремя типами химических соединений: в форме сульфидов с Fe, Zn, Pb (Au, Ag) и в виде H_2S с водородом, в форме сульфатов — с окислами Ca, Mg, Ba и Sr и, наконец, в форме органических соединений, в которых, как, например, в кукурситах, сера входит в количествах свыше 2,5%. Повидимому, к гидросульфидам надо отнести серу морских грязей.

Разложение сероводорода источников, а также очень редкий тип окисления колчеданов дают изредка, в качестве минералогической редкости, самородную серу (первый случай — на Шелони в Псковской губ.; второй — в известняках около Гапсала и по р. Виндаве).

Хлор играет несомненно видную роль, особенно в девонских отложениях, связанных несомненно или с мелководными морскими бассейнами (лиманами), или с минеральными озерами. Хотя в настоящее время нигде не сохранились скопления галита¹, зато псевдоморфозы по кубам NaCl очень обычны, обычны и источники с содержанием этой соли как в девонской области (в среднем девоне) Лифляндии и Курляндии, так и в силурийском плато, примером последних могут служить источники Эзеля и Даго и глубокие артезианские бурения в Петрограде. Сильно минерализованы девонские воды Старой Руссы. Интересно нахождение в прочно связанном виде до 1% хлора в кукурсите (без следов иода).

В общем минерализация вод во всем районе связана почти исключительно с горизонтами среднего девона.

Калий. Его распространение тесно связано с колоссальными скоплениями глауконита, который в небольших количествах входит в состав синей глины, но главным образом образует мощный горизонт песков, песчаников и известняков на диктионемовом сланце. Содержание калия доходит до 8%, чем обуславливается агрономическая ценность

¹ Имеется указание на нахождение глыбы каменной соли в Изборских гипсовых ложах.

глауконитовых толщ, особенно в случае применения андреевской реакции — слабого прокаливании до 500—600°С, благодаря которому глауконит более легко разлагается органическими кислотами.

Примесью глауконита к глинам различных горизонтов можно объяснить небольшое содержание в них калия, который при вторичных процессах катагенеза частично фиксируется в мельчайших кристалликах полевого шпата.

К а л ь ц и й играет огромную роль в глубоководных осадках в виде карбоната и в озерных — сульфата. Никаких особенностей распространения и миграции нельзя отметить, за исключением современного обильного биохимического осаждения в виде карбоната в озерах (так называемый альм, гажа, туф и т. д.).

Т и т а н. Хотя в новейшей литературе не указывается никаких особых титановых минералов, тем не менее в тех областях, где идет разрушение Фенноскандинавского массива, мы замечаем значительный процент титановой кислоты. Так, в почвах и песках побережья отмечалось до 1%, TiO_2 ; до 1% TiO_2 отмечал Г. Струве и в кембрийских глинах Петроградского района.

М а р г а н е ц принадлежит к мало обычным элементам, совершенно неизвестным во всей кембросилурийской толще и накапливаемым исключительно в некоторых горизонтах девонской, где окислы марганца и кремнезем в тесной связи пропитывают остатки рыб. В этих остатках, состоявших ранее из фосфата кальция, К.И.Гревингк наблюдал до 29% гидроокиси марганца. Пищожные намазки вада известны в доломитах среднего девона. Накопление марганца в прибрежных процессах и концентрация его в органических остатках рыб представляют, вообще говоря, довольно обычное явление.

Ж е л е з о больших скоплений нигде не образует, но как органогенный элемент встречается весьма часто в ряде отложений (снизу вверх):

1) в пирите диктионемового сланца и непосредственно под ним лежащих горизонтов оболочного песчаника;

2) в глауконите глауконитовых песков, отчасти вместе с пиритом;

3) в нижнем чечевичном слое ортоцератитового горизонта, равно как и в верхнем эхиносферитового, в виде глинистого лимонита с 3% фосфорной кислоты.

Кроме того, железо встречается:

4) в форме болотных и озерных руд современного возраста (в XVII веке все железо Курляндии добывалось из этих руд), сюда же относятся ортштейновые горизонты в почвенном покрове при образовании подзолов,

5) в форме гидратов окиси железа при окислении растворов источников, вытекающих из некоторых горизонтов, и особенно над синей глиной.

В общем соединения железа незначительны и никаких особенностей распространения или миграции не обнаруживают.

М е д ь известна в целом ряде горизонтов, а именно:

1) в глауконитовом песчанике в ничтожных количествах вместе с кальцитом и баритом, немного и в глауконитовом известняке;

2) главный горизонт медных соединений — в ортоцератитовых известняках и трещинах, их прорезывающих (Волхов, р. Поповка, Феллин, Ревель), в виде медьсодержащего пирита, халькопирита (?), азурита, малахита, медной черни частично вместе с кальцитом и баритом. Странгвейс отмечал даже сульфаты меди на колчеданах Поповки около Павловска; Гельмерсен — натек малахита и медной зелени в известняках там же;

3) в эстляндских слоях нижнего силура (на Нарове) в трещинах кремнистых известняков вместе с пиритом, содержащим медь;

4) в среднедевонских известняках по трещинам — намазки малахита на колчедане (в мергеле у г. Холма и по р. Западной Двине).

Еще Мурчисон обратил внимание на малахит и свинцовый блеск в нижних слоях ортоцератитового яруса; позднее этот вопрос был подвергнут детальному обсуждению П. В. Еремесвым, который на обнажениях Волхова установил связь медных соединений с девонскими глинами, заполняющими трещины в известняке. Этот вывод о позднейшей инфильтрации был подтвержден исследованиями Е. Е. Костылевой. Общая картина всех горизонтов, содержащих медь, заставляет их генетически и хронологически связывать с девоном, хотя детали проникновения медных растворов еще не могут быть даны.

Ц и н к является постоянным спутником свинцовых, в медьшей степени медных соединений и отмечается в виде сфалерита в нижних горизонтах синей глины, в ортоцератитовом известняке Ревеля и в пентамеровом ярусе района Феллина. Количества ничтожны (см. свинец и медь).

Б р о м принимает участие не только в девонских минеральных водах Старой Руссы (0,3 на 10 000 частей воды), но и в силурийских водах артезианских колодцев Петрограда, в которых на один литр приходилось, по анализу Харичкова, 0,0276 г бромистого магния при общем солевом осадке в 3,7475 г. Эти количества брома с несомненностью обнаруживают связь артезианских вод северо-восточных отложений с выщелачиванием древних соленосных толщ, или, вернее, соленосных скоплений в отложениях девона и силура¹.

Ст р о н ц и й. Целестин известен лишь в гипсовых горизонтах среднего девона в Курляндии в виде голубых волокнистых масс. Генетически он очень любопытен, так как встречается здесь вместе с гипсом и углеродистыми скоплениями, напоминая в маленьком масштабе генетическую обстановку третичных отложений Южной России (или Сицилии). На современной русской территории неизвестен.

С е р е б р о отмечается в небольших количествах в продуктах выплавки свинцового блеска из месторождений в пентамеровом ярусе.

И о д отмечается в небольших количествах в составе старорусских минеральных вод, и следы его известны в лиманных грязях западного побережья.

Б а р и й в виде барита, находимого, правда, в редчайших кристаллах, известен в трех горизонтах: среднедевонском доломите (р. Великая, по р. Двине), в ортоцератитовом (Ревель, валун у Феллина) и в нижней толще глауконитового песчаника (р. Поповка близ Петрограда). Любопытно отметить, что во всех трех случаях он встречается вместе с соединениями меди (малахитом) или медьсодержащим пиритом. Происхождение загадочное, не исключена позднейшая инфильтрация из более высоких горизонтов (см. медь).

Интересно ничтожное содержание бария в артезианских водах Петрограда, чему Струве придавал большое значение.

З о л о т о отмечается в ничтожных количествах в продуктах выплавки свинцового блеска из месторождений в пентамеровом ярусе.

С в и н е ц сопутствует меди и отчасти цинку в ряде горизонтов, однако, подобно этим металлам, образуя лишь небольшие скопления чисто минералогического значения:

¹ Эти взгляды находят себе подтверждение в теориях происхождения артезианских вод наших глубоких скважин Ревеля и Петрограда (Н. Ф. Погребов).

- 1) в более глубоких горизонтах синей глины, прожилками в сферосидеритах вместе с пиритом и сфалеритом (Петроград, остров Котлиа)¹;
- 2) в ортоператитовом горизонте (Ревель, Павловск)²;
- 3) в эстляндских слоях (Пахель, по р. Нарове);
- 4) в пентамеровом горизонте района Феллина, где свинцовый блеск даже добывался одно время;
- 5) в девонском доломите по р. Двине.

ГЕНЕТИЧЕСКИЕ ТИПЫ

Общий тип минералообразовательных процессов довольно однообразен и выдержан на всем протяжении описываемой огромной области России. Никаких магматических, поствулканических или гидротермальных процессов мы во всей области не знаем, хотя северная окраина района является областью сбросов и дизъюнктивных дислокаций, в значительной своей части относящейся еще к палеозою или даже доархейским движениям, а по мнению Седергольма и к новейшим процессам, — все же во всем районе мы никаких непосредственных результатов этих движений не видим, и ни один геохимический процесс мы не можем поставить непосредственно в связь с посторогенетическими явлениями. Правда, косвенные указания на наличие поблизости таких процессов мы имеем в виде скоплений сернистых тяжелых металлов, повидимому инфильтрованных сверху в период, как будто бы отвечающий девону. Но это лишь известные наведения, которые, впрочем, повторяются и позднее в нижнекаменноугольных отложениях и по отношению к которым определенной генетической картины нет.

Любопытно отметить, что и процессы катагенеза очень мало развиты и фактически играют сравнительно ничтожную роль, — это очень резкое отличие от центрального бассейна, где как раз налегание юрских глин на известняки обусловило ряд весьма важных и широко протекающих геохимических процессов. Большинство минералов катагенеза приходится связывать с инфильтрацией или из отложений или материка девонского времени. Если число минеральных видов катагенетического происхождения и довольно велико, то все же количественное распространение этих процессов ничтожно и часто ограничивается лишь небольшими чисто минералогическими находками.

Зато огромную роль и распространение имеют образования сингенетические и в еще большей степени продукты диагенеза. Как это ни трудно было ожидать от столь древних отложений, целый ряд из них, повидимому, с моментов диагенетического закрепления сохранил до настоящего времени свой комплекс минералов и есть полное основание думать, что в современном комплексе осадочных пород кембросилура п девона мы имеем картину минералообразовательных процессов отдаленных геологических эпох.

Наконец, в небольшом масштабе, без каких-либо очень ярко выраженных минеральных видов, мы имеем в районе ряд продуктов гипергенеза — выветривания и современных процессов, связанных, с одной стороны, с окислением колчедана, с другой, — с минеральными источниками, отлагающими углекислый кальций в торфяниках и соли хлористого натрия и гипса в минеральных водах восточной окраины. К ним надо при-

¹ Нельзя не отметить, что имеются доводы против признания этих синх глин кембрийскими, а скорее ледвиковыми или даже послеледниковыми.

² Весьма любопытна находка Вертом колчедана на Поповке около Павловска с кусочками галенита.

бавить весь комплекс геохимических образований почвенного покрова, накопление сапропелей в пресноводных озерах и гидратов железа и марганца в средних глубинах морских заливов.

Объяснения к геохимическим таблицам II и III (см. приложение).

Таблицы разделены на две, на основании довольно резкого отличия, создаваемого последовательностью отложений на востоке и на западе. На востоке в классических разрезах под Петроградом или по обнажению глинта нормально обнажения заканчиваются таблицей III, причем непосредственно на размытую поверхность эхипосферитового известняка ложатся девонские мергели, не имеющие особого геохимического значения, и затем ледниковый напос. На западе, и особенно в районе западного побережья моря и Западной Двины, мы встречаемся с преобладанием разрезов типа табл. II.

Кроме того, необходимо иметь в виду, что восточные и западные окраины одного и того же горизонта сильно меняются не только по своей мощности, но и по своему минералогическому и геохимическому характеру, благодаря чему нам приходится различать сообразно с фациями различные особенности в их химизме.

Общая мощность разреза, согласно Доссу (1900), свыше 600 м, из коих на девон приходится около 200 м, столько же на весь силур и кембрийские песчаники и, наконец, не менее 200 м на синюю глину вплоть до нижних песков, лежащих на гранито-гнейсовом основании.

ГЕНЕТИЧЕСКИЕ ЦИКЛЫ

Изучение генетических циклов северо-запада России облегчается его детальным геохимическим обследованием. История химических процессов начинается для нас с мощной свиты синей глины, отложившейся на сильно размытой поверхности древних гранито-гнейсов, которые Седергольм связывает с постболотским мигматическим гранитом. Повидимому, усиленный размыв этих серых архейских пород с кварцем, полевыми шпатами, биотитом и гранатом в значительной степени послужил материалом для отложений мелковзмучистой пластичной глины. В более глубоких горизонтах она переслаивается мергелистыми и песчаными прослойками, являющимися частично важными водоносными горизонтами Петрограда, выше носит более чистый характер, лишь изредка включая серии сферосидеритовых стяжений, скристалликами пирита, сфалерита и галевита в трещинах¹. Наконец, в верхних горизонтах, окрашенных в более густо-зеленый цвет, синяя глина носит иногда сильно песчаный характер, отделена линзами и слоями песка, коим она потом в большинстве мест и покрывается.

Детальные исследования этой синей глины нам показывают, что в своем составе она весьма постоянна, но что изменчивость ее цвета обуславливается различным содержанием мельчайшей пыли октаэдров пирита (в среднем около 1%) и зернышек глауконита, временами достигающих 30% всего состава. Осаждаясь, очевидно, в небольших глубинах, илистый кембрийский осадок в качестве минералов диагенеза накапливал в себе глауконит и органогенные элементы в виде гидротроилита и следов фосфатов. Путем дальнейших геохимических процессов часть глауконита разрушилась под влиянием инфильтрованных сверху вод и положила начало конкрециям сферосидерита, а гидротроилит превратила в кристаллики пирита. Повидимому, медленно и сложно шли эти процессы, но более интенсивны они были там, где, как в районе Котлина, рано смыты были все вышележащие горизонты и воды ледникового покрова могли глубоко проникать в различные горизонты глины. Эти поверхностные воды, циркулируя по песчаным прослойкам верхней части толщи, еще сейчас производят огромную геохимическую работу, разлагая пирит, обогащаясь

¹ Палеозойский возраст этих образований не доказан.

сероводородом и вторично осаждавая в верхних горизонтах кристаллики марказита. Бурые ржавые потоки окислов железа сопровождают выходы источников из этих горизонтов, а скопления травертина местами обнаруживают обогащение подземных растворов бикарбонатом кальция (по р. Тосно).

Не меньше деятельность и двух более глубоких водоносных горизонтов (второго и третьего по А. А. Иностранцеву), сильно обогащенных NaCl, причем с глубиной их минерализация увеличивается¹.

Уже верхние горизонты синей глины указывают на обмеление бассейна и от глины мы переходим к мощной свите п е с к о в у н г у л и т о в о г о я р у с а, весьма однообразного по своему петрографическому составу, но довольно характерного по геохимическим особенностям. Вся мощная толща (до 20 м) песков, сначала пустых, а потом оболочковых, носит на себе тоже следы слабых гидрохимических процессов и в общем остается в главной своей части очень слабо цементированной. Представляя собой механические продукты размыва Фенноскандинавского массива, эти осадки прибрежной зоны в верхних горизонтах ряда местностей окрашены в красный цвет гидратами окиси железа, которые составляют в форме, вероятно, гидрогематита цемент кварцевых песчинок. В нижних горизонтах они частично пропитаны марказитом, образующим, например, около ст. Поповки, по наблюдениям В. Миронова, очень типичные оолиты. В других горизонтах мы встречаемся с буро-рыжим цементом, связанным с гидратацией вышеотмеченных слоев, и, наконец, третьи почти совсем лишены железа, представляя высокоценный кварцевый материал для хрустального производства. Местами заметно катагенетическое цементование песков реже известково-доломитовым цементом, чаще кремневыми растворами, которые сначала образуют в массе песка мелкие стяжения в виде горошин, разрастание которых и приводит к более полному цементованию всего горизонта. Более внимательное отношение к этому процессу показывает, что он вряд ли связан с привносом кремневого вещества со стороны, а скорее является результатом частичного растворения кремнезема щелочными углекислыми водами. Кембрийский песчаник довольно неопределенно делится на две части: нижнюю толщу с малым содержанием оболуса и верхнюю, причем на их границе залегает своеобразный конгломерат с галькой и своеобразными железистыми конкрециями, внешне напоминающими боксит (р. Тосно).

В верхних частях оболочкового песчаника мы встречаемся обычно с небольшой прослойкой, обогащенной черными раковинами *Obolus*. По анализам А. Купффера эти раковинки состоят из фторалатита, образующего таким образом довольно большие скопления фторофосфатов, с свыше чем 3% фтора и 36% фосфорной кислоты.

Единственный сколько-нибудь характерный катагенетический процесс наблюдается в верхней части толщи, непосредственно под черным диоптиновым сланцем. Из него в процессе катагенеза проникают соединения сернистого железа, которое в форме пирита или марказита цементирует верхние горизонты песков, образовывая очень характерную породу — песчаник сколчедановым цементом и черными обломками створок оболуса.

Прибрежная зона песчаных отложений сменяется черной углистой прослойкой д и к т и о н е м о в о г о с л а н ц а разной, но в общем небольшой мощности (не свыше 1—1½ м). Эта прослойка отделяет пески унгулитовые от песков, богатых глауконитом, и, повидимому, намечает условия довольно глубокого открытого моря, на дне которого могли накоп-

¹ Ср. стр. 111 при описании миграции Cl.

ливаться органические животные остатки. В иллитой массе, обогащенной аммиаком и сероводородом, в процессе диагенеза вырастали конкреции антраконита, с одной стороны, и колчедана — с другой. Первые в своем радиально-лучистом строении намечают рост кристаллов кальцита, радиально обогащенных углистым веществом; в центре нередко находятся скопления пирита или пустоты, выстланные кальцитом, реже сплошным доломитом. Интересно отметить, что эти крупные диагенетические образования частично замещаются при последующих процессах (катагенетических?) доломитом, причем кальцит выносится, оставляя иногда пустые полости или скопления бурых железистых соединений.

Одновременно с этим идет и накопление конкредий колчедана — пирита, образующего красивые друзы кристаллов. Его окисление на поверхности в процессах гипергенеза вызывает целый генетический цикл минеральных образований, придающих этому горизонту некоторый минералогический интерес. Самыми обычными продуктами распада пирита является накопление кристалликов гипса в виде пластинок и плоских звезд, покрывающих плоскости тонких трещинок, разделяющих сланцы на тонкие листочки.

Мелантерит сравнительно редко наблюдается в этих процессах окисления; насколько мне известно, никогда не наблюдалось самородной серы, хотя ошибочно ее показывали очень многие авторы; зато очень типичны и сложны окисные сульфаты, которые в довольно значительных количествах накапливаются по трещинам в виде чижево-желтых, канареечно-желтых и буровато-красных образований неясного кристаллического строения. Значительная часть их при выветривании переходит в лимонит; отсутствие химических анализов не позволяет точнее определить их минералогическую природу.

Резко и очень определенно отделяется диктионемовый сланец от выше лежащей глауконитовой толщи; иногда глауконитовый песок непосредственно налегает на сланец, в других случаях он отделяется или глауконитовой зоной с ржавыми пятнами окисленного пирита, или резко обособленной красной охристой тоненькой прослойкой, к сожалению, до настоящего времени еще не изученной, хотя очень резко бросающейся в глаза в районе Ямбурга и Капорья. Весьма вероятно, что эта прослойка позднейшего образования представляет продукты осаждения тех вод, которые инфильтруются через пески и образуют на поверхности сланца водоносный горизонт, из коего иногда в местах выхода осаждается известковый туф.

Несомненно, что глауконитовые пески знаменуют собой очень быстрое обмеление бассейна; в этих песках с огромным содержанием глауконита, содержащего до 20% $\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$, до 8% K_2O и до 4% MgO , мы видим огромное первичное накопление железа и калия¹, этих двух важных органических элементов, к которым в качестве такого же первичного образования присоединяется сера в форме мельчайших кристалликов пирита, примешанных к глауконитовым зернам.

В общем глауконит сохраняет свежесть и свой первоначальный состав, хотя в некоторых горизонтах мы наблюдаем процессы его изменения: обычно это изменение заключается в окислении тех немногих процентов закиси железа, которые в нем содержатся, и в выносе окиси, отлагающейся нередко при этом или в трещинах самих зерен, или же вне их; с внешней стороны эти процессы сказываются в постепенной замене яркозеленого цвета глауконита сине-зеленым с отчетливым синеваато-серым тоном, а затем в

¹ Средний состав глауконитов района: SiO_2 —51; Al_2O_3 —10; Fe_2O_3 —16; FeO —4; MgO —4; CaO —0,2; K_2O —8; Na_2O —0,2; H_2O —6,6%. Сумма 100%.

появлении зеленых и бурых тонов, кончающихся темнобурым и шоколадным.

Среди всей нижней толщи песков с геохимической точки зрения являются очень интересными редкие скопления асфальта, ближе не изученные, и затем своеобразные пустоты в строго определенном горизонте (около 60 см над диктионемовым сланцем) с кальцитом, медными окислами и синеватым баритом. Хотя до сих пор эти минералогические находки совершенно ничтожны, тем не менее, с геохимической точки зрения они представляют большой интерес.

Постепенно в смене геологических процессов море углублялось, и не без перерыва или не без задержек в минералообразовании песчанистые отложения стали сменяться известковыми. Постепенно падает количество глауконитовых зернышек, лишь изредка в вышележащих горизонтах попадаются фосфорнокислые и углекислые стяжения с содержанием битумов и остатками трилобитов внутри, как бы намечающие особые моменты массовой гибели организмов. К востоку эти известняки все более и более обогащаются магнием, тогда как на западе сохраняют свой нормальный состав.

Это углубление моря на востоке продолжается дальше, сменяясь, не без какого-то несогласия, ортоцератитовым горизонтом, тогда как на западе эта смена отложений очень резко выявляется перерывом в минералообразовании. Этот горизонт на востоке составляет в общем верхний край обрыва глинта.

Глубокое ортоцератитовое море приносит с собою ряд новых геохимических явлений, и было бы весьма благодарной задачей более детально изучить те процессы, которые еще и ныне в явлениях катагенеза видоизменяют и перекристаллизуют его верхние горизонты.

В самых нижних горизонтах — в областях моря, в которых еще отлагались редкие зернышки глауконита, мы встречаемся с нижним чечевичным слоем — из сферосидеритовых стяжений скорлуповатого и радиально-лучистого строения; содержание в них до 3% фосфорной кислоты совершенно определенно указывает на их связь с органическими процессами¹; об этом же свидетельствуют редкие черные фосфориты, рассеянные на западе по всей толще известняка, или же с блестящей поверхностью, сгруженные вместе в основании горизонта; об этом же говорят и редкие углисто-асфальтовые включения, намечающие обмеление моря в конце отложений.

Эти сильно трещиноватые породы с ясно выраженными водоносными горизонтами являются областью резких катагенетических реакций, совершенно понятных, если мы вспомним, что только небольшой слой трещиноватых эхиносферитовых известняков отделяет их от воздействия тех процессов частью материкового, частью озерного характера, кои типичны для девонского времени в этих местах. Этим катагенетическим воздействием инфильтрованных сверху растворов мы объясняем более обычное нахождение в этих горизонтах барита (в друзьях кальцита Ревеля), галенита, сфалерита и соединений меди, обычно связанных с медьсодержащими пиритами. В некоторых случаях, как, например, по р. Волхову, это позд-

¹ Очень интересно сравнение этих образований с совершенно аналогичными чечевичными рудами Чехии, связанными с нижним салуром. Для них детальные исследования Славика установили образование в период диагенеза. См. Fr. Slavík. Der Phosphorgehalt der Eisenerze in böhm. Untersilur. Bergbau u. Hütte, 1918, № 5. L. Slavíkova et F. Slavík. Etudes sur les minerais du fer du sil. inf. de la Bohême. Bull. Intern. Acad. Sci. Bohême, 1918, XXII.

нейшее проникание медных соединений вместе с карманами девонской глины является вполне доказанным.

Особенно характерными катагенетическими реакциями является новообразование мельчайших кристалликов, преимущественно, калиевого полевого шпата, а также перекристаллизация этих известняков с обогащением магнезией (особенно в верхних горизонтах и, в частности, в восточных частях отложений) и образованием многочисленных полостей, пустот и трещинок, выстланных тоненькой корочкой доломита и кристаллами кальцита.

Аналогичное катагенетическое изменение (тоже без следов окремнения) мы встречаем при характеристике вышележащего эхиносферитового горизонта, очень бедного минералами, лишь с отдельными кристалликами кальцита и изредка с линзами асфальтоподобного вещества и прослойками кукурсита в верхней толще. Отделяясь снизу, аналогично ортоцератитовому ярусу, прослоечкой небольших стяжений почти совершенно окисленного сферосидерита, называемой верхним чечевичным слоем, этот горизонт представляет отложения глубокого моря, сменившегося позднее на востоке материком.

В то время как на востоке новый материк обусловил начало катагенеза нижележащих отложений, более или менее глубокое море продолжало на западе покрывать старые известковые осадки и в смене фаун продолжало отлагать известняки целого ряда отложений кукурского и иевского ярусов и свиты эстляндских известковых слоев нижнего силура и ряда мощных горизонтов верхнего. В мелких морских лагунах и заливах кукурского моря отлагались мощные скопления водорослей, давшие начало кукурситу — глинистому горючему сланцу с большим содержанием органического вещества, но почти лишенному серы и фосфора. Частично повторялись эти отложения и в вышележащих иевских известняках, сходных с кукурскими и столь же бедных какими-либо минеральными образованиями.

Несколько больше разнообразия в геохимическом отношении приносят с собой эстляндские нижнесилурийские слои, носящие местами более мелководный характер с мергелистыми известняками, частью включающими кремнь в качестве диагенетического продукта. В трещинах катагенетического характера мы наблюдаем кальцит, кварц, изредка галенит, малахит, азурит (по Нарове) и пирит.

Значительно более интересны в геохимическом отношении вышележащие слои пентамерового яруса, изученного химически дерптскими учеными. Известняки и доломиты этого горизонта отличаются или серым или желтым тоном, причем причиной окраски первых является примесь мельчайших кристалликов пирита и углеродистого вещества. Вместе с этим пиритом и кремнь, часто заключенный в форме больших конкреций в этих известняках, можно отнести к процессам диагенеза, тогда как кристаллики доломита, кварца, халцедон, пирит, кальцит и галенит являются типичными минералами катагенеза. Особенно любопытным, хотя и загадочным, остается нахождение здесь довольно больших скоплений галенита, образовывавшего неправильные гнезда вместе с железистой охрою, явившиеся предметом добычи в XVIII веке и горно-технической разведки позднее (в 1802 г. и в 1855 г.).

Приблизительно ту же геохимическую картину мельчающего, но все еще довольно глубокого бассейна дают нам и нижние, и верхние эзельские слои, лишенные, однако, тех тяжелых металлов, о которых говорилось выше.

Наступило девонское море. На востоке его известково-мергелистые отложения (средних горизонтов) покрыли непосредственно

эхиносферитовые известняки, и длинный континентальный период разделил на востоке эти две эпохи морских отложений. Не то было на западе, где верхнесилурийское море без перерыва сменилось мощной серией мелководных осадков — прибрежных песков древнего красного лежня.

Пестрой свитой лежат перед нами пески с большим содержанием полевого шпата, роговых обманок и измененного в бауерит биотита — продуктов размыва Фенноскандинавского массива. К этим чисто механическим осадкам почти не присоединялись химические отложения, и только постепенно, в результате местных трансгрессий, с ними стали переслаиваться слои мергелей и известняков. Никаких химических процессов не обнаруживается в этой толще, и при катагенезе и гипергенезе только верхние слои немного цементируются углекислой известью или доломитом.

Постепенно эту область заливают среднедевонское море, и в отдельных озерах с насыщенными соляными растворами, лиманах и заливах происходит осаждение той серии осадков, кои мы относим к среднему девону: доломиты, доломитовые мергели, отпечатки кристаллов каменной соли, гипсы и известняки обнаруживают перед нами типичную картину пустынного осаждения солей из мелководных бассейнов, обрамленных песками по берегам древнего песчаника. Местами слои гипсов должны были переслаиваться с отложениями каменной соли, по большей части лишь пропитывавшей глинистые слои, и мы сейчас судим о них по вытекающим минеральным источникам, например, в Старой Руссе и ряде других мест северо-запада России.

Весь генетический цикл тех химических элементов, которые сопутствуют современным минеральным озерам, повторяется и тут, и подобно другим мощным отложениям гипса мы встречаем и здесь редкие образования целестина и барита. Характерно повторяется здесь генетический цикл и других гипсовых бассейнов — в тех редких скоплениях асфальта, которые иногда отмечались по р. Двине.

Наконец, как и в ряде нижележащих слоев, мы встречаемся с небольшими находками тяжелых металлов — галенита и очень редкого медьсодержащего колчедана.

В процессе катагенеза мы не наблюдаем здесь сколько-нибудь серьезных химических преобразований, и если частично здесь идут процессы обогащения магнием, то в главной своей части доломиты должны быть признаны за образования диагенетического характера. Очень любопытно, согласно Ф. Розену, новообразование в доломитах кристаллов полевого шпата и слюды, повидимому, магнезиального. С этим катагенетическим образованием алюмосиликатов мы встречаемся еще в целом ряде пунктов Европейской России, каждый раз в связи с перегруппировкой мергелистых доломитов.

Если здесь мы, таким образом, встречаемся с ничтожными процессами катагенеза, то за то процессы гипергенеза, идущие еще в настоящий момент, заметно преобразуют эти отложения. Воды выщелачивают из них сернокислые соли магнезии и кальция, хлористый натрий. Частично идет восстановление серобактериями сернокислых соединений в сероводород, разложение которого на поверхности приводит к образованию налетов мелкокристаллической серы (серного цвета).

Равным образом накапливаются здесь выцветы магнезиального сульфата — эпсомита, очевидно образующегося при воздействии растворов гипса на доломиты.

Озерные отложения сменяются снова прибрежными песчаными отложениями верхнего девона, и море надолго покидает большую часть рай она, чтобы превратить всю область в материк.

С этого момента до настоящего времени большая часть северо-запада России остается материком: ледниковая эпоха сглаживает лишь его поверхность и покрывает своими отложениями, частично заливаются края осадков послеледниковыми, новейшими морями, а размывные линии глинта подготавливают современные границы морей, озер и материков.

Мало геохимических процессов оставил по себе этот длинный континентальный период, и сравнительно ничтожны были вызванные им изменения в составе пород.

Не обнаруживается геохимических результатов образования глинта и той зоны опускания, которая озерной областью отделила Русскую платформу от Фенноскандинавского щита.

Наконец, нам остается еще описать те химические процессы, которые идут на наших глазах в настоящее время, продолжая или заканчивая генетические циклы послеледниковой эпохи. Прежде всего наше внимание привлекает Балтийское море с его Финским заливом, размывом Фенноскандинавского массива и илистыми выносами Невы. В небольших глубинах (до 30 м) Финского залива, на обломках гранита и гнейса, в ряде мест (около Ревеля, Биорке и др.) драги русских миноносцев приносили с собой железо-марганцевые конкреции в форме плоских пяточков слоистой структуры, окружающих обломки гранитогнейса. Эти желваки, известные у моряков под именем исгари, напоминают скопления аналогичных конкреций в Ледовитом океане (Норденшильд); сейчас они изучены Я. В. Самойловым¹; повидимому, их образование идет в небольших глубинах, но все же недоступных для поверхностной морской волны. И в противоположность этим более глубоким осадкам идет своеобразное накопление целебной черной грязи в тихих, замкнутых заливах западных берегов Эстонии и ее островов: исследования А. Ф. Гёбеля показали, что здесь, в условиях накопления органических остатков, идут мощные процессы биохимического характера, совершенно тождественные с отложениями озер и лиманов юга России, с накоплением гидратов сернистого железа, медленно, путем диагенеза, превращающегося в пирит.

Не менее сложную картину геохимических процессов рисуют и накопления сапропелей или отложения в т о р ф я н и к а х, в большом количестве рассеянных по подзолистой почве севера. Среди обычных процессов накопления сфагнома и связанных с ним бобовых и болотных руд редких фосфатов (вивианита) и еще более редких сернистых соединений (пирита) наше внимание в районе привлекает своеобразный продукт, носящий у немцев название Wiesenkalk, у нас в технических кругах — гажи; это известковый туф, образующийся в самих торфяниках или болотах путем поглощения водорослями свободной угольной кислоты вытекающих из известняков источников или накопления некоторых пресноводных раковин. В виде известкового туфа² он образуется по склонам обнажений водоносных горизонтов, позволяя нарисовать цикл почвенных вод, легко проникающих в трещиноватые известняки карстового ландшафта и растворяющих по дороге углекислый кальций.

Такие же образования известны в качестве цемента галек и местами носят очень серьезный характер важного геохимического процесса.

¹ Я. В. Самойлов обнаружил в них следы Ni, Cu, Ba.

² Весьма любопытна, но геохимически не выяснена способность этих образований твердеть на воздухе (напоминая затвердевание римских травертинов), что особенно характерно для района Гатчины и Ронши.

В небольших размерах идет и накопление трепела в результате жизнедеятельности диатомовых водорослей, отмеченное в целом горизонте песков по р. Нарове (у дер. Смолки).

Продолжается и деятельность минеральных источников, то слабо минерализованных, то очень богатых растворимыми солями. Одни вытекают из песчанистых горизонтов над синей глиной, обогащенные сероводородом; они выделяются своими железистыми осадками и мощным образованием углекислого туфа, образующего в некоторых местах большие скопления (по р. Тосно). Другие обнаруживаются глубоким бурением в Петроградской области и приносят с собой слабую минерализацию галлоидных солей. Наконец, самые интересные — это источники, вытекающие из девонских отложений, богатых гипсом, которые приносят с собою сероводород, а в известных старорусских рассолах — хлористые натрий, калий и кальций, сернокислый кальций, бромистые соли и небольшие количества кремнезема, фосфорной кислоты и карбонатов.

Сложные процессы идут в почвенном покрове, преобразующем ледниковые наносы или отложения послеледниковых морей и озер, видоизменяясь в зависимости от петрографического характера подстилаемых коренных пород.

Такова геохимическая картина северных окраин Русской платформы. Только в самом восточном уголке, как было указано в геологической части, мы наблюдаем совершенно обособленное поле пермских, юрских, меловых и отчасти третичных отложений; первые представлены известняками пехштейна с колчеданом и редким халькопиритом, в юрских отмечаются угли с пиритом и сернистым цинком, меловые мергели содержат кремний, фосфориты, глауконит, а в третичных (олигоценовых) наблюдается бурый уголь, а также янтарь в пластичных глинах.

Общего геохимического значения эти маленькие островки иметь не могут, и в деталях геохимического строения горизонтов они совершенно тождественны с соответственными отложениями других частей Русской платформы.

ОБЩЕЕ ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании сказанного можно подойти к характеристике геохимии изученного района:

1. В отложениях кембросилура и девона северо-запада России мы совершенно не встречаемся с явлениями вулканического, поствулканического или посторогенического характера.

2. Преобладающим типом минералообразовательных процессов является образование сингенетического или еще более диагенетического характера, связанное с отложениями в разных условиях из морских бассейнов или сильно минерализованных лагун или озер.

3. Процессы катагенетического характера во всей толще очень слабо выражены, причем очень мало значения имеют химические реакции, связанные с обменом веществ между отдельными горизонтами.

4. Особый минеральный тип представляют геохимические образования, связанные с резкими регрессивными или трансгрессивными движениями водных бассейнов. Регрессивные движения характеризуются накоплением глауконита, трансгрессивные — скоплениями фосфорита и известковых глубоководных пород. Предположенные здесь в нижних горизонтах частые трансгрессии не находят себе оправдания в геохимических особенностях области и скорее являются глубоководными перерывами породообразования.

5. Геохимическая ассоциация элементов довольно сложна, слагаясь из элементов органогенного цикла, цикла минеральных озер и загадочных

сернистых соединений тяжелых металлов. Генезис последних не выяснен, хотя и есть основание связывать их с моментами материковых перерывов и инфильтрацией соединений, особенно из девонских отложений или в течение девонского времени (каледонские образования?).

6. Нет никаких геохимических процессов, которые видимым образом могли бы быть поставлены в связь с дизъюнктивными дислокациями, с севера отграничивающими кембросилур от Фенноскандинавского массива.

7. Геохимическая характеристика области, благодаря работам юрьевской школы, может быть сделана весьма детально и если и нуждается сейчас в углублении и обосновании некоторых положений, то вообще вряд ли может дать много нового и сколько-нибудь существенно пополнить геохимическую ассоциацию известных здесь элементов.

8. В первом приближении процессы минералообразования распадаются на три группы: в первые эпохи преобладают явления механического характера (кембрий и нижний силур), в середине периода начинают преобладать биохимические реакции, и, наконец, для девона мы имеем широкое развитие процессов чисто физико-химического характера.

Главнейшая литература

По геологии

- П. В. Еремеев. Geognostische Beobachtungen. Wolchow. [Геогностические наблюдения. Волхов]. Verhandl. Min. Ges., SPb. 1856, 63.
- Ф. Б. Шмидт. Untersuchungen über silurische Formation [Исследования силурийской формации]. Arch. Naturkunde Liv.-Esth.-u. Kurl., (Ser. I) II, 1858, 1—249, особенно 32.
- Г. Струве. Die artesischen Wasser. [Артезианские воды]. Mém. Acad. Sci., 1865, VIII (série VII), № 11.
- П. Бок. Геогностическое описание нижнесилурийской и девонской систем. Материалы геол. России, СПб., 1869, I, 103.
- Н. Кудрявцев и Лебедев. Геологическое описание окрестностей Красного и Царского Села. Труды СПб. об-ва естествоиспыт., 1882, XII, 125.
- А. П. Карпинский. Zur Geologie Gouv. Pscow. [К геологии Псковской губ.]. Bull. Acad. Sci., 1887, XXXI, № 4, 473.
- А. П. Карпинский. О кембросилурийских отложениях Псковской губ. Горн. журн., 1887, II, 261—270.
- Ф. Б. Шмидт. Kurze Übersicht d. geolog. Umgeb. von Petersburg. [Краткое обозрение геологии окрестностей Петербурга]. Guide du Congrès géol. SPb., 1897, XXXIV (см. также XII).
- В. Ламанский. Древнейшие слои силурийских отложений России. Труды Геол. ком., 1905, XX.
- А. А. Иностранцев. Воды и почвы Петербурга. СПб., 1910.
- Б. Райков. Геологические экскурсии в окрестностях Петербурга. СПб., 1911 и 1923 (с литературой).
- Н. Ф. Погребов. О результатах гидрогеологических исследований в С.-Петербурге. Труды II Съезда деятелей по практической геологии и разведочному делу, СПб., 1913, 60.

По минералогии и геохимии

- И. Георги. Versuch einer Beschreibung der natürlichen und ökonomischen Beschaffenheit des St.-Petersburgischen Gouvernements. [Опыт естественноисторического и экономического описания Петербургской губ.]. СПб., 1790, 7, 51. (Медь олиз Дудергофа).
- Вансович. Горн. журн., 1827, кн. 8, 47—48. См. также 1828, IX, 3. (Галенит в Прибалтийском крае).
- Г. П. Гельмерсен. Горн. журн., 1842, IV, 210. (Медь по р. Волхову и р. Поповке).
- Strangways. Schr. Min. Ges. SPb., 1842, I, 1—90 (стр. 18, 42 о соединениях меди и свинца).
- П. В. Еремеев. Горн. журн., 1855, I, 313.
- С. Куторга. Verhandl. Min. Ges. SPb., 1856, 242. (Медь под Петербургом). Там же, Озерский. (О галените в Лифляндии).
- Г. П. Гельмерсен. Bull. Acad. Sci., 1856, XIV, № 14, 214.

- G. Schrenck. Uebersicht der oberen silurischen Schichtensystem. Arch. Naturkunde Liv., Esth.- u. Kurl. (Ser. 1), 1857, I, 1—112.
- A. Ф. Гёббель. Ueber die Färbung der Dolomiten. [Об окраске доломитов]. Там же, I, 239—292.
- K. Шмидт. Die untersilurischen Thone. [Нижнесилурийские глины]. Там же, I, 507.
- И. Лемберг. Chemische Untersuchung des unterdevonischen Profil. [Химическое исследование нижнедевонского профиля]. Arch. Naturkunde Liv., Esth.- u. Kurl. (Ser. 1), 1859, III, 85.
- K. И. Гревингк. Geologie des Liv., Esth.- u. Kurl. Devon [Геология Лифляндии, Эстляндии и Курляндии. Девон]. Там же, 1861, II, 479. (Химический состав девонских отложений).
- Ф. Розен. Die chem. geognostischen Verhältnisse der devonischen Formation. [Хим. геогностические соотношения девонской формации]. Там же, 1864, III, 105.
- Г. П. Гельмерсен. Bull. Acad. Sci., 1864, (V) IV. (Минер. в скважине Экспед. загот. гос. бумар).
- A. Купффер. Ueber die chemische Constitution der haltischen silurischen Schichten. [О химическом составе балтийских силурийских отложений]. Arch. Naturkunde Liv., Esth.- u. Kurl., 1870, V, 113.
- A. П. Карпинский. Горн. журн., 1876, I, 173. (Соль в Псковской губ.). Горн. журн., 1887, II, 261. (Медь у Холма).
- K. И. Гревингк. Sb. Naturf. Ges. Univ. Dorpat, 1889, VIII, 45. (Сводка минералов), 83 (дополн.).
- B. Досс. Über den Limanschlamm des Süd-Russlands sowie analoge Bildung in Ostseeprovinzen. [Об иле лиманов южной России и об аналогичных образованиях в Прибалтике]. Krshl. Naturf. Ver. 1900, XLIII, 213. (Там же, стр. 162, о битумах).
- K. Д. Глянка. О залежах гипса в Псковском уезде. Псков, 1901, 1—12 (отд. брошюра).
- W. Дееcke. Die südhaltischen Sedimente in ihrem Zusammenhange mit dem Scandinauischen Schilde. Zbl. Min., Geol. u. Paläont., 1905, 97—109.
- F. L u d w i g. Die Küstensen des Rigaer Meerbusens. Arbeiten d. Naturf. Vereins zu Riga, N. F., 1908, Heft 11.
- Н. Ф. Погребов. Труды СПб. об-ва естествоиспыт., 1912, XLIII, 56.
- A. А. Иностранцев. Геологическое строение о-ва Котлина. Труды СПб. об-ва естествоиспыт., 1912, XXXV, 245.
- B. Досс. Ein Vorkommen von Grahamit im Silurkalk von Kunda [Грахамит в силурийском известняке Кунды]. Zbl. Min., Geol. u. Paläont., 1914, 609.
- Н. Ф. Погребов. О находке асфальтообразного минерала в силуре Эстляндской губ. Геол. вестн., 1916, II, 143.
- A. Е. Ферсман и его сотрудники. О глауконитовых глинах Петроградского уезда. Труды Ком. сырья, 1915—1916, I—III.
- П. А. Землячковский. Фельдшпатизация известняков. Изв. Акад. Наук, 1916, 101.
- Я. В. Самойлов и А. Г. Титов. Железомарганцевые желваки со дна Черного и других морей. Труды Геол. мин. муз. 1919, III, 27 (1922).
- Статьи по геологии окрестностей Петрограда М. Янишевского и С. Яковлева. Путев. геол. зиск. I Всеросс. геол. съезда, II, 1922.

Область третья

МОСКОВСКИЙ КАМЕННОУГОЛЬНЫЙ БАСЕЙН

(с краткой характеристикой мезозойских геохимических циклов Центральной России)

ГРАНИЦЫ РАЙОНА

Границы района определяются на западе и севере сравнительно хорошо, тогда как на юге и востоке их проведение крайне искусственно, что объясняется общей геологической историей Центральной России. Восточная граница определяется границей каменноугольных отложений¹ и проходит

¹ Как выше было отмечено, метаморфизованные части известняков и доломитов в районе Онежского озера включены в описание первого района, хотя каменноугольный возраст их предполагается некоторыми русскими геологами и отмечен на картах А. П. Карпинского (в противоположность мнению финляндской школы).

приблизительно от Архангельска по прямой линии на Новгород (несколько восточнее), затем в меридиональном направлении несколько восточнее Смоленска и затем, с юга огибая бассейн, — на Орел — Мценск и далее Елец, Липецк, Козлов. От Козлова она идет на север в меридиональном направлении на Касимов, Владимир, огибая с востока и запада Костромскую губернию, на Вологду и прямо на север к Архангельску. Таким образом, в общем восточной границей, начиная с Касимова, может служить граница пермских отложений, но с резким внедрением на востоке Костромской губернии по линии Владимир — Юрьевец — Ветлуга — Солигалич — Вологда.

С точки зрения административных границ в район входят: очень небольшая часть Архангельской губ., южные и восточные уезды Олонецкой и Новгородской губ., почти вся Костромская губ. без восточной части Ветлужского края, полностью губернии Тверская, Московская, Рязанская (почти вся), Тульская, Калужская, Смоленская, южные и западные уезды Ярославской губ., западная половина Владимирской губ.; самые незначительные участки касаются северных уездов губерний Тамбовской и Орловской (Липецк).

ГЕОЛОГИЯ ВСЕЙ ОБЛАСТИ

На геологических картах каменноугольная область представляется в виде центрального бассейна с двумя крыльями, отходящими к северо-востоку. Первое, самое длинное, доходит до Архангельска, второе, много меньшее, образует бухточку к востоку по направлению к Вятке. Такое неправильное строение объясняется наложением здесь двух совершенно разнородных, с геохимической и петрографической точки зрения, явлений, отделенных большим промежутком времени: отложениями верхнего девона и каменноугольной эпохи и затем, после континентального перерыва, отложениями юры и мела. Оба эти хронологически обособленных процесса отличаются очень резко геохимически. Более глубокое каменноугольное море представлено в подавляющей части известняками, лишь в нижних горизонтах давая картину прибрежных лагунных отложений, тогда как юрско-меловые моря этой области носят характер илистых мелководных осадков небольших водоемов, сильно менявшихся в своей конфигурации во времени. Но при всем резком различии этих двух осадочных серий мы не можем их достаточно резко отделить и топографически, и геохимически, так как именно это сочетание глинистых песчаных слоев наверху и известковых внизу создает ряд разнообразных минералообразовательных процессов, к которым еще присоединяется влияние и больших масс ледниковых глин, песков и суглинков. Поэтому в центральном районе юры и мел, покрывая каменноугольные известняки, обуславливают в последних течение ряда новых для них реакций.

В дальнейшем я разобью свое описание на две главы, отдельно касающиеся каждой из указанных групп.

А. Палеозойские отложения

Геология

Каменноугольные отложения Центральной России покоятся на отложениях девона, которые в северо-западной части носят характер мелководных прибрежных отложений, с глинами и песчаниками, а в юго-восточной части более глубоких морских осадков — мергелей и известняков,

образующих переходный горизонт к каменноугольным. Временное отступление моря привело сначала к отложению прибрежных лагунных осадков — песков и глин, но затем, под влиянием каменноугольной трансгрессии, они сменились более глубоководными осадками горного известняка (наверху серпуховским ярусом), на который легла мощная свита отложений московского и гжельского ярусов. Здесь перед нами рисуется толща известняков, переслаивающихся с доломитами, мергелями, а в верхних частях и с глинами.

Долгий континентальный период пермского и триасового времени отделяет эти отложения от того неравномерного покрова юрских и меловых слоев, тех неглубоких и менявшихся морских бассейнов, которые отлагали илистые осадки, пески и глины с богатыми продуктами гниения и распада организмов как животных, так и растительных. Только на востоке в сухом континентальном климате пермотриаса между юрой и карбоном вклиниваются пресноводные песчанистые и глинистые слои татарского яруса.

В этой картине спокойных трансгрессивных и регрессивных движений береговых линий и спокойных смен глубокого моря мелководными бассейнами или невысокими берегами материков никакие явления магматического или тектонического характера не нарушают течения минералообразовательных процессов и миграции элементов, и лишь один момент привлекает особое внимание: момент перехода от отложений серпуховского к московскому ярусу. А. П. Карпинский подчеркивает, что он характеризуется каким-то перерывом, наличием явно выраженных тектонических процессов в западной части, у берегов каменноугольного моря, и вместе с тем отмечает, что хронологически эти явления в Центральной России совпадают с аналогичными нарушениями на севере, излиянием щелочных магм на юге и усиленной горообразовательной и эффузивной деятельностью на востоке, в области позднее образовавшегося Урала¹.

Таким образом, мы видим картину относительно спокойной платформы, на которой идут отложения осадков морей, на севере еще идет размыв высот Фенноскандинавского массива, еще, вероятно, покрытого эопалеозойскими осадками, по южному краю которого мы можем допустить ряд(?) новых магматических излияний и тектонических сбросов. Глубокое море простирается к востоку, где вовторую половину карбона на месте отдельных островов начинается поднятие мощного Уральского хребта, а на юге сбросы и складки сжимают широкую полосу вдоль герцинской линии древних алтаид, давая выход по линиям сбросов и осей складок ряду изверженных пород и горячих рудных растворов: таким образом, по периферии спокойного моря идут сложные горообразовательные и минералогенетические процессы, и неизбежно их влияние и ими выносимые химические элементы отражались на судьбах химических процессов этого бассейна. Эта характеристика имеет огромное значение для геохимической оценки каменноугольных отложений России, специфические особенности коих будут понятны после детального сравнительного изучения одновременных с ними отложений Урала и Донецкого бассейна (см. дальше).

Минералы каменноугольных отложений

Минералы палеозойских отложений Центральной России и их крыльев изучены сравнительно недурно, главным образом благодаря работам

¹ Я не говорю о других более мелких тектонических процессах, сведениях в книге А. П. Карпинского (Очерки геологического прошлого Европейской России. 1919, 123), часть которых приурочена к границам с Фенноскандинавским щитом; в общем их геохимическое значение пока ускользает от нашего внимания.

последних десяти лет московской школы минералогов и тем исследованиям практического характера, которые предпринимались, с одной стороны, в угленосных областях, с другой — при изучении залежей фосфоритов.

Из самородных элементов, за исключением обычных газов атмосферы, нам не известно ни одного вида, хотя не исключена возможность нахождения самородной серы при процессах окисления колчеданов.

Из сернистых — огромную роль играет только колчедан (пирит, в значительно меньшей мере марказит); далее следуют образующийся при их распаде H_2S и сульфиды тяжелых металлов (Zn, Pb, Cu) в ничтожных количествах (Боровичи).

Из окислов обращают на себя внимание три группы: окислы алюминия, железа и кремния. В первой группе отметим шаньвинский (коллоидальный гидрат глинозема), диаспор, гидраргиллит, боксит; во второй — лимонит, гематит, гидрогетит и гидрогематит; сюда же относятся мало изученные охры этой области, часть коих, вероятно, должна быть отнесена к ферросиликатам; в третьей — кварц, дымчатый кварц, аметист, цитрин, халцедон, агат, сердолик, полуопал, кремень; кроме того, гидраты марганца и марганцевые окислы неопределенного состава.

Из силикатов, кроме каолина, известны только палыгорскит, мусковит (новообразование?) и кристаллики ортоклаза и микроклина. Что же касается аллофана и аллофановидов, то, может быть, правильнее относить их к гидрогелям окислов алюминия и кремния.

Из фосфатов — ничтожные следы бераунита, из сульфатов — гипс, разнообразные, ближе не определенные сульфаты окиси железа и мелантерит.

Очень богато представлены карбонаты — доломит, сферосидерит (анкерит?), кальцит (известковый шпат, оолиты известковые, известковый туф, известняк, так называемый мрамор), арагонит.

Из галогенных соединений отметим только ратовкит, а из соединений углерода — уголь нескольких типов.

Мы видим, таким образом, что разнообразие минеральных видов очень не велико, и что большинство известных минералов принадлежит к окисленным соединениям. По всему минеральному комплексу пород трудно сейчас ожидать большого пополнения этого списка.

Количественно многие из соединений образуют очень крупные скопления, имеющие практическое значение и разрабатываемые, таковы: кварцевый песок, уголь, железный колчедан, огнеупорные и гончарные глины, железные руды (бурый железняк, сферосидерит), доломит, известняк, мрамор и в будущем, может быть, боксит.

Генетические типы палеозойской свиты Центральной России

В общем геохимические процессы этой области довольно просты, так как в них совершенно отсутствует целый ряд генетических циклов: магма и ее поствулканнические действия, гидротермальные процессы разных типов, глубинный метаморфизм давления, посторогенические явления и т. д.

В сущности мы во всех процессах минералообразования видим прежде всего явления первичного осаждения, синхронического или диагенетического, с одной стороны, и катагенетического, с другой. Провести, однако, резкую границу между этими двумя типами химических явлений затруднительно, равным образом невозможно точное проведение границы между типично катагенетическими явлениями и процессами гипергенеза —

современного воздействия атмосферы и биосферы. Такая невозможность разделения объясняется тем, что по своему характеру катагенетические явления продолжаются и ныне, при современной физико-химической обстановке. Более подробное описание самих процессов дается ниже, на стр. 145.

Несколько иной характер приобретают минералообразовательные процессы в северном крыле каменноугольного бассейна, если только действительно олонечские известняки и доломиты надо рассматривать, как часть каменноугольного бассейна. Здесь известняки, по мнению П. А. Борисова, подверглись следам метаморфизации под влиянием близких выходов изверженных пород и вызванной ими перекристаллизации, благодаря чему окремнение и доломитизация усиливались по направлению к северу и делались более интенсивными.

На таблицах мной отмечены перерывы в напластовании, причем к таковым мной, по А. П. Карпинскому, отнесено и некоторое несогласие в налегании московского яруса на серпуховской.

Распределение минералов по трем генетическим группам (син-, ката- и гипергенеза) мною проведено частью по данным С. Н. Никитина, но главным образом по собственным наблюдениям в Подмосковном и Боровичском районах.

В списках минералов (табл. IV) поставлены цифры (например, ратовкит 1—3), что означает, что ратовкит связан с породами, при которых стоят эти же цифры (1—3), т. е. известняки, красные глины и известняки.

Элементы палеозойских отложений

Как видно из прилагаемой таблицы (стр. 130), в каменноугольных и верхнедевонских горизонтах Центральной России принимают участие всего лишь 24 элемента, по сравнению с таблицей, приведенной выше (рис. 7), дающие такое отношение групп: 1 : 0,4 : 11 : 0,9¹. Это соотношение прекрасно показывает огромное преобладание элементов обычного поля, с очень слабым развитием кислого и почти одинаковым присутствием элементов основных и глубинных. Для пород осадочного характера очень значительным является последнее число, показывающее совершенно необычное нахождение тяжелых металлов. Очень интересно сравнение этой таблицы с геохимической ассоциацией южной герцинской полосы или рудных элементов Урала, обнаруживающих значительную аналогию. Еще разительнее будет аналогия, если мы сравним эту ассоциацию с ассоциацией одновременных по образованию рудных полей Гарца и отчасти Фрейбергского района.

Есть, однако, в этой ассоциации и ряд очень характерных черт, мало обычных и поэтому весьма резко бросающихся в глаза; роль титана, с одной стороны, и фтора, с другой, ничтожная роль фосфора и марганца. В общем мы можем характеризовать всю ассоциацию, как преобладание элементов органического происхождения (биохимических).

В о д о р о д. Для него мы имеем соединения: H_2O , H_2S и органическая часть угля. Никаких особенностей в истории этого элемента мы не наблюдаем.

У г л е р о д играет огромную роль в истории бассейна, так как в том или ином виде подавляющее большинство осадков является биохимическими; в них углерод принимает участие или как таковой (уголь), или в виде углеводородов (богхед, бурый уголь), или в виде карбонатов щелочно-

¹ Я не включил в диаграмму стр. 130 стронций, так как пока о тавляю под сомнением анализ накипи из вод второго горизонта артезианской скважины Петровско-Разумовского (с 6,43% SrO). А. В и н о г р а д о в. Ежегодн. геол. мин. Россия, 1910, XII, 294.

земельных элементов (известняк, доломит). Первые два вида распространения углерода являются очень важными с геохимической точки зрения, так как создают восстановительную обстановку в среде осадков и этим определяют весь генетический цикл тех образований, кои связаны с этой восстановительной средой (образование сернистого железа, перенос железа в виде углекислых закисных соединений, накопление глинистых образований путем выщелачивания других продуктов). Не меньшую геохимическую роль играет карбонатная форма накопления углерода, приводящая к целому сложному генетическому циклу, описанному ниже при рассмотрении процессов московского яруса, причем значительная роль принадлежит вадозной углекислоте, частью проникающей из воздуха, частью образующейся при процессах замещения карбонатных пород.

К и с л о р о д. В центральном районе окисляющая роль кислорода протекает в несколько необычных условиях, на которых мне придется подробнее остановиться при рассмотрении верхнего покрова мезозойских отложений.

В общем покров юрских глин создает настолько восстановительную среду, что почти всюду, где вадозные воды проникают через юрскую толщу в известняки, они лишены окислительной способности, и поэтому в этих местах кислородная поверхность лежит в выше залегания известняков. В тех местах, где этого покрова нет и где воды, проникающие через ледниковую толщу, не теряют своего кислорода, там мы наблюдаем опускание кислородной поверхности до границы средних горизонтов московского яруса, особенно в переходных зонах доломита. Конечно, иначе расположена была эта поверхность в те материковые периоды, которые отвечали мезозойскому времени и в которых деятельность кислорода проявлялась иным образом; так, в областях мелководных бассейнов нижнего карбона, в которых накапливалось органическое вещество, была восстановительная среда, но зато на берегах этих бассейнов, при вероятном субтропическом климатическом режиме, должны были наблюдаться процессы, напоминающие образование наших латеритов и terra rossa в карстовых областях (генезис боксита), идущие при большом воздействии кислорода в процессах гипергенеза.

Ф т о р нам известен в палеозойской свите лишь в виде скоплений ратовкита, землистой разности плавленого шпата: сложная картина генезиса этих скоплений может быть объяснена лишь биохимическим путем и позднейшей концентрацией поверхностными водами из скоплений в раковинах; возможно, однако, и другое объяснение, на которое наводит ничтожное содержание в скоплениях ратовкита фосфорной кислоты. Подтверждая роль биохимических реакций в этом процессе, можно допустить мысль о том, что первичной формой осадка фтористых соединений были фосфаты типа фторапатита, распад которых и вызвал накопление плавленого шпата. Что такой вынос фтора из фосфоритов возможен, показывают нам апатиты южной России, в которых, по данным В. Н. Чирвинского, часть фтора замещена карбонатом.

Н а т р и й почти никакой роли в современных геохимических процессах не играет, и нам не известно ни одного минерального тела, в котором бы он накапливался в сколько-нибудь больших количествах (немного в глинах). Это, конечно, не исключает того, что в прошлом этот элемент, особенно в связи с алором, играл большую роль, главным образом в тех морских бассейнах, которые испытывали регрессию и частично замыкались в небольшие водоемы с большей концентрацией. Может быть, именно к таким процессам регрессии при повышенном содержании ало-

Геохимическая диаграмма каменноугольных отложений
Центральной России

Ряды	I	II	III	IV	V	VI	VII	0	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	Ряды
1	H	—			—	—	—	.	.	.	.	C	N	O	F		2
3	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	.	K	Ca	.	Ti	.	.	Mn	Fe Ni	4
5	Cu	Zn	.	.	As	.	.	.	.	.	.	.	.	.	?	.	6
7	Ag	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	?	.	8
9	Au	.	.	Pb	.	.	?	.	?	.	.	.	.	.	—		10

Геохимическая диаграмма юрско-меловых отложений
Центральной России

Ряды	I	II	III	IV	V	VI	VII	0	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	Ряды
1	H	—	—	—	—	—	—	.	.	.	.	C	N	O	F	.	2
3	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	.	K	Ca	.	.	.	.	Mn	Fe	4
5	Cu	.	.	.	As	.	.	.	.	.	.	.	.	.	?	.	6
7	.	.	.	.	.	.	.	.	.	Ba	.	.	.	.	?	.	8
9	.	.	.	.	.	.	?	.	?	.	.	.	.	.		—	10

См. примечания к таблице на стр. 84.

ридов относятся иловатые осадки доломита, которые местами переслаивают московские известняки.

Магний. Роль магния интересна лишь в толщах известняков и совершенно нам неизвестна в песчано-глинистых осадках. Первичной формой накопления является образование доломито-мергелистых прослоек и большей или меньшей доломитизации самих известняков самых разнообразных горизонтов. Вторичные накопления, с одной стороны, вызваны поверхностным выщелачиванием карбоната кальция и, таким образом, образованием верхних доломитов гипергенеза, с другой — фиксацией части магnezии в виде алюмосиликата — палыгорскита. Последняя реакция

тем более интересна, что дает нам пример устойчивости кремнекислых соединений в той обстановке поверхностных реакций, в которых считался невозможным обратный переход карбонатов в силикаты. Подробнее о миграции магния в известковых породах палеозоя см. при описании четвертой области.

А л ю м и н и й. Вероятно, на всей территории России мало других областей, в которых процессы накопления глинозема и алюмосоединений в осадочных породах шли бы с такой интенсивностью и постоянством. Накопление гидратов глинозема как в верхних, так и в самых нижних горизонтах каменноугольных отложений повторяется и в других областях земной поверхности, но причинно оно связано не с определенным геологическим возрастом этих отложений, а с тем генетическим циклом, который создается налеганием глинистых продуктов мелкого моря на глубоководные известняки или же действием теплого климатического режима на те же известняки.

Если, как мы увидим на стр. 149, фосфориты обычно накапливаются в местах перерыва осадков или морских трансгрессий, то накопление глинозема, наоборот, является весьма часто результатом регрессивных движений и быстрой смены условий глубоких карбонатных фаций материковым климатом. Действительно, этим условиям отвечают как верхняя часть московского и жезельского ярусов, так и верхнедевонские или нижнекаменноугольные известняки. Хотя до сих пор мы не можем получить точной картины тех химических явлений, которые сопровождают эти процессы бокситизации, латеритизации или каолинитизации, но все же их течение под влиянием атмосферных условий, при отсутствии органического покрова и сильном действии вадозных углекислых вод, несомненно. В то время как в условиях влажного болотного режима идет процесс накопления каолинов, в процессах субтропического режима, наоборот, идет образование бокситов. В малом масштабе эти явления проявляются в верхней толще московских известняков, где осаждаются гидрогели кремнезема и глинозема. Впрочем, в данном случае возможно влияние серной кислоты, проникающей сверху из вышележащих в юре колчеданов.

К р е м н и й. Кремнезем, подобно глинозему, играет роль сингенетического образования исключительно в мелководных осадках, тогда как в известняках огромная роль в его миграции должна быть отведена к катагенетическим процессам, при которых идет концентрация рассеянного биохимического кремнезема. Однако в отношении активности кремнекислых растворов мы видим как раз обратную зависимость. В глинисто-песчаных осадках кварцевый материал песков, образовавшихся в результате размыва ранее накопленных отложений или массивов, почти не участвует в гидрохимических реакциях, и лишь сравнительно редко в нем начинают возникать шарикообразные скопления, цементирующие опаловым цементом песчинки сначала в так называемую на месте «опоку» (Боровичи), а потом в более плотный песчаник. Гораздо шире протекает деятельность кремнекислых растворов в известняках, где щелочная среда создает при одних концентрациях перенос гидрозолей, при других — их фиксацию в виде разнообразных разновидностей кремнезема или даже силикатов (пальгорскит). Процесс окремнения имеет огромное значение для всей области. См. подробнее о нем на стр. 145.

Ф о с ф о р. Интересно отметить почти отсутствие фосфора в палеозойской свите. Ничтожные количества его отмечают в железных рудах, образующихся путем замещения известняков угленосного яруса, ничтожные следы попадают в скопления ратовкита, и, наконец, в переходных слоях между черными юрскими глинами и метаморфизованными известняками

попадают неясные землистые фосфаты, частью коллоидального строения, очевидно, вызванные прониканием раствора сверху. Старые анализы каменноугольных известняков и доломитов окрестностей Москвы обнаружили в них самих в среднем сотые доли процента фосфорной кислоты (0,03).

Детальные исследования ратовкита разных месторождений обнаружили в некоторых образцах довольно значительное содержание фосфорной кислоты (см. стр. 144).

С е р а. Вся сера — органогенного происхождения и связана почти исключительно с мелководными осадками нижнего яруса. В самых верхних горизонтах московского или гжельского яруса мы изредка в катагенетических реакциях наблюдаем скопления сернистых соединений, вероятно, связанных с восстановлением нисходящих сернокислых растворов. Процессы окисления сернистых соединений обычны (см. стр. 117, при описании северо-западного района). Содержание серы в самих известняках ничтожно и до сих пор не изучено (S или SO_3 ?), хотя Траутшольд в 1868 г. отметил SO_3 в известняках окрестностей Москвы 0,06—0,08 %, в доломитах 0,2—0,5 %. Постоянно несколько повышенный процент SO_3 в верхних доломитах весьма характерен и, вероятно, связан с прониканием в доломиты сульфатных вод покрывающих горизонтов юры.

Х л о р известен в небольших количествах в артезианских источниках среди известняков московского яруса, в которых он, вероятно, рассеян в виде $NaCl$.

К а л и й, подобно натрию, не играет роли, хотя для него любопытно отметить скопление листочков калиевой слюды в некоторых глинах, особенно гжельского яруса, и новообразование в известняках полевого шпата. Хотя С. Н. Никитин определенно считает листочки слюды новообразованием в глинах остаточного происхождения (из известняков), тем не менее вопрос об их генезисе остается открытым.

К а л ь ц и й в виде карбоната играет роль в глубоководных осадках, в виде бикарбоната выносится вадозными водами, обуславливая ряд обычных катагенетических и гипсргенетических реакций.

Т и т а н. Несмотря на отсутствие достаточного количества анализов, титан, несомненно, связан со скоплениями в угленосной толще как в подчиненных им бокситах, так и в огнеупорных глинах. Для последних имеется анализ глины из Раменбургского уезда Рязанской губ., где в белом «сахаре» было обнаружено около 1,32 % TiO_2 . Еще гораздо яснее связь накоплений титана с бокситовыми залежами Тихвинского уезда Новгородской губ., где обнаружено постоянное присутствие около 2,5 % TiO_2 с содержанием до 6,4 % в отдельных образцах.

Исследования В. И. Искуля установили, что часть этого титана связана в иголочках рутила и, может быть, зернышках ильменита. Генетически эта связь вообще непояснима, и особенно замечательно, что одновременно отмечается почти полное отсутствие марганца.

М а р г а н е ц играет ничтожную роль, отсутствует даже в тех отложениях, где его следовало бы ожидать, совершенно неизвестен в красных бокситах и ничтожными нежными дендритами покрывает изредка стенки известняков верхних горизонтов московского яруса. В северном крыле марганец частично появляется в красных железняках верхних горизонтов песчаной свиты нижнего карбона, реже — в железных рудах продукту-совых известняков юга.

Ж е л е з о. Железо не играет роли во всем верхнем карбоне и даже при процессах катагенеза нигде не накапливается в сколько-нибудь заметных количествах, зато в нижнекаменноугольных отложениях и в верхнем

девоне приходится отмечать весьма серьезные скопления окисных или закисных соединений железа, образующих целый ряд месторождений железных руд. В работе П. А. Земятченского с большой обстоятельностью дается описание генезиса этих руд, по преимуществу в толщах продуктового яруса и девонских известняков, причем автору с несомненностью удалось выяснить связь этих скоплений с катагенетическими процессами позднейшего времени. Для девонских и непосредственно над ними лежащих горизонтов известняков (так же как и для пермских слоев более восточных областей) источником железа является более или менее очевидное проникание железистых растворов сверху из мелководных материковых горизонтов биосферы (юры — в одних случаях, нижнего карбона — в других); менее частым является накопление этих же соединений в горизонтах продуктового яруса в тех случаях, когда он перекрыт московским; при внимательном изучении разрезов выясняется, что накопление и в этом ярусе наблюдалось лишь в тех случаях, когда он непосредственно перекрывался трансгрессивно мезозойскими осадками, и, таким образом, и в этом случае источником замещения железа являются процессы в своей основе биохимического характера.

Н и к е л ь. Единственная находка соединений никеля известна из верхних горизонтов московского яруса, где в трещинах доломитизированного известняка (Подольского цементного завода) был мною найден натек кальцита, окрашенный никелевыми солями в слабозеленый цвет. Происхождение этого элемента остается невыясненным, причем мною было высказано предположение, что никель мог проникнуть в растрескогы путем разложения какого-либо никелевого предмета, что делается особенно вероятным, так как находка сделана была в карьере, в самом дворе завода. С другой стороны, не следует забывать, что никель был обваружен с несомненностью в пермских отложениях Поволжья (см. ниже, стр. 165).

М е д ь. Несмотря на обилие колчеданов в разных горизонтах, медь в них до сих пор не обнаружена, и лишь на пиритах Боровичского района мною были найдены ничтожные количества халькопирита. Генезис см. стр. 142.

Ц и н к. Подобно другим тяжелым металлам (Cu, Pb, Ag, Au), цинк был обнаружен мной в виде железистой диноквой обманки на колчеданах Боровичей. Количество его в общем ничтожно, но, вероятно, больше, чем это кажется на первый изгяд, так как отличить мелкие черные кристаллики сфалерита с металлическим блеском от кусочков угля затруднительно.

М ы ш ь я к. Для мышьяка в центральном районе мы имеем некоторые данные. Мышьяк исключительно связан с колчеданами, причем в пиритах угленосной толщи содержание мышьяка ничтожно, измеряясь десятими и сотыми долями процента, тогда как оно достигает одного процента лишь в некоторых месторождениях юрских колчеданов. Происхождение мышьяка биохимическое; миграция его после разрушения колчеданов неизвестна.

С е р е б р о обнаружено несколькими анализами в боровичских колчеданах; в них самих количество Ag колеблется в сотых и тысячных долях процента. Равным образом оно входит в состав свинцового блеска тех же месторождений, где обнаруживается вполне очевидными пробами. Происхождение, очевидно, аналогичное золоту. В колчеданах южного крыла угленосной толщи ни серебро, ни золото не отмечаются, что, однако, можно объяснить, с одной стороны, отсутствием химических анализов специально с целью открытия редких металлов, с другой — отсутствием чисто минералогического обследования южных месторождений.

З о л о т о обнаружено непроверенными химическими анализами в боровичских колчеданах, в количестве от десятитысячных до тысячных

долей процента. Содержание золота сильно колеблется, но накопление его приходится считать не первичным, а связывать с теми процессами диагенетического характера, которые столь типичны вообще для угленосных отложений каменноугольного возраста.

С в и н е ц отмечался только в колчеданах северного крыла угленосной толщи, причем старые анализы говорят о содержании 2% свинца при валовом анализе колчедана (что, вероятно, неверно). Мои наблюдения в Боровичском районе обнаружили довольно большое распространение намазок свинцового блеска в колчеданах среди самого угля, в кристаллах, в пустотах сферосидеритовых конкреций среди подстилающих глин и песков, а также в виде обмазок больших желваков песчанистого колчедана нижних песков.

П р и м е ч а н и е. Общий обзор геохимических процессов в исторической последовательности приведен будет после обзора минералов и элементов мезозойских и новейших отложений центральной области, см. стр. 139.

Б. Мезозойские и четвертичные отложения

Геология

Для нас важно отметить, что период образования морских глубоководных осадков каменноугольного и потом пермского моря¹ сменился длительным континентальным периодом, в течение которого шел грандиозный размыв, еще усилившийся при наступании юрского моря, захватившего огромные области Центральной и северо-восточной России.

Келловейское море, оксфордское, секвано-кимериджское, затем период отложений так называемых волжских слесей и меловых колебаний представляют картину длительных регрессивных и трансгрессивных движений, с усиленным размывом западных берегов и той оси, которую Мурчисон назвал девонской (Смоленск—Орел—Воронеж). Илисто-песчанистые отложения характеризуют небольшие глубины этого моря, а частные местные перерывы в сериях показывают неустойчивость контуров юрских морей и их заливов.

В общем нижнемеловая эпоха носила тот же характер, и еще более суженное меридиональное море пересекало Россию от устья Печоры до Астрахани. Крупная верхнемеловая трансгрессия совершенно изменила эту картину и покрыла морем весь юг России, почти не захватив нашей области, до настоящего момента оставив ее частью материка.

Ледниковый покров закрыл собой сильно размытые остатки — островки этих мезозойских отложений, а его южный конек, в связи с колебанием ледника, как раз захватил южные границы нашей области, еще усилив их размыв. Таким образом, частая смена морских и континентальных периодов с усиленной эрозией, довершенной ледником, весьма усложнила картину постпалеозойских горизонтов и связанных с ними геохимических процессов.

Минералы мезозойских и более молодых отложений

Минералы мало разнообразны, однако благодаря работам Московской фосфоритной комиссии под руководством проф. Я. В. Самойлова изучены сравнительно хорошо.

¹ В восточной части мы кое-где встречаемся с отложением пермских пестрых мергелей, геохимическое описание коих мы однако, относим к району четвертому. В большей же части изучаемой нами области в пермскую эпоху была суша — берег восточного пермского моря.

С а м о р о д н ы е э л е м е н т ы неизвестны (только золото в валунных ледниковых песках).

Из с е р н и с т ы х мы знаем только пирит (и в меньшей мере марказит), образующий очень большие скопления и вызывающий при окислении ряд новообразований, а также H_2S как продукт распада колчеданов.

Из к и с л о р о д н ы х — лимонит (частью в виде первичных оолитов, частью как продукт окисления колчедана); бобовые и дерновые руды, железо-марганцевые скопления ортштейнов; кварц в чистых песках и гидраты кремнезема в подзолах современных почв.

Из с и л и к а т о в совершенно особое внимание привлекает глауконит, имеющий огромное распространение и в огромных количествах; другие силикаты, как слюды, глины, совершенно не изучены, и природа их образования мало выяснена.

Из к а р б о н а т о в — кальцит в септариях, известковый туф в современных и послеледниковых образованиях и сферосидериты глинистого типа в оксфордских глинах.

С у л ь ф а т ы довольно разнообразны, но плохо изучены: к катагенетическим минералам относятся барит и гипс, к гипергенетическим — гипс, мелантерит, свободная серная кислота, водные сульфаты окиси железа.

Совершенно исключительное внимание приходится уделить ф о с ф а т а м, фосфориту, который в неизмененных образцах по своему составу точно отвечает фторапатиту, тогда как в продуктах перекристаллизации обогащается карбонатом кальция с переходом в штаффелит. Известны также вивианит и бераунит.

Наконец, из соединений у г л е р о д а надо отметить бурый уголь, иногда замещенный частично или вполне пиритом или фосфоритом, торф в межледниковых и современных отложениях и сапропелевые осадки на дне озер.

Большие скопления соединений элементов мы знаем только для серы (пирита), фосфора (фосфорита), алюминия (гончарные келловейские глины), кремния (кварцевые пески, квилонские) и углерода (торфяники). Все они имеют практическое значение и разрабатываются.

Генетические типы

С точки зрения минералообразовательных процессов район представляется довольно простым, хотя детали отдельных реакций еще не ясны. Основным типом является с и н х р о н и ч е с к о е или д и а г е н е т и ч е с к о е образование минерала одновременно с глинистым или песчаным осадком прибрежной неглубокой полосы мелкого моря: таков генезис большинства соединений — глини, песков, глауконита, фосфоритовых стяжений и оолитов лимонита, известковистых, сферосидеритовых и баритовых конкреций — септарий, стяжений колчедана, кусков углистого вещества и некоторых других.

В современных отложениях такими первичными соединениями являются: торф, гидраты кремнезема в подзолах, вивианит в торфяниках и сапропелевые осадки.

Сравнительно мало значения имеют к а т а г е н е т и ч е с к и е реакции, которые частично продолжают и довершают диагенетические процессы, частично вызывают новообразования: таковы кристаллы кальцита, иногда барита, частью гипс. К ним же относятся продолжающиеся ещё и сейчас процессы цементации песков; обычно цементом служат:

известковый шпат, лимонит, фосфорит, реже кремнезем; этот процесс, ясно наблюдаемый в некоторых обнажениях, приводит к превращению рыхлых песков в плотные жерновые песчаники.

К этой же группе явлений приходится относить и ледниковые процессы, которые, кроме накопления глин и валунов, частично приподымают к большим скоплениям песков, богатых тяжелым шлихом, который при современном размыве еще более концентрируется и изредка превращается в типичный шликс с магнетитом, гранатом и золотом (например, у ст. Икши около Москвы).

Из современных процессов гипергенеза три заслуживают по своему значению особого внимания: во-первых, новообразование синих фосфатов в торфяниках с последующим их окислением в бераунит; во-вторых, серия окисления колчеданов, резко наблюдаемая весной на черных юрских глинах, и, наконец, в-третьих, почвенные процессы вымывания полуторных окислов, с накоплением подзола и орштейна, частью довольно богатого марганцем.

Элементы

Геохимия необычайно проста и состоит по преимуществу из элементов обычного поля: всего нам известно 19 химических элементов, из коих некоторые, как As, Cl, Na, Cu, играют совершенно ничтожную роль следов. Вряд ли в будущем этот список сильно увеличится, так как даже специальные пробы на некоторые элементы (например, на J) дали результат отрицательный.

Общая геохимическая ассоциация интересна по сравнению с палеозойскими отложениями, с одной стороны, и с общими орогеническими процессами мезозоя — с другой. По отношению к первым отмечается отсутствие тяжелых металлов и титана и сильное преобладание чисто органических элементов; впрочем, в этом они скорее сходятся с отложениями прелюдиальных эпох, разделяя с ними нахождение фтора. По отношению к общим орогеническим процессам и общей геологической истории этих отложений необходимо иметь в виду, что юрско-меловые образования связаны были в этом районе с размывом и химической переработкой скорее старой осадочной каменноугольной и девонской суши, чем каких-либо хребтов кристаллических пород. Очень любопытным является нахождение бария, столь типичного элемента мезозоя.

Наибольшую геохимическую роль играют: C, O, F, P, S, K, Ca, Ge, Si.

Незначительную: Al, N, H, Ba, Mn.

Не играют роли: Na, Mg, Cl, As, Cu.

Перехожу к геохимической характеристике отдельных элементов.

Водород особой геохимической роли не играет, только в виде водных растворов и сероводорода при разложении колчеданов.

Углерод сравнительно редок в виде углистых кусков древесины, находимой в келловейских, оксфордских и портландских горизонтах. Гораздо больше значение углерода в виде так называемого углистого вещества, которое в большом количестве пропитывает большинство глин юры и обуславливает их черный цвет и некоторое сходство с угольными сланцами. Рассеянное в ничтожных количествах, это вещество обуславливает общий восстановительный характер геохимических реакций этих областей.

Наконец, неизвестные нам углеводороды входят в состав фосфоритов (в среднем — в количестве около 1%) и вызывают характерный, еще не изученный запах этого ископаемого при разтоме образца.

Углерод в виде карбонатов играет незначительную роль, обуславливая несколько мергелистый состав горизонтов ниже портланда или собираясь в желваки сферосидеритового или кальцитового характера (секванские септарины).

Частично углекислый кальций замещает CaF_2 в фосфоритах, обогащаясь за счет последнего в наружных корках.

Азот не играет роли, или, вернее, его химическое значение неизвестно; содержится в органическом веществе фосфоритов.

Кислород в качестве геохимического фактора имеет огромное значение, особенно хорошо наблюдаемое в свежих обнажениях юрских глин. Общая восстановительная среда этих обнажений заставляет опускаться глубину кислородной поверхности не глубже нескольких сантиметров, и только в ледниковом покрове, богатом уже окисленными соединениями, она опускается значительно ниже.

Окисление колчеданов вызывает длительный генетический цикл, ниже описываемый с большей подробностью.

Фтор входит в состав фосфоритов в различных количествах. Я. В. Самойлов приводит содержание фтора в 2, 31—3,28% в фосфорите неизвестного горизонта Костромской губ. К сожалению, мне не известно достаточного количества полных анализов мезозойских фосфоритов, но уже сейчас можно видеть, что эти числа отвечают нормальному составу фторапатита и даже его превосходят. Повидимому, это положение носит общий характер для всего района. Таким образом, накопление фтора в центрально-норусских фосфоритах достигает огромных величин; однако частично, согласно позднейшим анализам, фтористый кальций в наружной корочке замещается веществом типа франколита-штаффелита с присоединением к частице CaCO_3 и вынесением части фтористого кальция. Это очень интересная реакция, которая, может быть, дает объяснение происхождению ратовкитовых прослоек (см. стр. 144).

Натрий играет ничтожную роль, входя в виде неизвестных нам минералов в состав глин, слюдистых минералов в глинах и глауконите.

Магний входит в состав зерен глауконита, в которых он накоплен в виде первичного соединения. Никакие дальнейшие перемещения этого элемента мне не известны.

Алюминий известен только в первичных формах накопления: в глауконите, глинах и слюдах. Никакие особые реакции перегруппировки или миграции окислов этого элемента нам не известны, хотя, повидимому, в нижних горизонтах образуются растворимые сульфаты глинозема, которые вымываются водами из черных юрских глин и инфильтруются в глубину, в каменноугольные известняки (см. стр. 139). Хотя этот процесс, повидимому, идет в довольно широком масштабе, местами обогащая некоторые глины и превращая их в нечто вроде квасцовых глин, тем не менее у нас, к сожалению, отсутствуют точные аналитические определения.

Кремний. Прибрежный и мелководный характер мезозойских отложений района обуславливает большое накопление кварцевых песков, которые вместе с глинами представляют единственную форму крупной концентрации этого элемента. Среди многочисленных способов цементации песков (цементом — железистым, фосфоритовым, пиритовым и углекислым) лишь изредка наблюдается связывание кварцевых песчинок кремневым цементом. Таким образом, мы наблюдаем отсутствие циркуляции кремневых растворов, за исключением лишь самых нижних горизонтов юрской толщи.

Наконец, современным процессом миграции кремнезема является образование почвенных горизонтов — подзолов, богатых водной кремнекислотой.

Ф о с ф о р, подобно другим органогенным элементам, играет огромную роль, и его скопления составляют колоссальные запасы. Генетически мы наблюдаем тесную связь фосфорнокислых соединений с явлениями распада органического вещества в зоне диагенеза, причем очень интересные соображения А. Д. Архангельского связывают их фиксацию с массовой гибелью организмов в юрском море под влиянием морских течений или при трансгрессивном нарушении морского режима.

В дальнейшем ходе этих диагенетических процессов идет концентрирование фосфоритового вещества в конкрециях и перекристаллизация его.

В месторождениях вторичного характера намечается новая перекристаллизация фосфорита с частичной заменой фтористого кальция карбонатом этого металла.

С е р а. Роль ее заключается главным образом в фиксации сернистых соединений в форме пирита и в меньшей степени марказита. При окислении сера проходит обычный генетический цикл — серная кислота — мелантерит — гипс — сульфаты окиси железа.

Х л о р присутствует в фосфоритах лишь в виде ничтожных следов и, очевидно, никакой роли не играет.

К а л и й. Роль этого элемента довольно значительна ввиду огромных скоплений глауконита, обычно тесно связанного с фосфоритами. К сожалению, мне не известны точные данные анализов глауконита этих областей, но по частным аналитическим данным количество K_2O в них должно быть не менее 4—5%. Растениями этот калий непосредственно ассимилироваться не может, но прокаливание минерала до 500—600° С частично делает его растворимым.

К а л ь ц и й. Никаких особенностей миграции не наблюдается, роль в общем ничтожная. О карбонате Са см. на стр. 137 при описании углерода.

М а р г а н е ц входит в небольших количествах в состав большинства черных юрских глин и иногда накапливается в болотных рудах в довольно больших количествах (до 3%).

Ж е л е з о, повидимому, главным образом органогенного происхождения: первичное в оолитах, лимонитовых прослойках, пиритах и болотных рудах, вторичное — в окисных и закисных сульфатах, в псевдоморфозах лимонита по пириту и в железистых осадках водных растворов, вытекающих из некоторых горизонтов. Очень больших скоплений нигде не образует, но в среднем содержание железа в мезозойских отложениях весьма повышено.

М е д ь. Хотя она и указывалась раньше старыми авторами по Волге, по, очевидно, эти указания ошибочны и должны быть отнесены к железному колчедану. Тем не менее интересно отметить ничтожные следы меди в келловейских колчеданах, обнаруженные Я. В. Самойловым.

М ы ш ь я к. Я. В. Самойлов обнаружил небольшие количества мышьяка в фосфоритах Костромской губ. Более обычен он в колчеданах, причем в Костромской губ. обнаружено было до 1% As, тогда как в других мышьяк или отсутствовал (неокомский из Поливы), или содержался в тысячных долях процента (портландский). Отсутствие достаточного количества анализов не позволяет отметить здесь какие-либо закономерности. Возможно, что нахождение мышьяка в фосфоритах объясняется содержанием примеси мышьяксодержащего колчедана.

Б а р и й. Один из наиболее типичных и характерных элементов района, тесно связанный с определенными горизонтами: секваном и оксфордом. В терригенных прибрежных образованиях мы наблюдаем здесь накопление барита в виде конкреций диагенетического характера, причем частично

серноокислый барий может накапливаться и в трещинках мергелистых септарий.

Приуроченность скоплений этого элемента к осадкам определенного возраста на огромной территории Костромской губ. является весьма характерной.

ГЕНЕТИЧЕСКИЕ ЦИКЛЫ ЦЕНТРАЛЬНОГО РАЙОНА

А. Палеозой

Девон и переходные слои

Как видно из табл. IV (стр. 192), история геохимических процессов в центральной области начинается для нас с осадков девонского моря. В то время как на севере девонские слои представлены песками, песчаниками и слюдястыми глинами, на юге мы встречаем известняки и доломиты. Мелкие прибрежные образования севера, таким образом, на юге сменяются более глубоким открытым морем, тоже постепенно мелеющим и через переходную эпоху (малевко-муравнинского яруса) переходящим в отложения угленосного яруса. Заболачивание старого отступившего моря, отдельные изредка заливаемые морем заливы и бухты, болота и топи в обстановке влажного жаркого (субтропического) климата — такова картина этих новых отложений песков, глин и угля.

На с е в е этот процесс перехода мелкого девонского моря в лагунные полупресные бассейны карбона не отразился геохимически в резком изменении пород и вмещающих их химических соединений. Практика горного дела Боровичского района опытным путем установила, что глины каменноугольные — серые, белые, черные, большей частью огнеупорные, с кусочками древесины, угля и конкреций пирита, тогда как девонские — слюдястые и песчанистые с зеленоватым оттенком закисных соединений железа. Никакие особенные минеральные виды не привлекают здесь нашего внимания в девонских слоях или по границам осадков этих двух геологических периодов.

Иначе представляются химические взаимоотношения на юге, где налегание глинистой свиты на серию трещиноватых, поглощающих иногда даже воду известняков представляет обильное поле для катагенетических реакций обмена. Каких-либо особенных первичных минералов девонских известняков мы не знаем, но зато в ряде мест П. А. Земайтченский наблюдал образование карманов бурого железняка (лимонита и гидрогетита) и целых скоплений руд, образование которых, очевидно, приходится объяснить инфильтрацией растворов сверху, может быть даже еще в тот период, когда шло осаждение каменноугольных слоев, или в одну из последующих эпох континентальных периодов. К этим процессам инфильтрации железистых растворов приходится приурочивать и новообразование мельчайших кристаллов полевого шпата в виде ясно образованных индивидуумов (ортоклаза и микроклина).

Очень своеобразный процесс в этих известняках (малевко-муравнинского яруса) представляют неправильные скопления смеси боксита и гипса, открытые Барботом де Марни. Хотя они и не подтвердились позднейшими исследованиями и, очевидно, имели очень ограниченное распространение¹, тем не менее они намечают очень характерную реакцию,

¹ В двух пунктах Рязанской и Тульской губерний.

наиболее вероятное течение которой сводится: к окислению колчеданов верхней глинистой серии с частым образованием квасцовых глин, проникновением вниз в известняки растворов сернокислого глинозема; последний в известняках путем обменной реакции давал CO_2 (или бикарбонат закиси железа) и смесь гипса и гидратов железа и глинозема (например: $2\text{FeS}_2 + \text{H}_2\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8 \cdot \text{H}_2\text{O} + 4\text{CaCO}_3 + 14\text{O} + 9\text{H}_2\text{O} = 2\text{Fe}^{++}\text{CO}_3 \cdot \text{CO}_2 + 4\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O} + 2\text{SiO}_2^*$).

Повидимому, возможен и несколько иной процесс, намеченный Я. В. Самойловым, открывшим в известняках переходного возраста довольно большие количества аллофана: его скопления по аналогии с аллофаноидами вышележащих горизонтов (см. стр. 147) могут быть объяснены инфильтрацией сверху золей SiO_2 и Al_2O_3 и коагуляцией этих золей в области известняков действием электролита бикарбоната кальция; вышеприведенное уравнение химической реакции дает объяснение образованию аллофана.

Как видно, соотношение глинистых осадков с колчеданами наверху и известняками внизу приводит к очень интересному генетическому циклу с рядом обменных реакций: это соотношение очень часто повторяется не только в истории центрального бассейна, но и в других частях Европейской России (например, в Пермском бассейне, см. четвертую область), и определенно говорит, что смена глубоководных осадков моря континентально-прибрежными образованиями создает вполне определенный и богатый минералообразованием генетический цикл.

Угленосный ярус

Перехожу к следующей серии осадков угленосного яруса, может быть, самых интересных во всей каменноугольной толще и дающих большое разнообразие минералов и элементов; в них не только намечается ряд разнообразных минеральных тел большого практического значения, но и ставится ряд проблем, еще далеко не решенных современной минералогией. Классическими местами для изучения угленосного яруса являются угольные месторождения как северного крыла в районе Боровичей, так и в Подмосковном районе, где обилие добычи полезных ископаемых дало возможность весьма полного и детального обследования геохимической обстановки.

По данным М. Д. Залесского, перед нами рисуется картина прибрежной низины у девонского материка, с болотами, топиями, озерами, с роскошной лесной растительностью субтропического климата. Водоросли и споры вместе с торфяной массой составляли главный материал для образования угольных прослоек; при колебаниях морского уровня их засыпал песок и покрывали глинистые осадки; в отдельные моменты быстрых наступаний моря они покрывались слоем известняка. В топях шло накопление приносимых ветром с берега спор, дававших начало курным углям (кеннелам), тогда как в самих озерах образовывались из отмерших водорослей богхеды. Распад растительных веществ с заключенными в них элементами приводил к образованию большого количества конкреций пирита и марказита¹, накапливавшихся почти всегда в нижних частях пласта угля или в подстилающих песках, и стяжений сферосидерита, тогда как отмученный илистый осадок, переработанный кислыми водами

* В сильно окислительной обстановке окисление железа шло еще дальше с образованием лимонита и свободной угольной кислоты.

¹ По данным Прокунина, совершенно без селена и со следами мышьяка.

торфяников, приводил к скоплению чистых масс каолиноподобных осадков огнеупорных и гончарных глин высоких технических качеств. Геохимически мы подчеркиваем эту связь чистых глинистых продуктов с буровугольными осадками мелких бассейнов, так как эта зависимость повторяется и в других областях земной коры и в другие эпохи (например, с третичными бурыми углями).

Наконец, последним, очень типичным сингенетическим процессом этих отложений является скопление чистейших кварцевых песков, почти свободных от железа и поэтому имеющих большое практическое значение.

Вышеописанная картина более или менее выдерживается на всем протяжении угленосного яруса, но к ней в северной части примешиваются два геохимических процесса, на которые следует обратить особое внимание и которые, повидимому, должны быть отнесены к явлениям катагенетического или древнегипергенетического характера, — это образование бокситов и сернистых тяжелых металлов в Боровичско-Тихвинском районе. Все остальные катагенетические процессы носили более обычный характер и сводились к окислению пиритов, образованию квасцовых глин и частичному замещению известковых прослоек с преобразованием их в бурые железняки или сферосидериты.

Бокситовая область Тихвинского уезда, благодаря трудам В. И. Искюля, М. М. Васильевского и А. Д. Стопневича и на основании личных наблюдений, рисуется нам в следующем виде.

Мощные скопления бокситов и обогащенных глиноземом и окисью железа пород приурочены к определенной полосе вдоль границы, разделяющей продуктивные и продуктусовые слои. Бокситы лежат среди глин и песков нижнего горизонта, частью непосредственно на девоне; насколько можно судить по имеющимся обнажениям, они нигде не подстилаются известняками и образуют неправильные скопления и гнезда, кровля которых, к сожалению, в точности неизвестна, как неизвестно и то, продолжают ли они далее на восток под известняки. Минералогически они отличаются большим содержанием гидраргиллита, диаспора, гидратов Fe_2O_3 , близких к гидрогематиту, рутила и каолинита. В отношении химического состава поражает отсутствие Mn и ничтожные количества Ca, Mg и карбонатов, при очень высоком содержании TiO_2 (до 6,4%) и Al_2O_3 (до 72%).

Происхождение бокситовых скоплений, крайне изменчивых по своему составу, делает наиболее вероятным предположение, что они образовались путем гидрохимического изменения ранее бывших прослоек известняка и что этот процесс приходится скорее всего относить к тому огромному континентальному периоду, который наступил в этом районе с момента отхода на восток каменноугольного моря. Лично я связываю его с прибрежным преобразованием береговой полосы известняков при отступании каменноугольного моря к востоку и готов видеть начало бокситизации еще в периоды отложения на востоке продуктусового известняка. Любопытно отметить, что этот процесс, правда в несколько ином виде, наблюдался на южном крыле в Рязанской губ. В северных частях той же полосы боксит отсутствует и заменяется железистыми прослойками красных и желтых охр высоких технических качеств, обычно перекрытых серыми и черными глинами.

Этот процесс бокситизации верхних горизонтов глинисто-песчаной толщи, таким образом, характерен лишь для одного участка каменноугольной полосы и хотя и отмечается, как выше указано, частично и на юге, но в общем не носит общего характера. Во всей средней части каменно-

угольной дуги никаких аналогичных процессов на границе с продукту-совыми известняками не наблюдается, но зато на самом северном (Олония) и на самом южном крыле (Рязанская губ.) наблюдается другой процесс, очень постоянный и несомненно сходный с бокситизацией — накопление окислов железа. В районе на север от Северной железной дороги в верхних слоях нижнего яруса наблюдаются целые горизонты железных руд, иногда почти чистого, бедного водой «красного железняка» и сопутствующих ему прекрасных желтых и красных охр. Повидимому, эти осадки носят частично первичный характер и спокойно переслаиваются с песками; однако точной картины их генезиса нарисовать нельзя. В противоположность бокситу, для них типично содержание марганца.

Второй цикл интереснейших геохимических явлений области связан с накоплением сернистых соединений тяжелых металлов. В общем количество сернистых соединений в угольных слоях и связанных с ними песках весьма значительно и для южного крыла выражается не менее чем 1—2% на общее количество угля. Еще выше эта цифра для Боровицкого района, где на одну кв. сажень выработки приходится не менее 20 пудов колчедана. Не менее высокие цифры получаются для содержания серы, если мы возьмем анализы богхедов и курных углей, в составе которых отсчитается 3—5% серы. Эта-то сера, очевидно, и положила начало скоплениям сернистых тяжелых металлов. Мои исследования привели к ниже-следующей вероятной картине генетического цикла. В мелководных бассейнах шло на дне накопление илистых осадков и гидратов сернистого железа, частей гниющей древесины и пр. При процессах диагенеза гидраты сернистого железа переходили в колчеданы, которые образовывали на месте среди обугленных остатков конкреции пирита, частью псевдоморфозирова древесину и корневища (стигмарию), частью проникая в нижележащие пески и цементируя их; последним процессом было положено начало крупным стяжениям колчедана. Третьим моментом в этих процессах является фиксация на поверхности или в трещинках колчеданов сернистых соединений цинка, меди и свинца, из коих последний совершенно обволакивал стяжения колчедана очень тонкой сине-стальной пленкой. Изредка гааленит встречался и в самом угле между его слоями, реже в красивых кристалликах в сферосидеритовых конкрециях песков, вместе с пиритом и сидеритом. Катагенетическое происхождение этих тяжелых металлов не подлежит сомнению, но остается вопрос, откуда они проникли в каменноугольные слои. Мои детальные исследования показали, что и на западе с угольными слоями каменноугольного возраста связаны именно эти металлы¹ и что там их происхождение частью приписывается гидротермальным процессам, частью, что вернее, сингенетическим осадкам мелких бассейнов. Полное отсутствие каких-либо глубинных термальных процессов в Центральной России заставляет отвергнуть первое объяснение и остановиться на идее фиксации органическим веществом растворов (гидрозолей) тяжелых металлов или в процессе жизнедеятельности, или, что вернее, путем поглощения этих солей угольным коллоидальным веществом. Вместе с тем нужно думать, что возможность этого процесса создалась в каменноугольную эпоху лишь благодаря тем мощным гидротермальным и тектоническим явлениям, которые шли по периферии Московского бассейна, вынося вместе с лавами и горячими растворами соединения тяжелых металлов. Обогащение морских бассейнов каменноугольного моря сначала тяжелыми металлами, а потом и соединениями

¹ Ср. заметку Зиммерсбаха (B. Simmersbach. Der Geologe, 1918, № 21, 381).

фтора перебрасывает мост между рудными процессами герцинских складок и накоплениями этих металлов, а позднее и плавика в свите осадков путем главным образом биохимических реакций.

Продуктусовые и московские известняки

Переходим теперь к следующим отложениям по геологической хронологии — к продуктусовому ярусу. Он знаменует собой вновь трансгрессивное наступание открытого моря и если в своей нижней части еще содержит отдельные прослойки глин и углей, то выше сменяется сплошной массой известняков — глубоких осадков тянувшегося к востоку большого каменноугольного моря. Видимые отложения этого яруса довольно узкой полосой окаймляют Московский бассейн с его обоями крыльями и почти без каких-либо заметных колебаний перекрываются литологически сходными каменноугольными известняками московского яруса.

Собразно с этой историей продуктусовых отложений строится и геохимическая история пластов: в нижних горизонтах еще имеются слои угля с редкими колчеданами, огнеупорные глины, выше идет комплекс известняков с переслаивающимися мергелями и доломитизированными прослойками. Эти известняки прорезаны рядом водоносных горизонтов. Сами известняки местами состоят из сплошных скоплений кремневых рогулек, покрытых снаружи белой корочкой, а по своей форме представляющих ветвистое, замысловатое строение, часто с пустым каналом внутри (например, по р. Мсте, выше Боровичей). Таким образом, из сингенетических образований продуктусовых отложений надо считать: углекислую известь, огнеупорные глины, марказиты и уголь и, может быть, частично к ним надо относить если не в настоящем своем виде, то все же в виде зачатков, кремневые конкреции. Главное же явление накопления кремневых горизонтов я отношу к процессам катагенеза, равно как и небольшие скопления кристаллов кварца и кальцита в пустотах известняка. Местами, особенно в южных областях, эти известняки, вероятно в периоды континентальных эпох, были превращены путем гипергенеза в скопления бурого железняка, представляющие практическую ценность.

Однако в общем ни с минералогической, ни с геохимической точки зрения известняки продуктусового яруса ничего интересного не дают.

Как выше указано, без резких литологических изменений, хотя не без некоторого несогласия или перерыва, осадки нижнекаменноугольного моря покрываются глубокими известковыми осадками верхнего карбона; в самых нижних горизонтах московских отложений, всего лишь в нескольких метрах от нижней границы мы встречаемся в ряде мест, особенно в Московской и Тверской губерниях, с прослойками землистого фтористого кальция — ратовкита¹. Большие скопления этого минерала в осадочной свите пород в сущности не имеют себе аналога в других месторождениях земной коры и невольно привлекли к себе внимание и геологов, и минералогов.

А. П. Карпинский первый обратил внимание на ту геохимическую обстановку, в которой происходило образование осадков нижних горизонтов московского яруса, и, суммируя большое количество фактов из истории этого переходного момента, установил, что как раз в начале отложений московского яруса по периферии Русской платформы шли весьма серьезные дизъюнктивные и пликтивные дислокации, результатом

¹ Есть старое указание на то, что ратовкит встречается и у Боровичских порогов на реке Мсте, однако все мои поиски в этом направлении не увенчались успехом.

которых явились ряд несогласий на северном берегу и излияния изверженных пород и горячих водных растворов или эманации на южном и восточном (уральском) берегах каменноугольного моря¹.

Эти крупные геологические процессы оказывали свое влияние на центральный морской бассейн, изменяя его границы и в самый переходный период между обоими ярусами обнаруживая какой-то перерыв нормального напластования с известковыми конгломератами, глинами и т. п. К этому еще присоединялся ряд небольших сбросов по самой западной границе нижнекаменноугольного моря и ряд несогласий, обнаруживающихся сейчас в области Тверской губ.

Такова была обстановка образования осадков нижних горизонтов московских известняков, и в ней, совершенно понятно, надо искать отражение тех геохимических реакций, которые шли по периферии и под поверхностью каменноугольного моря. Я склонен думать, что в это время море обогащалось эманациями фтористых соединений, которые проникали на поверхность как на южном и уральском берегах, так, может быть, и на западном берегу моря (Ржев—Зубцов). Это обогащение создавало возможность, путем биохимических реакций, фиксировать фтористые соединения и отложить их в ряде прослоек ратовкита, следующих по определенным стратиграфическим горизонтам. Однако эти горизонты я не могу считать первичными: ратовкит проникал сюда вместе с подземными водами, фиксируясь в подходящей для этого петрографической среде, и наблюдения мои 1920 г. показали, что наибольшие скопления их обычно приурочены к вертикальным трещинам, в которых сам минерал не встречается, но накапливается вместе с кремнем в местах пересечения этих трещин с некоторыми определенными горизонтами.

Таким образом, я считаю скопления ратовкита образованиями катагенетического характера, связанными с биохимическими процессами (что доказывается присутствием в его скоплениях небольших количеств фосфорной кислоты, с содержанием до 4—5% фосфата кальция). Сама возможность образования этих скоплений создана наличием тех процессов тектонического, магматического и гидротермального характера, которые шли по периферии московского моря.

Обогащение местами ратовкита фосфатами и сульфатами кальция (5% максимум для первых, а 2—3% для вторых) наводит на мысль об осаждении этих соединений в виде комплексных солей типа фосфорита.

Перейдем теперь к последовательному изучению с его генетического цикла, связанного с этим глубоководным бассейном московского времени, накопившим мощную свиту известняков, доломитов, мергелей и мергелистых глин. Вся эта серия осадков без перерыва переходит в более глинистые и магнезиальные разности гжелских отложений, а затем выше, после перерыва, лежат уже мелководные глины и пески мезозоя и ледниковый нанос. Огромный континентальный период после каменноугольной эпохи, мощная эрозия ледникового процесса и, наконец, характерное взаимоотношение серии пород из известняков внизу и глинистых осадков с фосфатами и сульфидами наверху обуславливают катагенетические явления в огромном масштабе, причем местами эти процессы идут и поныне, сливаясь вместе с гипергенетическим воздействием атмосферы.

В сущности только эти катагенетические образования и привлекают наше внимание, тогда как из образований сингенетического или диагене-

¹ Только с верхнего карбона на Урале начался излияния и поднятия гранитных агм, основных носителей фтористых возгонов.

тического характера мы можем отметить только следующие минералы: известковый шпат, доломит, конкреции кремня.

Долго останавливаться на этих образованиях не приходится, так как необходимо иметь в виду отсутствие каких-либо особенных геохимических процессов при образовании карбонатных пород. Любопытно только отметить, что, по данным Ф. А. Николаевского, во время обычного биохимического осаждения углекислого кальция в каменноугольном море шло образование арагонита в качестве окаменяющего вещества кораллов *Chaetetes*. Может быть, часть кремней относится к этим же периодам диагенеза, но наше особое внимание привлекают прослойки доломитовых мергелей, постоянно переслаивающихся с известняками. В то время как часть доломитов верхних горизонтов несомненно относится к позднейшим гипергенетическим процессам выноса карбоната кальция, другие горизонты мергелистого характера и обычно зеленоватых тонов (с закисью железа), несомненно, должны считаться первичными (вернее, диагенетическими). Их образование можно объяснить фиксацией магния при больших концентрациях мелеющего морского бассейна, что особенно видно по листистому характеру осадков, которые обычно сопутствуют слоям, обогащенным магнием.

Катагенез московских известняков

Как указано выше, наибольшую роль в московских известняках играют катагенетические процессы, которые в значительной степени продолжают и сейчас в современной обстановке; таким образом, явления катагенеза сливаются с явлениями гипергенеза, и к последним в чистом виде можно отнести только ничтожные дендриты марганца, окисление железа или образование пенистого шпата и туфа в местах выхода источников.

Все катагенетические процессы, особенно хорошо наблюдаемые под самой Москвой, находятся в зависимости от ряда обменных реакций между карбонатами известняков и элементами покрывающих их глинистых толщ юры и ледникового покрова и частью элементами самой атмосферы. Они могут быть сведены к следующим типам:

- 1) окремнение;
- 2) палыгорскитизация;
- 3) доломитизация (частью процессы диагенеза и древнего гипергенеза);
- 4) накопление каолина (главным образом, процесс древнего гипергенеза);
- 5) образование железных руд¹;
- 6) накопление землистого флюорита (ратовкита);
- 7) кальцитизация (кальцит, мрамор);
- 8) накопление коллоидальных гидратов глинозема и кремнезема и землистых фосфатов;
- 9) образование полевых шпатов.

Процесс 6 приурочен к наиболее нижним горизонтам московского яруса, 1, 2 и 7 — к нижним и средним, а 3, 4 и особенно 8 — почти исключительно к верхним горизонтам или к самой поверхности так называемых переходных слоев.

1. Несомненно самым крупным и очевидным процессом является о к р е м н е н и е известняков с образованием халцедона, агата, полуопала, кремня, кварца, цитрина и аметиста. Целые горизонты московского яруса сплошь замещаются кремнеземом, образуя красивые пустоты, выстланные различными разновидностями этой минеральной группы (Дорогомилово, Подольск, Русавкино, по р. Вазузе, Осуге, и др.). Этот процесс окремнения

¹ Для известняков московского яруса мало типичный процесс.

шел в значительной степени не только в прошлые материковые периоды этой части Русской равнины, но особенно в ледниковое и настоящее время; тем не менее нельзя не отметить, что некоторая часть кремней должна была быть связанной с процессами диагенетического характера, так как носит характер окремнения некоторых палеонтологических остатков, органическое вещество конх, повидимому, непосредственно было замещено кремнеземом. Наблюдение над аллофаноидами (см. ниже) наводит на мысль, что эти реакции вызываются гидрозолями кремнезема, вымываемыми поверхностными водами из коллоидальных глин юрского или ледникового возраста; эти гидрозолы, переходя в гидрогели, фиксируются в виде силикатов под влиянием карбонатов известняка или доломита; обменная реакция с последними, повидимому, и дает начало тому свободному выделению CO_2 , которое имеет место в ряде источников, вытекающих из горизонтов московского яруса.

2. П а л ы г о р с к и т и з а ц и я является одним из процессов обменных реакций между притекающими кремневыми растворами и магнетиз глинистых осадков. Весьма вероятно, что значительная часть этого магнезиального алюмосиликата образуется на месте доломита мергелистых прослоек, по которым обычно наблюдаются водоносные горизонты, которые и дают возможность перегруппировки соединений слоя в палыгорскит; однако не исключено влияние и притекающих вод с кремнеземом, так как изредка этот минерал не только приурочен к определенному горизонту, а наблюдается в вертикальных трещинках доломита.

Из разностей палыгорскита встречаются α и β , с различным содержанием глинозема, причем первая, как более богатая глиноземом, тесно связана с глинистыми осадками, пропитывая кои она превращает их в своеобразную массу, напоминающую плохой картон или бумагу. Подробнее ход этих реакций будет описан в области четвертой.

3. Д о л о м и т и з а ц и я. Как выше отмечено, часть прослоек, содержащих магнезию, носит первичный характер; однако большие скопления желтого железистого доломита в верхних частях московского яруса носят несомненно катагенетический или гипергенетический характер. Их образование приходится связывать с выщелачиванием поверхностными водами углекислого кальция и с постепенным обогащением магнезией, благодаря чему образуются иногда чисто мучнистые массы доломитовых кристалликов с большими седлообразно изогнутыми кристаллами в толстах и трещинах.

4. Накопление к а о л и н а и г л и н связано изредка с верхними горизонтами московской толщи и достигает большого развития лишь в отложениях гжельского яруса. Хотя, подобно доломиту, часть глинистых прослоек, переслаивающихся с известняками, носит первичный характер, другая, и притом несомненно большая, связана с катагенетическими реакциями, вызванными водами поверхности восстановительного характера с обычным содержанием угольной кислоты, сероводорода и т. д. Эти воды по преимуществу из юрских глин восстанавливают железо и в виде бикарбонатов выносят кальций, магний и железо, накапливая однородный, чистый, иногда белоснежный материал, приближающийся к каолину. Это один из типичных процессов, имеющих место лишь в случае возникновения на поверхности восстановительных вод и повторяющихся постоянно, когда распад известняка или мергеля вызывается растворами, проникающими сверху из глинистых толщ с органическими остатками¹. Наоборот —

¹ Часть глин по времени может быть связана с первыми моментами наступания юрского моря.

чисто материковое выветривание (типичный гипергенез) в сухом и жарком климате и с глубоко расположенной кислородной поверхностью приводит к процессам иного типа, с замещением известняков железными окисленными рудами или с накоплением продуктов дальнейшего распада глины — бокситов.

5. Процессы образования железных руд на размытой поверхности камменноугольных и девонских известняков изучены с большой детальностью П. А. Земятченским. Часть аналогичных процессов замещения связана с пермскими отложениями и подробно излагается при описании четвертой геохимической области.

Хотя эти процессы связаны с воздействием атмосферы и поверхностных деятелей, тем не менее они носят типично катагенетический характер, так как находятся в зависимости от тех железных скоплений, которые приурочены к разным горизонтам юры. Исследования П. А. Земятченского с полной определенностью показали, что накопление руд не приурочено ни к какому определенному стратиграфическому горизонту карбонатных пород, тесно связано с теми горизонтами, кои непосредственно перекрываются юрскими, меловыми или третичными отложениями, и что во времени этот процесс мог захватывать огромные промежутки, начиная от мезозоя вплоть до настоящего времени. Нормальный ход процесса выражается прежде всего в замещении кальция известняков закисью железа и в превращении сидеритов в лимониты, гетиты, гидрогетиты и охры. Некоторые авторы, как К. Д. Глинка или Н. Н. Боголюбов, связывают генезис этих руд с разрушением глауконитовых песков верхневолжских горизонтов. Для горизонтов московского яруса это мало типичный процесс.

6. Накопление р а т о в к и т а. Этот процесс уже описан выше детально, и мне остается лишь прибавить, что он идет нередко одновременно с окремнением и палыгорскитизацией, и поэтому парагенезис палыгорскита, кварца, халцедона и ратовкита является весьма постоянным.

7. Немного приходится остановиться и на процессе к а л ь ц и т и з а ц и и, которая очень характерна для некоторых средних горизонтов, выражаясь, с одной стороны, в образовании кристаллов кальцита и доломита и натечков известкового шпата, а с другой — в полной перекристаллизации некоторых горизонтов с образованием плотных мраморных масс превосходных технических качеств (подольский, шемардинский мраморы и др.).

8. Наконец, весьма интересным процессом является осаждение к о л л о и д а л ь н ы х г и д р а т о в г л и н о з е м а, к р е м н е з е м а и отчасти железа (см. стр. 145). Гидрозоли этих окислов из черных юрских глин проникают в подстилающие их верхние доломиты, в трещинах коих они отлагаются в виде аморфных корочек типичного коллоидального строения. Повидному, этот переход в гидрогели связан с действием угольной кислоты известняков или, может быть, фиксацией угольной кислоты в виде бикарбоната щелочноземельных металлов. В результате этих процессов получается накопление гидратов самого разнообразного состава: от чистого гидрата глинозема (шаньвскита) до чистого коллоидального кремнезема — лардита, впервые наблюдавшегося П. А. Земятченским в трещинках камменноугольных известняков различных возрастов. Все промежуточные соединения коллоидов, близкие к аллофанам, были очень удачно названы аллофаноидами и являются, повидному, вообще типичными для всех тех случаев, когда коллоидальные глины перекрывают известняки (см. аллофан в девонском известняке, стр. 140).

9. К процессам гидрохимической переработки известковых пород (известняков и доломитов) в катагенетический период надо относить и новообразование кристалликов п о л е в о г о ш п а т а (ортоклаза, микроклина

и анортотклаза), отмеченное Земятченским в каменноугольных известняках Тульской, Калужской и Рязанской губерний и девонских — около г. Липецка. Повидимому, мы имеем здесь дело с общим процессом большого геохимического значения, идущим в древних породах России в колоссальном масштабе. Желательно было бы более систематическое изучение этого вопроса.

Гжельские слои

Нам остается сказать еще несколько слов о самых последних отложениях карбона — гжельского яруса, которые далеко не всюду сохранились, будучи смесены и размыты долгой эрозией юрских бассейнов и в течение материкового периода. Там, где породы этого яруса еще сохранились, они имеют характер верхних горизонтов московского — преобладание пористых мучнистых доломитов, накопление чистых огнеупорных глин, как результат выпечивания мергелей, может быть при наступлении юрского моря, проникновение кремневых растворов с осаждением кристалликов кварца, стяжениями кремня и т. д.

Качественно мы в них не встречаем ничего нового, но количественно в них несомненно привлекает внимание распространенность огнеупорных глин высоких технических качеств.

Любопытно новообразование больших кристаллов кварца (до 1 см) белого цвета или водянопрозрачных в белой огнеупорной глине ст. Кудиново.

Вслед за известными нам осадками гжельского яруса наступает долгий континентальный период, смывший и уничтоживший все те прибрежные и мелководные осадки, которые должны были образоваться при отступании гжельского моря к востоку. Континентальный период с его мощным размывом, а затем последующая келловейская трансгрессия еще более усложнили рельеф известняков, обусловив их метаморфизм и положив начало тому длинному генетическому циклу ката- и гипергенетических процессов, о которых сказано выше.

Б. Генетический цикл мезозойских отложений и ледникового покрова

В окрестностях Москвы и по Волге в Костромской губ. уже давно было обращено внимание на те минералы, которые связаны с черными глинами и в которых процессы минералообразования заслуживают особого внимания.

На размытых в течение долгого континентального периода каменноугольных известняках или пестрых пермских мергелях здесь залегают осадки юрских горизонтов от келловей вплоть до гольта и апта (и отчасти турона) мелового возраста. Прибрежные образования мелкого моря, извилистая непостоянная береговая линия, может быть, местами сильные течения, замедлявшие накопление осадков, и сложные биохимические процессы — такова общая картина химических превращений этого длинного периода времени, в течение которого была отложена разнообразная серия глин, богатых органическим веществом и фосфорной кислотой, мергелей и песков¹. Огромные скопления организмов положили начало ряду особых минералов, среди которых пирит, глауконит и фосфорит являются образованиями, тесно перемешанными между собой и тесно связанными общим генезисом.

¹ Анализы оксфордских глин Елатмы и Дорогомиллова (см. Труды Вольно-Экономич. об-ва, 1885, IV, 409).

В илистой массе осадков, богатых сероводородом и продуктами распада органических соединений, в сильно восстановительной обстановке шли реакции образования конкреций сферосидерита, фосфорита (и барита). Фораминиферы и радиолярии накапливали углекислый кальций и кремнезем, частично потом замещаясь фосфоритным веществом. Остатки аммонитов и других раковин замещались колчеданом или фосфоритом; в сложной химической реакции накапливались зернышки глауконита. Особенно интересными являются те образования, кои приурочены к ряду моментов геологического перерыва: так, в основании неокома и отдельных зон портланда лежат глиняцевые фосфориты, образующие весьма крупные скопления в виде конгломерата. По мнению одних, они являются вторичным накоплением моря при его трансгрессивных или регрессивных движениях; однако отсутствие окатанности заставляет искать и другое объяснение: А. Д. Архангельский совершенно справедливо видит в них серию непрерывных, но очень медленно отлагавшихся осадков и приурочивает такие кажущиеся перерывы в осадках не столько к трансгрессиям, сколько к очень замедленному темпу осаждения в области сильных морских течений; он очень остроумно привлекает к этому же процессу и массовую гибель планктона и таким образом объясняет широкую возможность накопления именно фосфорноокислых скоплений.

Ряд других фактов определенно говорит нам о непостоянстве и резких изменениях режима некоторых горизонтов, например, портландского, и накоплении фосфоритных слоев в связи с особенно резкими движениями.

В области катагенеза мы не знаем сколько-нибудь резко выраженных химических реакций; что же касается явлений г и п е р г е н е з а, то их характер в значительной степени сходен с современными воздействиями атмосферы, что и понятно, так как мезозойские отложения, начиная с верхнего мела, сделались поверхностью материка и таким образом уже давно подверглись действию атмосферных агентов. К чисто катагенетическим реакциям надо отнести: накопление кристалликов барита в известковых септариях (Макарьев, Костромской губ.) и пропитывание некоторых горизонтов гидратами окиси железа, или углекислым кальцием, или колчеданом.

Несомненно особый интерес представляет генетический цикл, связанный с процессами г и п е р г е н е з а. Основным фактором этих процессов являются кислород и угольная кислота воздуха. Окисление колчеданов идет по весьма определенному порядку: колчедан прежде всего окисляется в серную кислоту и железный купорос; первый частично входит в состав мелантерита, образуя кислые соли, частично же дает гипс или вымывается дождем в виде сульфата кальция. Мелантерит в весеннем ландшафте накапливается на черных глинах в довольно больших количествах в виде зеленоватых выцветов; первый дождь смывает эти соли и переносит сульфаты в воды, где железо окисляется и осаждается в виде гидрата, а серная кислота связывается с кальцием. В очень сухую весну можно наблюдать другой тип процесса, когда мелантерит обезвоживается на месте, здесь же окисляется и, переходя сначала в белую соль, потом постепенно превращается в не изученные еще водные сульфаты окиси железа, столь часто принимаемые по ошибке за самородную серу. Интересно отметить, что при процессах ката- и гипергенеза идет изменение и фосфоритов, из которых частично выносятся фтористый кальций. Другим очень редким продуктом изменения фосфоритов является образование вивианита в его трещинах.

Частично идет просачивание кислых серноокислых растворов в глубины, с чем можно связать накопление некоторых вторичных огнеупорных глин.

Ледниковый покров, размывая мезозойские отложения, положил начало мощной свите глин, частично обусловивших поверхностные водоносные горизонты и этим путем предохранивших юрско-меловые отложения от энергичного окисления. Никаких особых геохимических реакций в их среде мы не знаем.

Наконец, в современной обстановке идет ряд типичных и хорошо изученных геохимических процессов. Почвенный покров почти нигде не захватывает в свой цикл мезозойские отложения и обычно образуется на толщах моренных глин, превращая их в подзолы с горизонтами оршпштейна. Обычный цикл проходят и болота с их сначала синим, а потом быстро буреющим вивианитом, с болотными и дерновыми рудами.

С геохимической точки зрения, перед нами типичная картина географического режима средних широт с большим однообразием подпочвенных горизонтов (ледниковых), обуславливающих интенсивность атмосферного воздействия на коренные породы лишь в немногих обнажениях по крутым берегам рек или оврагов.

ОБЩИЕ ЗАКЛЮЧЕНИЯ

На основании сказанного можно наметить несколько выводов из вышеприведенного разбора минералообразовательных и геохимических процессов области, обоснование и развитие коих является задачей дальнейших, более полных и более планомерных исследований:

1. Центральный район характеризуется отсутствием процессов гидротермального, магматического или посторогенического характера, а его слабые дислокационные явления лишь косвенным образом явились причиной некоторых геохимических процессов (F).

2. Самыми интересными геохимическими явлениями области следует признать сингенетические и диагенетические образования с фиксацией фосфора и калия, а также ряд катагенетических процессов, возникающих на границах глинистых (юрских) и известковых (каменноугольных) осадков.

3. Смена глубоководных бассейнов континентальными образованиями и мелководными бассейнами создает своеобразный и несколько раз повторяющийся генетический цикл, в котором особенно характерным является образование сульфата глинозема, во-первых, и осаждение его известковыми породами с накоплением гидратов глинозема (бокситов, аллофана, аллофановидов и т. п.), во-вторых.

4. Катагенетические процессы в ряде отложений продолжаются и ныне, продолжая окремнение, доломитизацию, лимонитизацию и палыгорскитизацию карбонатных пород, часть коих выносятся водами, часть же разлагается с выделением свободной угольной кислоты.

5. Геохимическая ассоциация элементов резко отлична для палеозойских и мезозойских отложений; первая характеризуется весьма своеобразным комплексом элементов обычного поля с определенно выраженным развитием поля глубинного; в этом виде ассоциация элементов совершенно сходна с соответственными ассоциациями тех жильных процессов и горных хребтов, кои возникли в конце палеозойской эры (Нагольный край, Урал).

6. Характерными чертами этой ассоциации является своеобразная роль F.

7. Геохимическая ассоциация элементов мезозойской толщи совершенно определенно построена из элементов органогенного характера, чему и отвечает целый цикл биохимических реакций на дне неглубокого моря.

8. Отличительными чертами ее является обогащение К и Р, а также приурочение бария исключительно к горизонтам секвана и оксфорда.

9. Катагенетические реакции в мезозойской толще развиты весьма слабо, а гипергенетические, хотя и носят весьма интенсивный характер, но известны лишь в немногих местах, где кислородная поверхность может быть проведена через их толщу.

Главнейшая литература

По геологии

- И. Бок и А. Дитмар. Материалы геол. России, 1871, III, 79, 186.
 С. Н. Никитин. Лист 56-й. Труды Геол. ком., 1884, I, № 2. (Ярославль, Ростов).
 Г. Струве. Über die Schichtenfolge in den Carbonablagerungen im südlichen Theil des Moskauer Beckens, [О последовательности слоев каменноугольных отложений южной части Московского бассейна]. Mém. Acad. Sci., 1886, XXXIV, № 6.
 С. Н. Никитин. Каменноугольные отложения подмосковного края. Труды Геол. ком., 1890, V, № 5.
 С. Н. Никитин. Лист 57-й. Там же, 1890, V, № 1.
 С. Н. Никитин. Guide des excursions du Congrès géol., SPb., 1897.
 Труды Фосфоритной комиссии при Сельскохозяйственном институте в Петровско-Разумовском. 1909—1915, I—VII (под редакцией Я. В. Самойлова).
 П. А. Борисов. Очерк геологии и полезных ископаемых Олонецкой губ. СПб., 1910, 30.
 В. Хименков. Каменноугольные отложения Тверской губ. Ежегодн. геол. мин. России, 1910, XI, 174—190.
 В. Хименков. Изв. Геол. ком., 1912, XXXI, 247—248. (Тверская губ. по р. Волге и притокам).
 А. Розанов. О зонах подмосковного портланда. Bull. Soc. nat. Moscou, 1912.
 Н. А. Соколов. Гидрогеологический очерк Московской губ. Изд. Моск. губ. земства, 1913.
 А. П. Павлов. Геологический очерк окрестностей Москвы. Москва, 1914.
 П. Пальчиковский. Боровичско-Тихвинский район. Пг., 1919.
 Я. В. Самойлов. Залежи известняка для сельско-хоз. нужд Московской губ. Изд. Общ. Комит. по делам удобрений. Москва, 1919 (с картой).
 А. Д. Архангельский. Обзор геологического строения Европейской России, т. II. Средняя Россия. Пг., Геол. ком., 1922.

По минералогии и геохимии

- А. Крылов. Труды Яросл. статист. комит., 1871, вып. 7 (Источники Яросл. края).
 П. А. Земятченский. Железные руды Центральной России. Труды СПб. об-ва естествоиспыт., Отд. геол. и мин., 1889, XX.
 Д. Артемьев. Барит из Костромской губ. Bull. Soc. nat. Moscou, 1904, 364.
 П. А. Земятченский. Über Orthoklas... Lipetz. [Об ортоклазе... Липецка]. Zs. Kryst. u. Min., 1904, 379.
 А. Иванов. Материалы минералогической экскурсии в окрестностях Москвы. Естественное и география, 1907, № 2—3.
 С. И. Чарноцкий. Очерк месторождений железных руд. Зап. Горн. ин-та, 1908, I, 343.
 Я. В. Самойлов. О месторождениях тяжелого шпата Костромской губ. Изв. Акад. Наук, 1910, 857.
 В. Ильин. Микроскопическое строение подмоск. каменноуг. изв. Bull. Soc. nat. Moscou, 1911, XXV, прот. 11.
 Ф. А. Николаевский. Ряд статей по минералогии окрестностей Москвы. Изв. Акад. Наук, 1912, 292, 715; 1914, 147.
 А. Е. Ферсман. Исследования в области магнезиальных силикатов. Зап. Акад. Наук, 1913, (VIII), XXXII, 2.
 В. Хименков и Соколов. Серный колчедан, огнеупорная глина и каменный уголь. Москва, 1913.
 А. Е. Ферсман. К минералогии окрестностей Боровичей. Изв. Акад. Наук, 1915, 1559.
 А. С. Сергеев. Поиски ратовита в отложениях Подмосковного края. Труды Геол. муз., 1915, I. Год издания 1919.

- Я. В. Самойлов и Н. Червяков. Об аллофане Рязанской губ. Изв. Акад. Наук, 1915, 197.
- А. П. Карпийский. О происхождении накоплений плавикового шпата. Изв. Акад. Наук, 1915, 1539.
- П. И. Степанов. Изв. Геол. ком., 1915, XXXIV, 329 (Боровичи).
- М. М. Пригоровский. Серные колчеданы в южной части Подмосквового бассейна. Изв. Геол. ком., 1915, XXXIV, 807.
- М. М. Пригоровский. Об углях и некоторых других ископаемых Подмосквового бассейна. Там же, 1057.
- Я. В. Самойлов. Месторождения серного колчедана. Мат. КЕПС, 1916, № 12.
- П. А. Землячянский. Фельдшпатизация известняков. Изв. Акад. Наук, 1916, 99—122.
- Н. Н. Боголюбов. Разработка железной руды... Калужской губ. Рудный Вестник, 1916, I, 109—115.
- А. Аятропов и Э. Акерман. Анализы ратовкита. Труды Ком. сырья, I, 1916, 42; III, 1916, 52.
- И. Елифанов. Боровичское месторождение каменного угля. СПб., 1916.
- С. В. Обручев. Поиски алюминиевых руд в Тульской и Рязанской губ. Рудный Вестник, 1917, № 1.
- В. Хименков. Троицко-Екатерининский минеральный источник. Материалы общ. и прикл. геол., изд. Геолкома, 1917, XIII.
- Б. П. Кротов. О месторождении флюорита близ дер. Лаклы. Прил. прот. Казанск. об-ва естествоиспыт., № 335, 1917.
- М. М. Пригоронский. Материалы общей и прикладной геологии, 1918, XXX. (Угли, колчеданы и глины Подмосквового края).
- А. Д. Стопневич и В. И. Искюль. Тихвинский боксит. Материалы КЕПС, 1919, № 31.
- М. М. Пригоровский. Огнеупорные глины Центральной России. Материалы КЕПС, 1921, № 35.

Область четвертая

ПЕРМСКИЕ МОРЕ И СУША¹

ГРАНИЦЫ

Г р а н и ц ы области определяются вообще довольно резко, за исключением южных, где меловые и юрские трансгрессии частью перекрыли пермские отложения и поэтому местами сильно усложнили проведение границы или сделали ее условной.

Опираясь на побережье Ледовитого океана, на востоке граница идет вдоль больших палеозойских складчатых хребтов сначала Тимана, а потом Вишерского Урала; вдоль западных склонов Урала она протягивается вплоть до Оренбурга, причем всюду за предельную границу мной взяты горизонты, отложившиеся после главнейшей фазы образования Урала, т. е. после конца артинского времени. Огибая с юго-востока Оренбург, граница идет вдоль р. Самары, охватывает с запада район Жигулей и затем идет вдоль Волги до Тетюш, севернее Симбирска, откуда ее направление можно в общих чертах наметить так: от Тетюш до устья Суры, далее на Ардатов, Муром, Ковров, Ярославль, вверх по Мологе и далее на северо-восток. При таком проведении границ в область включается вся зона юрско-меловых отложений, уже описанных в районе III.

С административной точки зрения в район входят: значительная часть Архангельской губернии, почти вся Вологодская без северо-восточных уездов, значительная часть Костромской губернии и лишь северная часть

¹ Я обязан исключительной благодарностью Б. К. Лихареву, крупнейшему специалисту русского палеозоя, за многочисленные замечания и исправления в тексте настоящей главы, часть которых ниже мной отмечена особо.

Ярославской, вся Вятская и почти вся Казанская без юго-западной части, западные уезды Пермской и Уфимской губерний, северная часть Самарской и почти вся Нижегородская без самого южного участка.

ГЕОЛОГИЯ

Геологическое строение огромной территории мало разнообразно, и если мы снимем на карте мощный покров послетретичных и ледниковых отложений, то перед нами вырисовывается однообразная окраска пермских горизонтов, в середине и на юге перекрытых пестрыми мергелями пермотриаса, и лишь в качестве отдельных, но довольно больших пятен на ней будут видны остатки юры и мела. Если к этому еще прибавить, что под поверхностью пермских известняков и мергелей кое-где, особенно на юге и на обоих окраинах, выглядывают верхние (частью и средние) каменноугольные горизонты, очевидно, подстилающие всю область на всем ее протяжении, то мы получим довольно простую картину пермского бассейна в его главнейшей части¹.

В сущности довольно проста и сама геологическая история.

Мы видим в середине каменноугольной эпохи большое восточно-русское море, далеко протягивающееся с севера на юг и уходящее на восток в Азию. Оно омывает отдельные острова, длинной цепью вулканических покровов и отдельных выходов тянущиеся на месте современного Урала. Начало отложений московского яруса знаменует собой перелом: сбросы и сдвиги протягиваются по линии уральских островов, мельчает и мелеет восточное сибирское море, постепенно превращаясь в сушу. Мощные дислокации продолжают нарушать глубины верхнекаменноугольного моря на месте современного Урала, глубокие впадины геосинклинали углубляют море в этом же районе, тогда как с запада море медленно оттесняется к востоку, а на востоке подготавливается образование большого материка.

Перед нами начало п е р м и: пермское море сменяет на востоке Европейской России верхнекаменноугольное; на западе эта смена протекает без перерыва, на востоке ее намечают прибрежные отложения артинских песчаников, тогда как в центре наступает длительный перерыв минералообразования; на границах с пустынной сушей азиатской Гондваны из глубоких синклиналей и вулканических островов вздымается складчатый Урал, образуя береговой кряж великого русского пермского моря, которое омывает склоны этого молодого хребта и одинокий остров уфимского нагорья. Смяты и сжаты в складки, прорваны изверженными породами отложения верхних каменноугольных горизонтов, еще испытывали сильные складчатые дислокации отложения пермокарбона (артинского), но все спокойнее и спокойнее лежат перед нами слои сначала кунгурских известняков, потом могучих песчанистых пород уфимского яруса. Глубокие геосинклинали вдоль вздымавшегося массива сменялись прибрежными отложениями, не надолго нашло на них кунгурское море, и лишь отдельные меридиональные сбросы нарушали картину этих отложений верхней перми, открывая доступ соляным источникам (Чернов).

Резко отличаются эти песчанистые восточные окраины от западных глубин моря, спокойно накапливавшего известняки казанского яруса, разделяясь менее глубокими зонами на три меридиональные полосы более глубоких бассейнов (Кротов).

¹ В меридиональном направлении пермский бассейн тянулся далеко на юг, вероятно, занимая место современного Каспия и Астраханской низины и отделяя от себя два залива: один к Харькову, в область Донецкого бассейна, другой в область Предкавказья и современного Крыма.

В сложной цепи явлений умирает и это море к концу пермской эпохи; разбиваясь на бухты, озера, моря, оно то мелеет, превращаясь в соляные озера, то вновь углубляется, пока в конце перми и начале триаса не сменяется сушей — необозримой спокойной равниной с озерами, низинами и мелкими, то солеными, то пресноводными бассейнами. А на юге в Астраханских степях расстилается южное море, связываясь с великим теплым триасовым океаном — Фетидой.

Наступает долгий континентальный период, смывающий и разрушающий Уральский хребет: сносятся реками на материк продукты его размыва, и лишь временно пересекает север этого материка верхнеюрское и нижнемеловое море, отлагая свои продукты небольших глубин. Широким рукавом перерезало оно к Ледовитому океану поверхность триасовой суши, то связываясь отдельными проливами с морями запада, то расстилаясь к югу. К югу от линии Вологда — Казань — Оренбург перед нами открывается серия изменчивых береговых линий верхнеюрского моря, и, таким образом, весь юго-западный край нашей области покрывается изменчивыми глинистыми осадками юры, от которых сейчас лишь остались отдельные островки. А между Вологдой и Казанью другой северный рукав простирался к ледовитым морям, омывая Тиманский остров и заходя на восточный берег разрушающегося Уральского хребта. Многие из этих осадков смыто и уничтожено, лишь отдельные островки сохранились на пестрых отложениях татарских мергелей, но огромно было геохимическое значение этой серии, сконцентрировавшей в себе новые элементы, накопленные на поверхности суши в долгие годы ее континентального режима.

Спокойно и тихо лежит перед нами пермская равнина; мягко, полого сгибались в антиклинали складки Вятских увалов, столь же мягко изогнулись их линии в разных местах Поволжья, и только на юге в верхнетретичное время картина была нарушена рядом более крупных дислокаций (Жигули на Волге, Сюкеево, р. Шешма и др.), разбивая трещинами и сбросами старые мягкие складки и устанавливая связь между горизонтами разных возрастов. Уголком покрыла более древние отложения на юге третичная (акчагыльская) трансгрессия, а двигавшийся с северо-запада ледник покрыл всю северную часть ледниковым наносом, а далее к югу — флювиогляциальными отложениями рек и озер.

С севера бореальные воды бореальной трансгрессии покрывали своими мелководными осадками части нашего района, с юга их заливали воды каспийской трансгрессии, но все эти моменты с геохимической точки зрения не имели большого значения.

Что же окружало пермское море и пермскую сушу? Что давало материал для их отложений и влияло на их геохимический характер?

Пермское море на северо-западе лишь узкой полосой каменноугольных известняков, образовывавших его берега, отделялось от Фенноскандии, вероятно, в те времена еще покрытой эпалеозойским покровом, и размыв этого гранито-гнейсового горста и покрывавших его песчаников и известняков давал обильный материал песку и гальки или растворимых солей, щелочей и щелочноземельных металлов. На юго-западе те же верхнекаменноугольные известняки образовывали берег уходявшего на восток моря, и на берегах шли процессы их химического и физического изменения морскими волнами. Открытое море тянулось далее на восток; лишь вулканические острова и на их обломках выросшие уральские складки то давали в геосинклиналях кремнеземистый материал для обильной фауны кремнистых организмов (губок, радиолярий, диатомовых и т. д.), то сносили к берегам гальку, песок и ил размываемых массивов.

Великая пермотриасовая суша рисуется нам лишь как северо-восточная

окраина азиатской Гондваны. Те же породы на западе доставляли материал кластического характера, тогда как Урал, в виде мощной горной цепи вздымаясь среди Европейской и Азиатской равнин, в процессах своей денудации давал обильный материал для континентальных и прибрежных отложений.

Такова в общих чертах картина геологии нашей области. Подведем кратко итоги сказанному:

1. Характерной чертой геологии IV области является спокойное и почти ненарушенное напластование известковых пород пермского моря, в значительной части области непосредственно продолжавшего осадки каменноугольного¹.

2. Почти вся поверхность морских осадков покрыта осадками терригенного, пресноводного или соленомелководного характера, — пестрыми мерелями пермотриаса.

3. Через северную часть с юго-запада на северо-восток и вдоль юго-западной границы протягиваются частично уцелевшие отложения юрского и мелового возраста.

4. В остальное время и в остальной части вся поверхность пермских отложений до настоящего времени оставалась сухой, будучи лишь покрыта ледниковым наносом и отчасти осадками постплиоценовых бассейнов (бореальной и арало-каспийской трансгрессий).

5. Большая часть области лишена крупных дислокаций, за исключением юга, где ряд сбросов и пологих складок нарушает равновесие слоев, давая начало ряду геологических и геохимических процессов, а также востока, где накопление в геосинклинали осадков пермокарбона сопровождалось вдоль Урала меридиональными сбросами.

6. Восточной границей района являются Тиман и Урал, главные времена складчатости которых относятся для первого к верхнему карбону, а для второго к началу перми (нижнему пермокарбону), причем эта складчатость постумно налегает на старые тектонические направления девонского и додевонского времени.

7. Ледниковый покров перекрыл больше чем половину всей области, лишь на юго-востоке оставив область Прикаспия свободной.

8. Незначительные мягкие складки или флексуры (типа Вятских увалов) геохимически не выразились в каких-либо заметных посторогенических процессах, зато молодые сбросовые линии южной части района, по Волге и у Жигулей, сделались серьезным геохимическим фактором. Равным образом и сбросы Приуралья дали новый материал для геохимических процессов, открыв доступ к поверхности соляным растворам.

9. Роль юрского и мелового покровов с их органогенными скоплениями заслуживает исключительного внимания, дав основной материал для скоплений железных руд и ряда других соединений.

10. Долгий континентальный период, частично с характером пустыни, вызвал процессы элювиального и делювиального разрушения пород и этим подготовил на осадках различных возрастов накопление глин и железных руд, главным образом, в связи с геохимическими особенностями послетретичных отложений и с субтропическим климатом некоторых периодов третичной эпохи.

ОРОГРАФИЯ И МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Слабо холмистая и увалистая равнина с необозримыми лесными пространствами и широкими долинами на севере и степями на крайнем юге —

¹ Максимальная мощность пермских известняковых отложений достигает 300 м.

такова основная картина современного ландшафта нашего района, далеко тянувшегося от берегов Ледовитого океана с тундровым покровом почти вплоть до полупустынных южных уездов Самарской губернии. Слабые увалы, как Вятские, или широкие долины мощных рек разнообразят картину рельефа, несколько осложняющуюся к востоку, где местность, сливаясь с предгорьями герцинских складок Урала, носит более холмистый, а далее и гористый характер. Усложняется рельеф и к югу, нарушенный третичными складчатыми движениями широтных направлений. В этой общей картине хорошие обнажения и доступные исследователю месторождения открываются почти исключительно по обрывистым берегам рек или выпадающих в них глубоких оврагов. По Северной Двине, Сухоне и Вычегде, по нижнему течению Оки, по Волге с ее многочисленными притоками и особенно по Каме с Вяткой и Белой в обрывистых нагорных берегах на целые версты обнажаются породы осадочной серии, доставляя местами обильный и прекрасный материал для наблюдений и сбора.

За последние два столетия к естественным выемкам присоединились и искусственные: многочисленные дудки для добычи железных руд в Нижегородской губернии (особенно в Ардатовском уезде на границе с Владимирской губернией и в Вятско-Камском водоразделе), многочисленные ломки известняка, доломита и алебастра по Оке и Волге, добыча строительных известняков по Волге у Казани или у Жигулей, разработки асфальта (Жигули) или битуминозного сланца и нефти (Сюкеево Тетюшского уезда Казанской губернии). Наконец, в приуральской полосе — многочисленные рудники, некогда добывавшие медь из песчаников, но ныне совершенно заброшенные, а в Соликамском районе — многочисленные буровые скважины для добычи рассолов.

Нельзя не упомянуть и о железных дорогах, давших на юго-востоке ряд новых выемок, а в Предуралье осветивших своими разрезами целый ряд геохимических вопросов.

Однако, как бы многочисленны ни были обрывы речных долин или копи и копушки человека, все же часть поверхности, известной нам в нашей области с минералогической и геохимической точек зрения, совершенно ничтожна, и, если мы обратим внимание на то, что наш район превышает по площади более чем в полтора раза Францию или Германию, то мы убедимся, насколько схематичны и отрывочны наши сведения об этой большой области.

МИНЕРАЛЫ ¹

Минералы района не очень разнообразны, но зато весьма характерны и частью совершенно самобытны, характеризую ряд геохимических особенностей района.

С а м о р о д н ы е соединения представлены весьма слабо: медь не часто попадает в рудниках приуральских песчаников, более обычна и даже практически интересна с е р а, тесно связанная по своему происхождению с различными геохимическими процессами, но почти всегда в начальных стадиях процесса приуроченная к гипсам. Образование кристал-

¹ Говорить специально о горных породах области не приходится: коренных изверженных пород мы в районе не знаем. Обильные валуны ледникового покрова по преимуществу принесены с Кольского полуострова для большей части области и из восточных уездов Олонецкой губ. и Карелии -- для западных, в меньшей степени с Тимана и Северного Урала. Из осадочных пород мы встречаемся с исключительно пестрой картиной известняков, доломитов, ангидрита, гипса, конгломератов, песчаников, песков, песчанико-доломитовых пород, мергелей, рухляков, глинистых пород, частью углисто-глинистых сланцев. Петрографически и генетически изучены только породы Жигулей в прекрасной работе М. Э. Ноинского (1913).

лов серы в районе обусловлено двумя главнейшими процессами — восстановлением гипса углеводородами и окислением сероводорода в источниках в зимнее время.

Из сернистых соединений широкое распространение имеет только пирит (частично и марказит?) и особенно сероводород. Очень плохо изучены и химически неясны сернистые руды пермских медных песчаников, среди которых отмечается медный блеск, халькопирит и блеклая руда, но никаких химических доказательств этих определений не приводится, хотя В. И. Вернадский считает основной рудой халькозин и ставит тетраэдрит под вопросом. Остается недоказанным, хотя и возможным, нахождение никелистых колчеданов на берегах Волги (см. стр. 165).

Более богаты окислы: куприт (кирпичная медная руда)¹, кварц, халцедон, агат, опал, кремнь, лимониты разных типов, вода, лед (пещерный). Огромного внимания заслуживают галлоидные соединения: галит, вероятно сильвин или их срастание в виде сильвинита.

Совершенно необычным минералом является фольбортит (открытый в 1839 г.), тогда как из фосфатов мы знаем фосфориты и вивианит и обильные скопления фосфатов в костях ящеров.

Углекислые соединения представлены минералами: кальцит в нескольких разновидностях, арагонит, сидерит, сферосидерит, доломит, стронцианит (Казань), малахит, азурит. Среди них особый интерес представляет описанный Н. Н. Соболевым холмогорит, основной доломит с избытком магнезии, по сравнению с углекислотой. Очень богаты и заслуживают особого внимания сульфаты: гипс ангидрит, барит, целестин, мелантерит, фельсобаниит (Самарская Лука), эпсомит, ближе не определенные сульфаты типа квасцов и не вполне доказанная глауберова соль.

Среди силикатов мы встречаем, помимо ничтожных составных частей глин и песков (слюды, глауконит), интересные минералы, месторождения которых имеют мировое значение — палыгорскит, волконскоит, а также огнеупорные глины (частью типа каолина).

Наконец, весьма любопытен ряд соединений углерода: нефть, асфальт, битуминозные сланцы, углистые сланцы, бурый и каменный уголь, торф.

Таков очень небольшой список минералов этого района, минералогически очень плохо изученного и поэтому не дающего достаточного материала для минералогической характеристики.

ЭЛЕМЕНТЫ

В приводимой ниже таблице помещены все химические элементы, до сих пор наблюдавшиеся в области пермских отложений района. Поставлены в скобки элементы юрских горизонтов, так Р, F, как и некоторые другие, не вполне доказанные или случайные. К этой же группе недоказанных, но вероятных, В. И. Вернадский для этого района относит Sb, Ag, Pb и отчасти Со в медной черни. К сожалению, отсутствие точных анализов не позволяет совершенно точно фиксировать эти данные.

В таблицу вошло всего 27 элементов, среди которых условно (в скобках) помещено четыре элемента преимущественно мезозоя.

Геохимическая ассоциация весьма своеобразна. С одной стороны, она состоит почти исключительно из элементов обычного поля, в котором, однако, появляется вся группа основных элементов Ti, V, Cr, Mn, Ni, Fe и далее следующий по менделеевской таблице Cu. Таким образом, все элементы ультраосновных магм, занимающие в менделеевской таблице строго

¹ Если только такое определение правильно.

Геохимическая диаграмма пермского моря и суши

Ряды	I	II	III	IV	V	VI	VII	0	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	Ряды
1		—	—	—	—	—	—	.	.	.	.	C	N	O	(F)	.	2
3	Na	Mg	Al	Si	(P)	S	Cl	.	K	Ca	.	Ti	V*	Cr*	Mn	Fe Ni	4
5	Cu*	.	.	.	(As)	Se	(Br)	.	.	Sr	.	.	.	.	?	.	6
7	.	.	.	Sn	.	.	.	.	.	Ba	.	.	.	.	?	.	8
9	.	.	.	.	.	.	?	.	?	.	.	.	.	.	—	—	10

Примечание. Тире обозначает свободное место в таблице Менделеева; точка — отсутствие данного элемента в исследуемой области; знак вопроса — не открытый еще элемент. В скобках даны элементы, по преимуществу связанные с отложениями юры и мела; со звездочкой — встречающиеся лишь в восточной части области. Ср. с таблицей Менделеева (рис. 7).

определенное место, обнаруживаются в описываемом районе, но притом почти исключительно приурочены к восточным его частям. В этом нетрудно видеть влияние Урала и основных выделений его магм. Из необычных полей, кроме меди, о которой уже упомянуто, определенно отмечаются только барий и стронций. Первый, как и тяжелые металлы обычного поля, приурочен к восточным частям, второй широко связан с известковой свитой осадков сернокислого и углекислого типа, т. е. его скопления оказываются приуроченными к определенным биохимическим условиям, которые широко повторяются как в России, так и вне ее, всегда обуславливая связь стронциевых соединений с регрессирующими морскими бассейнами (Сицилия, Предкавказье, Закаспийский край, Западная Двина и др.).

В о д о р о д входит с состав воды (льда), сероводорода и различных углеводородов, которыми столь богат этот район. О последних см. ниже при углеводе.

У г л е р о д. Соединения углерода представляют во всем районе совершенно исключительный интерес и поэтому на их характеристике мы должны несколько остановиться.

Первый тип — соединения к а р б о н а т о в — играет огромную роль во всех отложениях области, причем размыв западных берегов пермского моря, состоявших из каменноугольных известняков, доставлял обильный материал углекислого кальция и отчасти магния и этим облегчал, особенно в западной половине бассейна, накопление путем биохимических и физико-химических реакций карбонатов щелочноземельных металлов.

Гораздо сложнее, но и интереснее вторая группа соединений углерода в виде б и т у м о в, н е ф т и, асфальта, углистых прослоек, битуминозных сланцев. Для их с о в р е м е н н о г о распространения мы можем нарисовать следующую схему¹:

¹ Звездочки обозначают вероятную синхроничность с вмещающим осадком.

Современные и послетретичные отложения	Сапропели ¹ , торфяники * в различных районах: аллювий, пропитанный вытекшим гудроном (по р. Шешме); остатки древесины * в постплиоценовых и палеогеновых песках и глинах (см. ниже).
Третичные (акчагыл)	Измененный торф, превращенный в углистый сланец.
Юрские	1) Горючие сланцы * в портландских (нижневолжских) отложениях; 2) битуминозные и углистые сланцы * оксфорд-келловейские (Вятская губ.); 3) асфальт Жигулей.
Татарский ярус	Обугленные деревья *, прослойки угля — гагата, редко песчаники, окрашенные асфальтом — киром (Козьмодемьянский уезд, отчасти Чистопольский уезд).
Казанский ярус (верхи) (преимущественно известковая фауна)	1) В основании кониферового горизонта — гудронный песчаник Шешмы *; 2) нефть и битумы в доломитах Сюкеева (шесть горизонтов с увеличением кверху насыщенности и с переходом в более легкие фракции); 3) асфальт Жигулей.
Казанский ярус (низы)	1) В медистых песчаниках обугленные стволы (гагата) *; 2) по р. Шешме два горизонта (главных) гудронного песчаника *;
Уфимский ярус (?)	3) нефть из глинистых горизонтов по р. Соку *; 4) нефть * Стерлитамака и по р. Белой.
Пермокарбон	1) Асфальт Жигулей; 2) остатки стволов деревьев * в артинских песчаниках.
Карбон C ₃	1) Асфальт Жигулей; 2) углистые сланцы * Уфимского плато; 3) асфальт по р. Белой.
C ₂	
C ₁	Каменные угли * Приуралья ² .

В приведенной таблице можно подразделить все скопления соединений углерода на несколько групп: одни из них носят заведомо синхроничный характер с вмещающим его осадком и поэтому могут быть отмечены как образования, несомненно связанные с биохимическими реакциями на дне мелководных морских или пресноводных бассейнов. В этих случаях мы имеем дело с осадками глинистого характера и часть скоплений носит чисто растительный характер углей, углистых сланцев без большого количества летучих соединений (образования *терригенные* или *паралические*). Другая часть в этой синхроничной группе характеризуется образованием битуминозных сланцев, тоже глинистого характера, но в накоплении которых, несомненно, принимали участие и планктонные животные. Это образования *мелких частей морских бассейнов*, богатые серой и железом, связанные, таким образом, с солеными бассейнами, — например, юрские, верхневолжские, битуминозные сланцы. Наконец, третья группа скоплений связана с песчаниками или известняками, с гипсами самых разнообразных возрастов: они носят характер нефти или гудрона, очень богаты серой, иногда хлором; это гудронные песчаники уфимских отложений и асфальты Жигулей, одинаково распространенные как в юрских, так и в пермских, пермокарбонных и верхнекаменноугольных отложениях. Синхроничность большинства из

¹ Пропуск, отмеченный Б. К. Лихаревым.

² Горизонты C₁ с углем нам известны лишь в Приуралье; их геохимический характер далее к западу нам совершенно неизвестен, хотя не исключена возможность продолжения угольных слоев и под артинские песчаники.

них находится под вопросом, а в некоторых случаях даже опровергается рядом фактов. М. Э. Ноинский по отношению к Жигулям совершенно определенно высказывается против синхроничности с каким-либо одним из перечисленных отложений и склонен связывать накопление асфальта с проникновением нефти из глубины, в чем он совершенно сходится с предположениями де Лоне. Эта же синхроничность обычно отрицается и для сюкеевских доломитизированных известняков, но определенно признается А. В. Нечаевым и А. Н. Замятиным для песчаников нижнеказанского возраста в районе Шепмы. Де Лоне делает довольно смелое предположение о связи с девоном, который должен подстилать каменноугольные известняки; для близкого (но далеко не сходного) Уральского района Замятин определенно высказывается за связь нефти с мезозойскими и, в частности, юрскими отложениями.

Я затрудняюсь дать правильное объяснение происхождения нефти, асфальта и гудронов, но, согласно М. Э. Ноинскому и Френцелю и отчасти мнению А. Н. Замятина и Н. Н. Тихоновича, считаю их посторогеническими минералами, связывая их распределение по различным горизонтам с третичными (альпийскими) дислокациями и облегчением проникновения растворов и обменных реакций. Лично я, на основании общей теории происхождения нефти, связываю их с моментом перерыва или мелководных отложений между пермокарбоном и серединой казанского яруса и думаю, что именно период уфимских песчаных отложений или озерных гипсов является первоисточником этих скоплений (см. табл. VI и VII). С этой точки зрения я и толкую схему на стр. 159, причем, согласно с мнением А. Н. Замятина, допускаю некоторую миграцию этих образований как вверх, так и вниз в связи с процессами катагенетического и посторогенического характера.

А з о т входит в разных количествах в состав битумов области; в некоторых из них его процент высок, что, наравне с высоким процентом серы, заставляет связывать их генетически и с животными остатками.

К и с л о р о д никаких особенностей не обнаруживает. Окисление нефти и превращение ее в асфальт или вязкие битумы является, повидимому, весьма характерным процессом при ее миграции. Не менее любопытны процессы окисления железа и серы.

Ф т о р нам неизвестен в галоидных соединениях, а встречается как нормальная составная часть фосфоритов юрско-мелового возраста. Вместе с той же фосфорной кислотой он фиксирован в костях ящеров, образующих в пестрых мергелях иногда целые прослойки.

Н а т р и й играет роль лишь в галоидных соединениях каменной соли (см. хлор).

М а г н и й принадлежит к важнейшим химическим элементам всего района, накапливаясь в некоторых горизонтах в огромных количествах. Вместе с тем особый интерес связан с ним благодаря той миграции, которая в общем не обычна для этого элемента, но в данном случае весьма характерна.

Соединения магния частично принадлежат к первичным осадкам регрессирующего замкнутого бассейна, где образование доломита шло непосредственно на дне, обычно илистом и несколько глинистом.

Вторичное накопление того же доломита связывается с процессами поверхностного выветривания (гипергенеза) и катагенеза, при которых поверхностные воды выносят большое количество двууглекислых солей кальция, обогащая целые горизонты соединениями магния. В этом случае магний играет пассивную роль, мигрируя гораздо труднее, чем кальций, что мы наглядно видим по составу современных источников, вытекающих как из татарской толщи, так и из казанских или уфимских горизонтов: все

они содержат огромный процент CaCO_3 при почти полном отсутствии углекислого магния, что очень наглядно сказывается на составе пресноводных туфов известняков, почти совершенно лишенных MgO и поэтому весьма ценных для обжига.

Тем не менее мы знаем в целом ряде горизонтов пермских пород и активную роль магния, раскрытую для средней части района моими исследованиями, а для южной — работами М. Э. Нойнского. В первом случае магний фиксируется в виде водного алюмосиликата и накапливается в результате сложных обменных реакций в форме палыгорскита (см. далее стр. 176), во втором случае, наоборот, наблюдается переход магния в подвижное состояние путем вытеснения гипсом угольной кислоты из карбоната магния и образования легкорастворимого эпсомита. Дальнейшая миграция этого элемента в данном случае мне неизвестна; несомненно, однако, что MgSO_4 растворяется текучими водами и с ними, очевидно, направляется в большие водные бассейны.

Одна поразительная реакция бросается нам в глаза в этой области. Н. Н. Соболев описал на огромном протяжении водораздела Онеги и Северной Двины образование особых пород, названных им холмогоритами и отличающихся присутствием основной соли карбоната магния и кальция. Постоянный недостаток в анализах угольной кислоты для покрытия всего количества CaO и MgO заставляет предполагать наличие каких-то нам неизвестных химических реакций, под влиянием которых частицы карбоната магния переходят в основную соль. В связи с этим процессом идет мощное выщелачивание известняков, частично обогащенных гипсом.

Характер этой реакции нам совершенно не ясен.

А л ю м и н и й принадлежит к элементам мало подвижным в условиях нормальной серии осадочных пород, и его миграция является возможной лишь при сочетании особых физико-географических и геохимических условий. Глинистые и мергелистые образования являются единственными известными для нас первичными минералами сингенеза. Отсутствие их геохимического обследования не позволяет нам говорить об условиях их образования, но во всяком случае прочная связь в них глинозема с кремнеземом и сравнительно слабая миграция этих двух элементов говорят о каолиновом строении главных минералов.

Лишь частично глинозем и кремнезем входят в обменные реакции с магнезиальными соединениями при образовании палыгорскита.

Тем не менее для глинозема во всех районах мы сталкиваемся с весьма важной реакцией, которая проходит красной нитью через всю таблицу генетических циклов и определяет накопление высокопроцентных чистых глин в разнообразных стратиграфических горизонтах, но при условии, что последние испытали материковое выветривание (гипергенез) или подверглись катагенетическому воздействию юрских пород. При этих процессах, ниже описываемых с большей подробностью, частью возникли рудные образования, частью же получились высокосортные остаточные глины, благодаря химическому выщелачиванию большей части карбоната кальция.

На стр. 162 привожу систематику глинистых продуктов в осадочных отложениях района.

Выяснение времени образования скоплений глин весьма трудно, тем более что оно захватывает огромный промежуток времени континентального и элювиального разрушения земной поверхности, во время которого продукты гипергенеза много раз перемещались и химически перегруппировывались, так что третичные или постплиоценовые осадки в своей основе базируются на уже подготовленных и, может быть, перемытых глинах

Возраст слоев, кои перекрываются глинами	Вероятное время накопления глин	Сопровождающие образования	Местонахождение
Пестрые мергели (Р ₃)	Постплиоценовое или современное	Сферосидериты, угли, пески	Камско-Вятский водораздел
Казанские известняки (Р ₃)	Третичное или постплиоценовое	Железные руды	Окско-Клязьминский район
Пермские известняки и доломиты разных гор зонтов (Р ₃)	Юрское (бат) (самые нижние горизонты юры)	Бурый железняк под меловыми кварцевыми песками	Самарская Лука ¹
Кунгурские известняки (Р ₃)	Третичное? (по В. А. Варсановфевой)	Железные руды (иногда)	Уфимское плоскогорье
Артинские песчаники (Р ₃)	Третичное? ² (по В. А. Варсановфевой)	Пески, обугленная древесина	Уфимское плоскогорье
Гжельские известняки и доломиты (С ₃)	Постпалеозойское (третичное?)	Железные руды	Склон Урала

¹ Частью и над доломитами верхнего карбона.

² Если относить элювиальное образование к третичному периоду (миоцену?), то накопление мелкослойных глин и песков в районе артинских песчаников можно было бы приурочить к постплиоцену.

предыдущих периодов. Исключение составляют лишь юрские огнеупорные глины, представляющие несомненные продукты гипергенеза периода от карбона до бата и перекрытые юрской трансгрессией.

К р е м н и й играет огромную роль в образованиях района, частью (на востоке) в качестве кластического материала (песков, песчаников, конгломератов), частью же в форме биохимического осадка, связанного в известняках с органическими остатками (радиоляриями, фораминиферами, спикулями губок и т. д.).

Часть кремневых скоплений мы связываем с диагенетическими процессами: таковы кремни дымчато-темного цвета, которые образуют огромные караваны с грубо слоистой или грубо агатовой структурой в казанских известняках Поволжья. Совершенно иной характер имеют в тех же районах халцедоновые натёки и кремнистые образования вокруг конкреций гипса или целестина, образующие местами очень красивые скопления и связанные с позднейшими процессами миграции этого элемента.

Ф о с ф о р. Обогащение фосфорной кислотой (до 1 %) замечается в песчаниках, обволакивающих кости ящеров в татарских песчаниках (по Сев. Двине, Сухоне и др.), а также в современных болотных рудах (в Нижегородской губ. — до 3,5 %, в Костромской губ. — до 5,1 %). Любопытно обогащение фосфором и некоторых горизонтов казанских известняков, заключающих в себе вместе с тем обильные остатки рыб (особенно так называемый мыльник против Казани).

С е р а. Этот элемент играет очень большую роль в геологических процессах области, путем сложных биохимических реакций накапливаясь в ангидритах или гипсах пермокарбона и перми (редко карбона), или в виде колчедана — в темных юрских глинах. Первый частично обменивается с доломитами и в виде выплетов $MgSO_4$ выносятся водами, второй

разрушается по обычной схеме, превращаясь в мелантерит или вторичный гипс, тоже действующий на карбонаты магния.

Мало изученные, частью фреатические, частью биохимические восстановительные процессы в гипсах приводят к накоплению сероводорода, а затем и кристаллической серы, а с другой стороны, и сами восстановители в условиях более глубоких горизонтов — нефть, асфальт и гудроны — являются носителями этого элемента, содержа его иногда до 3,7% (например, в гудроне Сюкеева).

Х л о р. Единственным известным нам в области соединением хлора является хлористый натрий, которому, повидимому, в скромных размерах сопутствует хлористый калий. Галит является весьма распространенным соединением, будучи приурочен к разнообразным по возрасту горизонтам осадочной свиты:

Татарский ярус	Илецкая Защита (по Д. В. Соколову — ? А. Ф.), Балахна Костромской губ. (А. В. Нечаев — ? А. Ф.).
Казанский ярус (нижние горизонты)	Соляные источники Среднего Поволжья.
Уфимский ярус	Илецкая Защита (А. Н. Замятин, М. Э. Нопский), Соликамские слои (А. В. Нечаев). (Вероятно, этого возраста донецкая соль).
Кунгурский	Соликамские слои (А. А. Чернов) — мощностью до 120—130 саж.
Пермокарбон	Усолье (Жигули, по М. Э. Нопскому).
Артинский	Соликамские слои — П. И. Кротов ¹ , слабые соляные источники Приуралья (А. В. Нечаев).
Девон (средний и верхний)	Соляные источники в Южном Приуралье (А. В. Нечаев).

Из этой схемы мы видим полное отсутствие определенных данных о возрасте главных соленосных толщ или пластов, обуславливающих минерализацию соляных источников, с другой стороны, повторное осаждение гипсоносных и соленосных толщ, начиная с пермокарбона и кончая низами татарского яруса².

Для вопросов геохимии это отсутствие точной хронологии не играет большой роли, так как несомненно, что в течение длительного времени на территории восточной России господствовали такие климатические и геохимические условия благодаря которым в разные моменты в разных местах происходило высыхание или обмеление замкнутых бессточных бассейнов, окаймленных песками в обстановке пустынного ландшафта. Эти скопления (частично сжатые в штоки позднейшими тектоническими процессами) могут достигать колоссальной мощности; так, например, в Илецкой защите бурение в 68 саж. [145 м] с лишним не дошло до подстилающих пород. Особенно типичным является приурочивание таких соляных озер как к восточной, так и к западной окраинам большого пермского моря; к первым мы относим полосу приуральских соленых варниц, ко вторым — многочисленные соляные источники Вологодской и даже Олонецкой губ. Впрочем, для части последних несомненна связь с соленосными породами девонского возраста, что частично указывается и для Южного Приуралья.

К а л и й. Вопрос о нахождении калиевых солей на востоке России, в связи с соликамской или илецкой соляной толщей, представляет огромный научный и практический интерес. До настоящего времени, однако, все сведения случайны, неполны и требуют подтверждения.

¹ Б. К. Лихарев мне указал, что это мнение сейчас имеет лишь историческое значение.

² Может быть, и в верхах татарского яруса, но из них соль могла быть выщелочена длительными процессами гипергенеза.

Больше всего указаний имеется на Соликамский район, где в коллекциях минералов скважины был найден образец сильвинита; к сожалению, это открытие не было подтверждено *in situ*, и действительное происхождение образца из скважины остается под сомнением. Не вполне точными оказались указания на содержание калия и в других образцах Троицкого завода, где было сначала найдено довольно высокое содержание калия. Такие же повышенные проценты калия были сначала обнаружены и в рассолах, однако, по подсчетам Н. С. Курнакова, количество KCl в рассолах не превышало 0,1—0,5 %, оставаясь вообще близким к отношениям между NaCl и KCl в морской воде. Любопытна, но еще не проверена находка Петунникова в буровой скважине Иваново-Вознесенска на глубине 328 саж. [699 м] водоносного горизонта с 5 % NaCl и 5 % KCl. Автор связывал эти соли с выщелачиванием пермских отложений (нет ли ошибки в анализах?), однако, может быть, было бы правильнее при этих глубинах говорить о девоне.

Целый ряд указаний связывался и с Илецкой Защитой, где по анализам было найдено в воде одного родника 1,26 % KCl. Повидимому, цифры для этого района более правильны, хотя тоже нуждаются в проверке.

Во всяком случае, если мы до сих пор еще и не обнаружили действительных скоплений калиевых соединений в приуральской полосе, то все же вся генетическая картина скорее говорит за возможность их нахождения где-либо в верхних частях соленосных толщ, что может быть доказано лишь систематическим бурением в разных частях Приуралья.

Вне растворимых солей калий нам известен лишь в очень редких глауконитовых зернах преимущественно артинских песчаников.

Кальций вместе с магнием играет огромную роль, особенно в западных частях области, где процессы его миграции заключаются, главным образом, в выносе известковых вод с образованием пресноводных известняков. Огромный вынос солей кальция, частью с восстановлением кислородных соединений, идет в гипсоносных слоях, вызывая образование целых карстовых районов и своеобразных гипсовых пещер¹.

Титан определен только в огнеупорных глинах Вятско-Камского водораздела и Уфимского плато, где его содержание доходит до очень высокого процента (4,1 %) ²; для других районов отсутствуют аналитические данные, хотя и нет никаких оснований где-либо ожидать особых накоплений этого элемента.

Ванадий. Нахождение ванадиевых соединений в пермских песчаниках тех горизонтов, которые обогащены и медными соединениями, составляет одну из любопытнейших задач геохимии района.

Минерал фольбортит является позднейшим продуктом фиксации ванадиевой кислотой меди, кальция и бария.

Хром. До сих пор остаются для нас загадочными находки волконскоита, минерала с 18—34 % Cr₂O₃, образующего неправильные гнезда или прослойки в медистых песчаниках, выше главного горизонта медных руд. До сих пор этот любопытный минерал из группы хромовых глин известен

¹ При изучении процессов растворения гипса геологи нередко упускают из вида максимальную растворимость его при 36° С и ее уменьшение при изменении температуры в ту или иную сторону, что имеет при процессах пустынного климата огромное значение.

² Повышенный процент титана весьма характерен как для глин Уфимского плато, так и для глинистых образований Камско-Вятского водораздела. В Иргинском районе процент окиси титана в белых глинах доходит до 3,5, а в Кунгурском — даже до 4,1.

только из двух мест: с. Ефимятского Пермской губ. Оханского уезда (открыт в 1830 г.) и Ухтыма Вятской губ. К этим месторождениям надо прибавить старое указание Георги на шахты Аннинского завода, согласно толкованию его описания Штукенбергом. Так как, по мнению В. И. Крыжановского, этот минерал образует довольно постоянный горизонт, то весьма вероятно, что он будет открыт еще в ряде других пунктов и в своем распространении захватит целую область.

И генетически, и геохимически образование этого минерала нам кажется загадочным, и приводимое в литературе объяснение, связывающее его, согласно мнению Я. В. Самойлова, с биохимическими реакциями, остается лишь красивым, но не обоснованным предположением. Любопытно отметить, что согласно старым анализам Керстена и Илимova в волконскоите содержится около 0,2—1,0 % PbO ? Ангель связывает его происхождение с разрушением хромовых силикатов типа уваровита, забывая, что до ближайших хромовых месторождений по прямой линии около 200 верст. Не исключено скорее накопление среди песков и песчаников шпихов магнетита и хромистого железняка.

Марганец нам совершенно не известен в сколько-нибудь значительных количествах; только в железных рудах Выксунского района его количество колеблется около 2—3 %. Иногда в известняках наблюдаются дендриты железо марганцевых окислов. В современных болотных рудах наблюдается повышенный процент марганца (в Нижегородской и Костромской губ. — до 4 %).

Железо. Проблема миграции и накопления железа весьма любопытна, но не может быть пока выяснена с достаточной детальностью: этот элемент накапливается, во-первых, в виде болотных руд, богатых фосфором и с заметным содержанием калия, во вторых, в виде колчедана, сферосидерита и бобовых руд в юрских отложениях, в-третьих, в многочисленных, весьма своеобразных скоплениях железных руд, приуроченных к разнообразным горизонтам — верхам карбона, пермокарбону (особенно кунгурскому ярусу на Урале), конхиферовому горизонту казанского яруса, пестромергельной свите. Иначе говоря, обогащение железом может наблюдаться в самых разнообразных стратиграфических горизонтах, будучи, таким образом, связано с позднейшими процессами в меньшей степени катагенеза, в большей — гипергенеза. Повидимому, в этих процессах поверхностного накопления железных руд огромную роль играл разлив юрских отложений, весьма богатых соединениями железа; инфильтрация железистых растворов из этих слоев и могла обуславливать образование материковых или пресноводных скоплений железных руд.

Несколько иначе протекал процесс обогащения железом известняков в Приуралье, где мы имеем очень характерную лимонитизацию карбонатных пород по трещинам или карманам неправильной формы.

Привожу ниже схему железорудных месторождений нашего района (см. таблицу на стр. 166).

Приведенная таблица обнаруживает два типа железных скопления: одни сингенетичны с породой (а именно 1, 2; может быть — 7), другие, наоборот, связаны с процессами скорее метасоматического характера, с замещением железистыми растворами карбонатных пород самых разнообразных возрастов.

Никель. Совершенно исключительным по интересу является нахождение никеля в колчеданах неизвестного ближе горизонта района Богородского — Тетюши на Волге. Первое указание Вилениуса (1885 г.) было сначала опровергнуто, и его цифры (содержание NiO до 15 %) подвергнуты сомнению. Между тем новые исследования П. Л. Драверта обнаружили в

доломитовом известняке близлежащего Сюкеева мелкие вкрапления никельсодержащего пирита. В этом же районе П. Л. Драверт встретил в трещине известняка лучистые звездочки никелевого карбоната (заратита). Личный осмотр материала Драверта не позволяет сомневаться в правильности этого определения.

Распространение соединений железа

Возраст подстилающих горизонтов	Сопутствующие минералы	Главные месторождения	Время образования рудных скоплений
1. Послетретичные осадки	Вивианит, торф, болотная руда	В разных районах	Современное или последниковоe
2. Юра (нижнекелловейские)	Сидерит, лимонит, фосфорит	По реке Сыsole	Одновременные
3. Пестрые мергели татарского яруса ¹	Сферосидерит, лимонит, углистые остатки, пески, огнеупорные глины	Камско-Вятский водораздел в районе Сысолы	Постплиоценовые
4. Пестрые мергели татарского яруса (под юрскими глинами, превращенными в глину — «талоконку»)	Сферосидерит, пески, кремни, лимонит, палыгорскит	Окско-Муромский район	Послеюрский, может быть постплиоценовый
5. Казанский ярус (конхиформный горизонт чаще, реже брахиоподовый)	Глины, кремня, палыгорскит, обломки известняка, сферосидерит	Ардамовско-Муромский район	Послеюрский
6. Кувгурский ярус (РС)	Лимонит, огнеупорные глины	Приуралье, Уфимское плоскогорье	Третичный
7. Артинский ярус (РС)	Железистые конгломераты в основании	Приуралье	?
8. Карбон C ₃	Огнеупорные глины, углистые частицы	Окско-Клязьминский район	Постплиоценовый
9. Карбон C ₃ +C ₂	Лимониты в известняке	Приуралье	Послепермский

М е д ь. Этот металл играет огромную роль в песчаниках приуральской толщи, причем главное его распространение должно быть отнесено к верхам Уфимского яруса. Повидимому, было бы неправильно приурочивать скопления медных соединений к одному строго определенному горизонту, так как, очевидно, накопление меди связано с довольно длительной фазой геохимического процесса, в разных местах в разное время осаждавшего сингенетически медь в мелководных высохавших соляных бассейнах. Хотя подавляющее число наблюдений говорит за связь медных руд с уфимским ярусом, тем не менее ряд вполне вероятных отдельных наблюдений

¹ К. И. Богданович считает, что железные руды этого района лежат не на замещенном татарском ярусе, а на пестроцветной толще уфимского, петрографически почти не отличимой от пород первого.

заставляет связывать их в некоторых случаях с казанским или даже низами татарского, так что в некоторых районах возможно нахождение нескольких медных горизонтов, отстоящих на десятки метров. Точное определение возраста этих горизонтов далеко не всегда возможно благодаря их литологической близости, но вероятно, что такие указания на медные соединения, какие сделаны для Уржумского и Котельничского районов Кротовым (связь с татарским ярусом), основываются на недоразумении¹.

До сих пор основными медьсодержащими минералами этого района считались: пирит с содержанием меди, халькозин, халькопирит и вторичные продукты их катагенеза и гипергенеза — малахит, азурит и фоллбортит (в последнем 34—38 % CuO); никаких других тяжелых металлов в них до сих пор не обнаружено, что, может быть, просто объясняется отсутствием детальных химических анализов. Очень типична и постоянна связь песчаных горизонтов со скоплениями остатков древесины, которые несомненно сыграли роль восстановителя при осаждении медных растворов из неглубоких бассейнов и озер пермского моря. Всюду медистые песчаники подстилаются красными глинами, называемыми на местах вапом, ниже которого обычно поиски медных руд прекращаются.

Генетически мы не имеем никаких оснований не считать эти образования сингенетическими осадками и не ставить их в связь с мощным разрушением Уральской цепи с ее богатыми меторождениями медных руд. Сами детали фиксации медных соединений от нас сейчас ускользают, но наиболее приемлемой является гипотеза Я. В. Самойлова, связывающего медные соединения с физиологическими особенностями морских организмов пермского моря, замещавших в своей крови железо другим, близким по атомному весу металлом — медью.

Не менее интересно с геохимической точки зрения нахождение меди в пиритах доломитово-известковых слоев казанского яруса Поволжья, где (Сюкеево-Богородское) Вилениус якобы обнаружил мышьяк и медь до 5—8 % и где вместе с медью обнаруживается и никель (верно ли?). Небольшое (в сотых долях процента) содержание меди обнаруживается в юрских колчеданах Поволжья, причем, повидимому, это содержание является весьма обычным и повторяется в целом ряде сколько-нибудь точных химических анализов.

Никаких других данных о распространении меди в нашей области не имеется.

Мышьяк отмечается в ничтожных следах и не вполне достоверен: так, химически не доказаны находки П. Л. Дравертом арсениопирита в пермских медистых песчаниках на кусках древесины. Не более достоверно указание Вилениуса на большое содержание мышьяка в колчеданах по берегу Волги ниже с. Богородского. Вероятно совершенно произвольно отмечаемое в медистых песчаниках нахождение блеклой руды. В юрских колчеданах отмечается весьма часто, но обычно лишь в сотых долях процента (например, Урмаево, на границе Казанской и Симбирской губ., в келловее).

Селен отмечается в ничтожных количествах в юрских колчеданах (в келловее на границе Казанской и Симбирской губ.).

Бром обнаружен в маточных рассолах Соликамских варниц в ничтожных количествах.

¹ Отметим для сравнения, что очень сходные медистые песчаники Донецкого бассейна относятся Н. Н. Яковлевым к верхней части карбона или пермокарбона и перекрываются соленосной толщей (аналогичной уфимскому ярусу).

Стронций является очень типичным и довольно распространенным элементом известково-гипсовой фации пермских отложений, в иных случаях генетически отвечая знаменитому месторождению сульфата стронция в Джирдженти (Сицилия). В противоположность бария, стронций связан с более глубоководными осадками карбонатного типа или с гипсами.

Нам известно нахождение целестина в нижеследующих восьми пунктах:

В брахиоподовом горизонте казанского яруса ¹	1) В раковинах на берегу р. Витки и в Яранском уезде; 2) против Казани на берегу р. Волги в Свияжском уезде (Моркваши, Печищи, Верхний Услов и т. д.); 3) у Красновидова в раковинах оолитов.
В пермокарбоне	4) Серная гора Жигулей (среди гипса).
В артинских мергелях	5) По р. Чусовой вместе с антраконитом (в литературе ошибочно описан, как ангидрит).
В каменноугольном известняке S_a	6) На берегу р. Уфы в Уфимской губ.
Неизвестного возраста (пермокарбон?).	7) В гипсе у ст. Томилово около Самары.

Наконец, восьмое месторождение открыто Б. Едемским в 1922 г. в известняках, повидимому, наиболее верхних горизонтов пермских отложений по р. Пинеге.

Из всех перечисленных месторождений единственно богатым является месторождение на берегу Волги против Казани, где запасы настолько значительны, что могли бы играть некоторую, хотя и скромную, практическую роль.

Стронций, повидимому, находится в первичном своем залегании, т. е., вероятно, сконцентрировался из рассеянного состояния в органических остатках и путем позднейшего метаморфизма в период катагенеза положил начало целестиновым желвакам. Часть целестина в процессах того же катагенеза переходит в стронцианит под влиянием углекислых растворов поверхности (гипергенез).

Б а р и й. В пермских отложениях барий очень редок и далеко уступает по своей распространенности стронцию, будучи вообще связан по преимуществу с прибрежными или пресноводными образованиями. До сих пор в виде барита он нам известен лишь в двух местах: в прибрежных осадках приуральских толщ артинского яруса, где мы его знаем в форме прожилок в септариях с аммонитами; второе месторождение, количественно совершенно ничтожное, мной было отмечено на сферосидеритовых стяжениях среди измененных пермских глин, повидимому, конхиферового горизонта в железорудном районе Выксы. Однако и здесь он образовался позднее и мог быть связан с теми юрскими растворами, кои вызвали оруденение известковых горизонтов, и остатки которых еще покрывают рудные слои.

Тем более поразительным является содержание бария в целестинах Поволжья, где количество $BaSO_4$ колеблется, по данным П. Л. Драверта, от 1,4 до 4,09%. Мне кажется, что позволительно сомневаться в правильности этих указаний, так как точный анализ, произведенный позднее, обнаружил в морквашском целестине всего 0,9—0,15% BaO . Совершенно исключительный интерес представляет содержание бария в фольбортите

¹ Или в низах конхиферового горизонта

(до 4,3% — произведенный Гентом анализ минерала из Воскресенского рудника Пермской губ.). Происхождение ВаО в данном случае неизвестно. Более широко распространение бария в различных горизонтах юры.

О л о в о (?) отмечалось в продуктах выплавки медистых песчаников, но в качестве минеральной составной части самих руд оно неизвестно.

ГЕНЕТИЧЕСКИЕ ТИПЫ

Генетические типы района совершенно исключительно интересны и особенно потому, что представляют замкнутую группу явлений, совершенно исключающих магматические или иные термические процессы глубин. В этом отношении область представляет полную противоположность горсту Фенноскандинавского щита, где почти каждая частица литосферы испытала различные по глубине и интенсивности формы метаморфизма.

На всей территории мы не только не имеем процессов магматических, но нет никаких признаков явлений гидротермального¹ или типично рудножильного типа; это тем более интересно отметить, что южные и восточные окраины захвачены дислокационными процессами; даже близость Урала нигде непосредственно не проявилась в области термальных процессов этих районов.

С другой стороны, если здесь отсутствуют явления поствулканического характера, то во всяком случае генетические процессы посторогенического типа здесь несомненны. Образование дислокаций разных типов в восточном районе создало не только механические условия для совершенно новых путей циркуляции обменных растворов, но частично внесло в осадочные слои новые химические элементы, которые несомненно находились в генетической связи с уральскими массивами (Cr, Cu). Не менее велико значение посторогенических процессов в Поволжье, где все своеобразие химических реакций частично находит свое объяснение в создании мощного химического обмена между группами пород, раньше совершенно разобщенных с обменными реакциями. В геохимических таблицах VI и VII процессы посторогенические связаны с катагенетическими.

Помимо посторогенического типа, частично сливающегося с явлениями катагенеза, мы сводим подавляющее число геохимических процессов к следующим типам:

1. Первичные и диагенетические типы как чисто физико-химического характера, так и биохимического.
2. Катагенетические процессы обмена и концентрации элементов.
3. Процессы гипергенеза — физико-химического, атмосферного, биохимического и иных типов.

Таким образом, в четвертом районе наблюдаются все типы преобразований, связанных с нормальной жизнью свиты осадочных пород.

Таблицы генетических циклов (см. приложение)

Несмотря на кажущуюся простоту реакций пермского моря и сменившей его пермтриасовой суши, с геохимической точки зрения история генетических процессов в них довольно разнообразна и позволяет разделить всю область на две группы: западную и восточную.

Таблица VI дает схематическое изображение основных геохимических реакций в западной части бассейна в Поволжье, включая сюда и Жигули, ограничивая этот

¹ Может быть, только некоторые кварцевые или кальцитовые жилы в артинских песчаниках носят термальный характер.

район приблизительно 22-м меридианом от Пулкова: в нее вошла геохимическая характеристика пермских отложений области, и лишь кратко намечены особенности подстилающего карбона и покрывающей юры, мела и третичных или послетретичных отложений.

В таблицу VII вошла вся восточная часть области, занимающая прибрежные отложения Уральского хребта, начиная с пермокарбона вплоть до современных.

Большую сложность и неоднородность представляют явления катагенеза, к которому мной в таблице условно отнесено большое количество различных образований как чисто катагенетического, так и отчасти построгоенического характера. При огромной миграции некоторых элементов и соединений (например, углеводородов) из разных горизонтов картина современного распределения минералов и химических элементов совершенно не отвечает их первичному распределению.

ГЕНЕТИЧЕСКИЕ ЦИКЛЫ

Уже из геологического очерка была видна общая картина того пермского морского бассейна, с генетическими циклами которого нам приходится считаться в этом районе в первую очередь. Мы отмечали там границы бассейна — с восточным берегом, окаймляемым Уральским хребтом, прибрежной зоной большого Сибирского материка, и с западными берегами из пологих склонов каменноугольных известняков и известняков пермокарбона. Эта несимметричность строения бассейнов резко проявилась в характере геохимических процессов и заставляет нас в нашем изложении генетических циклов разделить всю область на два района: собственно Поволжья и Приуралья. Сообразно с этим мною и даны в табл. VI и VII две схемы циклов, к изложению коих и перехожу¹.

1. Западная часть пермского моря и суши

Мы должны были бы, вероятно, начать всю генетическую историю района с эопалеозойских процессов, но фактически они нам нигде неизвестны; равно всюду мы должны подразумевать в глубинах осадки мелкого моря нижнего карбона. Вестественных обнажений перед нами открываются первые геохимические картины свитой кремнистых известняков московского яруса с теми же типичными чертами окремнения и доломитизации, с которыми мы уже познакомились при изучении Центрального каменноугольного бассейна. Интересно отметить, что в данном районе, там, где эти известняки перекрыты мощными толщами горизонтов С₃ и всей пермской свитой, мы видим преимущественно образование синевато-серых отдельных кремней диагенетического характера и почти совершенно не наблюдаем того массового окремнения целых слоев, которое наблюдалось в Московском бассейне под влиянием инфильтрованных сверху вод из юрских и ледниковых отложений (впрочем, в Жигулях такие горизонты нам известны).

Несколько напоминают нам вышеописанные железистые слои и более высокие горизонты карбона, где перед нами также картина сильного катагенеза слоев, превращение известняков в доломиты в одних местах, раздоломичивание (с выносом $MgSO_4$) в других, образование скоплений кристаллов доломита и кальцита в пустотах (доломитовая мука) и, наконец, полное замещение карбонатных пород с вынесением углекислого кальция и оставлением на месте чистых, частью даже огнеупорных глин и железных руд. Очень важным является для объяснения деталей этих процессов, что образование глин и железных скоплений наблюдается только в тех горизонтах карбона, которые по их осаждению испытали ре-

¹ Для правильного построения стратиграфических подразделений этих таблиц мне дал много ценных указаний Б. К. Лихарев.

грессию и затем после материкового перерыва или сохранились в виде поверхностных (подпочвенных) образований, или же испытали на себе верхнеюрскую трансгрессию. Геохимическая судьба, таким образом, резко различна для этого типа осадков, с одной стороны (Окско-Клязьминский район), и осадков непосредственно перекрытых пермокарбонам (как в Окско-Клязьминском районе, так и в Жигулях), — с другой.

К процессу образования глин и железных руд я вернусь в конце настоящей главы, сейчас же вкратце остановлюсь на тех геохимических процессах, которые отметил для верхнего карбона М. Э. Нойнский при изучении Жигулей.

Каменноугольное море в своих отложениях верхних горизонтов, приравняемых обычно к гжельскому ярусу и более высоким горизонтам, повидимому, было не очень глубоким, что видно, например, из балахнинской скважины, где эти горизонты сильно обогащены доломитами и гипсами, что вообще для каменноугольных отложений является исключительной редкостью: нигде в других районах мы не знаем этих геохимических особенностей верхних горизонтов карбона, и невольно напрашивается мысль, что наблюдаемые Штукенбергом гипсы были инфильтрованы из более высоких горизонтов (?) или же что сами горизонты должны быть отнесены к пермокарбону.

В нижних горизонтах преобладают известняки, выше же господствуют доломиты, обнаруживая постепенное обмеление бассейна.

Частью без перерыва, частью после материкового периода разной продолжительности¹ открытое каменноугольное море сменилось морем пермокарбона, тоже довольно глубоким, но более замкнутым водным бассейном с более повышенной солесностью воды. При постепенном обмелении бассейна глубоководные биохимические осадки карбонатов сменялись глинисто-мергелистыми доломитами, а потом чисто озерно-лагуновыми осадками с толщами осадков физико-химического характера: ангидрита, гипса, соли с редкими конкрециями кремня и, вероятно, зернышками глауконита. Еще сейчас вытекающие из пермокарбона соляные ключи (Жигули) нам говорят об отдельных скоплениях соли, как раз в это же время особенно обильно накапливавшейся в приуральской прибрежной полосе пермокарбона. Перекрытые сверху мощными известняками, доломитами и гипсами, подстилаемые снизу очень сходной и столь же мощной серией аналогичных пород осадки пермокарбона не могли испытать в явлениях катагенеза каких-либо особенно значительных химических превращений, и только местные перекристаллизации, образование желваков и жилок кварца и доломита или кристаллов кварца несколько разнообразили эту картину.

Какую-то заминку в минералообразовании или, может быть, даже короткий перерыв наблюдаем мы на границе пермокарбона и казанского яруса. Охватывая, вероятно, длинный период времени, отвечающий для Приуралья мощным накоплениям песчанистой (красноцветной) серии уфимского яруса, этот промежуточный период для Поволжья и всего западного района, тем не менее, сыграл свою огромную роль, и я склонен к этому моменту относить большинство тех скоплений веществ, которые положили начало углеводородам, рассеянным по различным горизонтам всего района: и нефть, залегающая в низах уфимского яруса, и асфальты можно связать с этим периодом кратковременного перерыва в пороодообразовании, связанного с мощным накоплением растительных и животных организмов планктона в прибрежных зонах. Но это только предположе-

¹ В последнем случае часто отсутствует и пермокарбон.

ние, доказательства которого могут быть даны лишь новыми исследованиями.

Но вот начинается мощная свита **казанского яруса**, часто называемого русским цехштейном, мощностью до 900—1000 футов [~ 275 —305 м], сплошь состоящая из белой серии известняков, доломитов и гипсов, лишь частично замещаемая к западу и к востоку песчаниками.

Особенно значительны здесь скопления **гипса**, выщелачиваемые поверхностными водами и образующие этим путем пещеры и сплошные пустоты, в которых обрушивающаяся поверхностная кровля известняков и доломитов превращается в своеобразную брекчиевидную породу, впервые разгаданную М. Э. Ноинским¹. Легко растворимый гипс обуславливает разнообразные процессы перекристаллизации этого минерала, и вообще трудно себе представить большее разнообразие внешнего строения, чем у гипса этой области, образующего то белоснежные массы мелкозернистого алебастра, то серые кристаллические «глазчатые» скопления с розами более крупных кристаллов, селенитовые волокнистые жилы, пластинчатые и листоватые массы; ко всему этому присоединяется красивый серый или голубоватый ангидрит, называемый местным населением мрамором, или леденцом. Особое разнообразие минералов обнаруживает течение р. Пьяны у знаменитой Барнуковской пещеры в Нижегородской губернии.

Не менее разнообразны здесь и **карбонатные породы** самого разнообразного строения и внешнего вида, испытывавшие на себе различные реакции диа-, ката- и гипергенеза.

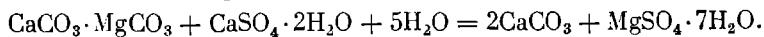
Мы лишены возможности во всей полноте и во всем разнообразии проследить все те химические реакции, которые шли и идут в этой интересной области и список продуктов которых помещен у нас в табл. VI.

Ниже я остановлюсь лишь на некоторых наиболее интересных геохимических процессах.

О кремнии в карбонатных породах носит здесь двойкий характер, связываясь с реакциями диа- и катагенеза. Целые горизонты доломитов замещены вторичным кремнем, однако самым красивым и своеобразным образованием здесь являются возникшие в результате катагенеза большие желваки халцедона голубоватого цвета с прихотливой концентрической полосчатостью. Источник кремнезема вряд ли приходится искать вне самих известковых слоев, а скорее в кремнистых органических остатках, рассеянных в массе карбонатных пород.

Однако самые интересные генетические циклы в области катагенеза намечаются в двух направлениях: в обменных реакциях между породами **казанского яруса** и их покрывающими юрскими и, во-вторых, в пропитывании разных горизонтов жидкими углеводородами. Особенно интересен первый процесс, изученный с большой детальностью М. Э. Ноинским в области Жигулей и дающий идеальный пример чистого катагенеза (т. е. обмена между петрографически разнородными слоями).

Как будет описано ниже, известняки и доломиты перми перекрываются юрскими песчанистыми и глинистыми толщами, богатыми колчеданом и железными рудами. Окисление этих сернистых соединений, проявляемое очень резко в весеннее время, дает начало растворам сернокислого кальция и железа, которые проникают через песчанистые толщи в пермские доломиты, вызывая, например, следующую очень характерную реакцию:

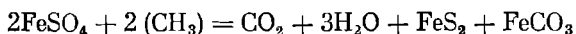


Эту реакцию геохимически мы можем расшифровать таким образом: доломит превращается во вторичный известняк, часто очень крупнокри-

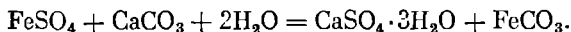
¹ Брекчиевидные доломиты известны в пермокарбоне, перми и даже в карбоне.

сталлический, напоминающий мрамор, а горькая соль в виде выплетов и водных растворов уносится текучими водами земной поверхности.

Одновременно с этим переносятся вглубь из юрских горизонтов и растворы FeSO_4 , которые в известняках, особенно в местах, богатых углеводородами, дают начало новым реакциям приблизительно такого рода:



или же в несколько другой геохимической обстановке:



В первом случае (CH_3) поставлено чисто условно. В результате получается накопление сферосидерита, вынос карбоната кальция благодаря его растворению угольной кислотой и накопление пирита в мелко раздробленном состоянии. Такую роль восстановителя играют, например, в Жигулях асфальты, пропитывающие некоторые горизонты казанских известняков.

В случае второго уравнения происходит только обмен металлами без чисто восстановительных процессов.

Вторая группа катагенетических реакций в известково-гипсовой толще русского цехштейна связана с п о с т о р о г е н и ч е с к и м и процессами, т. е. с обменом химическими продуктами между горизонтами под влиянием трещин и разломов или частичного раздробления пород. К этим процессам мы относим: мощные сбросы по восточной окраине нашего бассейна, по которым прокладывают себе дорогу растворы гипса и соли, и, наконец, сбросы и флексуры в юго-западной части, с образованием серных источников и миграцией нефти. Хотя для нас происхождение нефти в районе Самарской губ. и Поволжья остается загадочным, тем не менее мы склонны связывать ее образование с периодом накопления осадков, отвечающим уфимскому ярусу или низам казанского; из этих горизонтов мигрировали по трещинам нефть, битумы и получающиеся из них асфальты как в вышележащие слои, так и отчасти в подстилающий их пермокарбон. Попадая в гипсоносные толщи, углеводороды вызывают обычные реакции восстановления с накоплением самородной серы и сероводорода.

Так в сложной цепи химических явлений перегруппировываются химические элементы в толще известняков и гипсов русского цехштейна, и надо еще много исследовательской работы, чтобы выяснить все детали геохимии этих интереснейших образований Поволжья.

Во второй половине казанского времени началось вновь обмеление пермского моря, и к концу этой эпохи оно уже окончательно распалось на отдельные водоемы, все более и более суживаемое пустынной сушей, его окружавшей. С началом татарских отложений перед нами раскрывается последний период пермских отложений: суша завладела пространством, и наравне с песчаными дюнами нового пермотриасового материка в пестрой свите мелководных осадков стали накапливаться илы то мелких пресноводных бассейнов, то отдельных соляных озер или водоемов. В этой обстановке пустынного ландшафта с его бурями пыли и потоками тропического дождя, с массовыми накоплениями остатков погибших ящеров протекала геохимическая история этой мощной серии п е с т р ы х м е р г е л е й.

Внизу эта серия пород еще довольно богата гипсом, может быть и хлористым натрием; выше она принимает чисто материковый или пресноводный характер.

Часть гипса позднее проникла сверху в нижние горизонты, цементируя пески гипсовым цементом и положив начало тем своеобразным гипсовым песчаникам, кои под именем «пещеры» идут для полировки и выделки точильных брусков.

Длительный материковый период захватывает постепенно замиравшее на востоке пермское море, и вплоть до верхней юры в смене различных климатических режимов шла постепенная переработка и размыв пермотриасовой суши. Процессы элювиального разрушения пород, вымывание растворимых соединений, снос песков и темных глин, местное накапливание вымытого из почвы железа — такова та обстановка, которую застало верхнеюрское, а потом меловое море, разливаясь извилистой меридиональной полоской в низких болотистых берегах старой суши. Мощные биохимические реакции положили начало осадкам этих мелководных бассейнов; в илестой глине, богатой остатками растительных и животных организмов, диагенетически скоплялись конкреции сферосидерита, колчедана, фосфорита, образовывались зернышки глауконита в терригенных фациях этих морей.

Я не буду подробно описывать геохимические особенности этих циклов, но их основные черты настолько характерны и имели такое огромное значение для всех последующих геохимических реакций, что нельзя не отметить вкратце их значения.

Новый материковый период сменил эти юрские и меловые моря.

На поверхность размытых отложений палеозоя и мезозоя легли новые осадки, частью еще не разгаданного происхождения, частью уже расшифрованные: то это отдельные части третичных трансгрессий (акчагыльская) с ее бурыми глинами и большими розами гипса, то это многообразные пресноводные осадки постглюциновых бассейнов, чистые кварцевые флювиогляциальные пески и, наконец, все многообразие современного почвенного покрова, тесно связанного в своем химизме с подстилающими породами, окрашенного в разные цвета буро-красных оттенков на юге и в яркокрасные тона — на пестрых мергелях. В мощных торфяниках, особенно северных областей, накапливается синеватый на воздухе вивианит, в виде жилок, инкрустаций или землистых скоплений, постепенно на воздухе переходящий в бурые минералы типа бераунита.

В источниках, вытекающих из гипсовых горизонтов различных возрастов, наравне с выносом растворимых солей гипса и хлористого натрия образуется путем нескольких глубинных реакций сероводород, создающий ряд целебных минеральных вод или насыщающий черные минеральные грязи серного озера (например Сергиевские, Черемуховские минеральные воды и многие другие). Из этих растворов сера выпадает при окислении сероводорода, особенно зимой, инкрустируя иногда растения, покрывая желтым налетом камни или образуя белесые пленки на поверхности водоемов. Сбор этой серы является даже предметом кустарной добычи в Архангельской губ. и отчасти в Чистопольском уезде Казанской. Такие источники в области пермских мергелей выносят значительные количества углекислого кальция, откладывая его в мощных скоплениях (до 4 саж. [8,5 м]) рыхлых белых известняков — травертинов по «Окской и Волжской гриве» по местному выражению. Эти процессы, шедшие, повидимому, еще в третичную эпоху, производят мощный процесс декальцинации мергелей и доломитовых известняков.

Наравне с этими столь обычными реакциями Русской равнины несколько своеобразных процессов привлекают наше внимание; мы остановимся ниже на них более подробно, придавая им особое значение в геохимической жизни страны: это накопление железных руд, с одной стороны,

и палыгорскита, минерала, напоминающего горную кожу или пробку, — с другой.

А. Железные руды нам известны на огромных протяжениях и на севере, на границах Вологодской, Вятской и Пермской губерний и на юге, в низовьях Оки и на склоне Урала. Мы уже наметили в разд. е о железе характерные черты этих процессов оруденения, связанных с породами самого разнообразного возраста, с геохимическими явлениями большого масштаба в пространстве и времени. Что же позволяет нам разгадать их происхождение? Прежде всего, нигде эти руды не перекрываются осадками мергелей, известняков, глин определенных горизонтов доюрского времени; всюду на всем их протяжении, начиная с Холунинских шахт и кончая Выксунскими дудками, перед нами размытые и химически измененные слои осадочных пород палеозоя или перми, на них рудные скопления, часто связанные с черными или красными илистыми массами, выше серые, белые, иногда прекрасные пластичные глины и, наконец, пески или песчанистые глины, перекрытые типичной мореной с валунным наносом. Таково первое наблюдение. Далее, если мы нанесем на геологическую карту месторождения железных руд, то мы подметим два любопытных факта: руды почти всюду приурочены к районам, связанным или непосредственно окаймляющим юрские острова; именно под ними¹ или же около этих некогда мощных отложений юрского покрова обнаруживаются наши месторождения. Наконец, третье наблюдение менее знаменательно, но и оно бросается в глаза: руды в целом ряде случаев непосредственно или над перемытой юрой покрыты или проблематическими песками, или заведомо послетретичными осадками, хорошо выделяющимися на геологической карте под значком Q_1^Y — это осадки пресноводных бассейнов, частью предшествующих, частью одновременных с ледниковым покровом, главным образом постплиоценового, а может быть, даже и верхнетретичного возраста.

Таковы факты, и мы строим на них наше объяснение². Оно намечается само собой и рисуется нам в следующей картине: низкий спокойный рельеф материка, отошло юрское море, покрывшее своим широким, но извилистым рукавом огромную часть восточной России; в длинный континентальный период элювиальное разрушение поверхности, мощный размыв илистых осадков юры, химически перерабатываемых на дне мелких бассейнов. Путем долгого воздействия растворенных коллоидальных гуминовых кислот илистые осадки в обстановке жаркого, может быть, влажного субтропического климата, столь типичного, например, для части третичного периода, очищаются от заключающегося в них железа, выносятся избыток кремнезема щелочными водами, и на дне небольших материковых водоемов постепенно осаждаются слои чистых огнеупорных глин. А между тем богатые коллоидальной гидроокисью железа воды, проникая в подпочвенные слои, замещаю углекислый кальций этой же солью железа, образуют желваки сферосидерита в глинистых остатках когда-то бывших здесь известняков и мергелей и без всякого различия возраста размываемой поверхности известняка накапливают рудные массы. В большом масштабе *mutatis mutandis*³ это нам напоминает образование ортштейновых горизонтов в наших почвах, где поверхностные слои совершенно освобождаются

¹ В Вятско-Камском водоразделе они иногда залегают и на юрских глинах, в Окском — всегда под.

² Мы знаем в литературе ряд попыток объяснить генезис этих рудных запасов: Оливьеры, Докучаева, Гладкого, Крата, Покровского и многих других, но думаем, что наиболее правильный путь в анализе этих процессов принадлежит Землячскому.

³ Вносятся соответствующие изменения. — *Ред.*

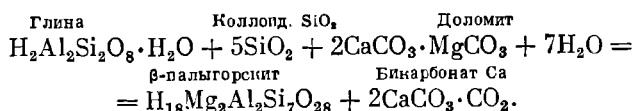
от железа, концентрируя последнее в виде сплошного горизонта на большей или меньшей глубине.

Нет никакого сомнения, что особенно интенсивно протекали эти процессы там, где шел усиленный размыв богатых железом юрских слоев, где окисление колчеданов приводило к обогащению растворов сернокислыми солями закиси железа и где сама серная кислота играла роль химического деятеля, очищавшего от карбонатов глинистые осадки и постепенно способствовавшего превращению их в чистые пластические глины. В сильно измененных слоях глины, покрывающей под именем талоконки ряд железных месторождений, мы нередко можем узнать химически видоизмененные и перемытые келловейские осадки.

И если, таким образом, нам кажется весьма очевидной роль юрских осадков в возникновении геохимических явлений, то менее очевидной является точная фиксация времени этого процесса. Действительно ли нужно приурочивать возникновение вышеописанных химических реакций к моменту послетретичных бассейнов? Или, может быть, шли они и в другие эпохи геологической истории или идут еще и сейчас? Я склоняюсь скорее к последним предположениям, думая, что наибольшей интенсивности реакции могли достигать при физико-географических условиях, отвечавших третичному или постплиоценовому климату, но они могли идти и в другие моменты химических преобразований Русской платформы, этого послемезозойского материка. Особенно интересным является сравнение всех этих образований с совершенно аналогичными процессами гипергенеза в миоценовое время всей Западносибирской равнины и восточных склонов Урала. (И. М. Крашенинников, С. С. Неуструев). Повидимому, климатические условия последних моментов палеогена особенно благоприятствовали каолиновому и отчасти латеритному процессу гипергенеза и этим создали тот мощный элювиальный покров, который дал материал для переотложения в последующие эпохи.

Б. Еще другая картина большого геохимического значения раскрывается нам среди пестрой свиты мелководных осадков татарского яруса, в трещинах уфимских отложений, среди размытых и перемытых известняков казанского яруса: я говорю об образовании п а л ы г о р с к и т а, этого своеобразного ископаемого, напоминающего кожу или пробку и накапливающегося в колоссальных количествах в некоторых горизонтах пестрых мергелей. Во всем мире нет другой области, где бы этот минерал достигал такого огромного распространения и намечал столь значительную фиксацию силикатами глинозема и магнезии в процессах поверхностных частей земной коры. В моей работе, посвященной этому ископаемому, я отмечал, что оно приурочено к самым разнообразным горизонтам: татарскому ярусу, казанскому и уфимскому ярусам (и их оруденению), пермокарбону (кунгурскому ярусу), а в области III (под Москвой) еще средним доломитовым горизонтам московского яруса карбона.

Очень простое химическое уравнение связывает образование этого минерала:



Из этого уравнения мы видим, что образование палыгорскита требует присутствия глинистого вещества, карбоната магния и кальция и избытка кремниескислоты.

Теоретически можно себе представить образование палыгорскита следующими четырьмя способами:

1. Путем воздействия магнезиальных растворов на глину с большим избытком кремнекислоты (коллоидальной).

2. Путем воздействия кремневых и глиноземистых растворов на доломит или магнезит.

3. Путем обменной реакции между кремневыми растворами и составными частями доломитизированного мергеля.

4. Путем обменной перегруппировки составных частей магнезиального мергеля, содержащего большое количество свободной кремнекислоты.

Несомненно, что образование палыгорскита связано главным образом с деятельностью поверхностных вод, инфильтрованных из биосферы и ледниковых слоев. Так как для образования палыгорскита необходимо привнесение большого количества кремнекислоты, а последней особенно богаты воды, прошедшие через ледниковые глины, то накопление его главным образом приурочено к той части пестрых мергелей, которая была покрыта ледниковым покровом и его моренными отложениями.

Картина химических процессов рисуется в следующем виде: сверху инфильтруются поверхностные растворы, богатые гуминовыми и другими органическими кислотами и кремнекислотой; достигнув магнезиальных горизонтов, эти растворы образуют палыгорскит из магнезии карбонатов, глины мергеля и отчасти привнесенной, отчасти заключенной в слое коллоидальной кремневой кислоты; одновременно с этим гуминовые кислоты выносят окислы железа, а освободившаяся угольная кислота уносит карбонат кальция. Таким образом, горизонт мергеля превращается в палыгорскит + остатки глины, бывшей в избытке, + избыток песчинок кварца.

При этом красный мергель превращается в зеленый, что связано не с восстановлением железа в закись, а с вынесением окиси Fe из горизонта. Как общее правило, сам палыгорскит окутывается зеленой оторочкой, тогда как обычный цвет самого горизонта мергеля остается красным.

Так как очевидно, что зеленый мергель произошел из красного, то его состав по отношению к последнему характеризует те процессы, при которых образовывался и палыгорскит. Эти процессы особенно наглядно сказываются на образцах мергелей, обнажаемых по Волге, ниже Нижнего Новгорода, и могут быть сведены к следующим:

- 1) выщелачивание гипса и щелочей;
- 2) извлечение магнезии для образования палыгорскита;
- 3) сильное увеличение содержания глины, иначе говоря, вынос карбонатов и кремнекислоты;
- 4) извлечение окиси железа, при постоянном количестве закиси.

Таков один из своеобразных химических процессов, идущий на площади почти полумиллиона квадратных верст и связанный с теми процессами поверхностного типа, которые испытывала эта часть пермских отложений в долгий континентальный период. Я уверен, что эта реакция могла идти и до образования ледникового покрова и после него, что она идет частично еще и сейчас, обуславливая переход в растворимое состояние карбоната кальция, но несомненно, что в данном случае, подобно влиянию юры на образование железных руд, особенное значение в развитии этого процесса сыграл ледниковый покров.

II. Восточная часть пермского моря — Приуралье

Уже беглое сравнение приложенных к данной работе геохимических таблиц VI и VII показывает то глубокое различие, которое наблюдается между геохимическими циклами двух половин пермского моря и суши. В то время,

как на западе геохимические процессы протекали на больших глубинах в обстановке обычных биохимических реакций моря, на востоке Уральский хребет, образовавшийся в артинское время из девонской и каменноугольной геосинклинали, нарушил спокойное течение этих реакций и обусловил не только огромное развитие ряда таких процессов, которые на западе играли лишь подчиненную роль (например, скопление соли), но и вызвал появление ряда новых химических элементов, приносившихся с разрушавшегося Уральского хребта и принимавших новые формы концентрации.

Я не буду останавливаться детальнее на тех геохимических циклах, которые тесно связаны с историей самого Урала, и начну описание с артинских горизонтов, т. е. с тех прибрежных, частью даже материковых отложений, которые отвечают времени максимального подъема Урала и которые накапливались в виде песчаников, глин и конгломератов на берегах моря, окаймлявших молодой хребет.

Под влиянием горообразующей деятельности обособлялись отдельные заливы более глубокого на западе моря и огромные количества гипса и соли концентрировались на дне бассейнов, напоминая ту геохимическую картину, которая рисуется нам в настоящее время в той озерно-степной полосе, которая простирается вдоль Крымо-Кавказского мезозойского третичного хребта. Эти слои гипса и соли многократно перекрывались глинистыми и песчаными наносами, сносимыми бурными водами дождей или навеваемыми пылью, а в верхних горизонтах частично должны были накапливаться калиевые соли, открытие коих составляет одну из ближайших задач изучения этой огромной области.

В то время, как в прибрежной части, у берегов Урала, шло накопление механических или физико-химических осадков с редкими скоплениями сферосидерита, остатками древесины, а в процессах катагенеза в сепариях и остатках раковин концентрировались соединения бария и стронция, на западе отлагались биохимические осадки известняков, частично перекрывшие артинские песчаники в недолгой трансгрессии кунгурского яруса.

Так, вдоль глубокой впадины геосинклинали на берегу набегавших с востока складок Урала шло осаждение артинских прибрежных слоев. Среди быстрых и внезапных смен дислокаций прибрежные зоны часто вдруг и сразу заменялись глубокими осадками абиссальных глубин, а эти в свою очередь быстро превращались в морской берег с его прибрежной флорой. Речная галька и песок выносились бурными реками, стекавшими с восточных склонов Урала, а в холодное время с них спускались в бухты артинского моря могучие ледники (А. Чернов), сменяясь бурными делювиальными наносами илистых осадков.

Мощные скопления гипсов и соли остались нам в наследство от этой эпохи, и, подобно западным окраинам умиравшего пермского моря, перед нами рисуется все многообразие процессов катагенеза этих легко растворимых солей, то образовавших огромные пещеры с накоплением вечного льда (Кунгурская пещера), то перекристаллизовавшихся мелкокристаллические алебастры в волокнистые прослойки золотистого селенита.

Наконец, суша с ее материковыми и пресноводными процессами завладела большей частью пермского моря, прекратившаяся горообразовательная деятельность проявлялась лишь в возникновении меридиональных сбросов, и в эпоху уфимских отложений пестрая и красная серия песчаных и частью мергелистых пород покрыла морские осадки пермокарбона. Повидимому, в эти же моменты шло разрушение молодой Уральской цепи, и одновременно с выносом реками механических продуктов гипергенеза шли растворение и перенос растворимых солей в те мелкие частью соленые,

частью пресноводные бассейны, которые то тут, то там должны были возникать в пустынной низине на запад от Урала. В этих условиях изменчивых неглубоких водоемов мы ищем сейчас разгадку тех больших скоплений металлов меди, ванадия и хрома, которые нам известны не только в предгорьях Урала, но и за сотни верст от него среди песчано-глинистых осадков. При геохимическом обзоре меди и ее соединений мы говорили об этих своеобразных скоплениях, и было бы очень благодарной задачей чисто минералогически изучить геохимию этой области и в точном химическом учете самих осадков, песков и конгломератов попытаться выяснить происхождение этих загадочных образований. Нам широко известен этот геохимический процесс не только среди пермских отложений Приуралья, — на юге России, в центральной Германии и Северной Америке рисуются нам аналогичные картины медистых скоплений в песчаных образованиях, окаймляющих области герцинских складок, богатых рудными жилами.

Постепенно, без заметных переходов, сменились эти отложения скоплениями других песчаников, а еще выше — пестрыми мергелями татарского яруса.

Дальнейшие геохимические циклы тождественны с тем, что мы говорили, описывая западную половину области; на них влияла только близость Урала, откуда приносились продукты механического разрушения, а мощные явления гипергенеза привели к замещению на восточных склонах Урала известковых пород скоплениями железных руд (Чердынский и Соликамский Урал).

Здесь, на восточных склонах Урала, одно интересное геохимическое явление останавливает наше внимание: это накопление чистых кермических глин в районе Уфимского плоскогорья. Уже на предыдущих страницах мы видели близкий процесс среди осадков постплиоценовых бассейнов Камско-Вятского водораздела, где вместе с железными рудами и песками на измененных горизонтах большей частью татарского яруса скоплялись илестые глины этих бассейнов.

Вдоль северной оконечности Уфимского нагорья тянется ряд очень сходных скоплений огнеупорных глин в области известняков, связанных с железными рудами, в области песчаников — с песками. Перед нами рисуется своеобразная картина элювиального разрушения каменноугольных и артинских известняков с накоплением на их месте своеобразных гнезд и карманов чистых глин, богатых титаном (до 50—40 м мощности), с редкими кусками древесины, проникнутой иногда кристаллами колчедана. Эти же глины намыты сплошными слоями вместе с чистыми песками на артинских песчаниках того же района. Мы связываем эти образования со сложным элювиальным выветриванием долгого континентального периода этого района, но окончательное приурочивание самих скоплений к их современному положению, может быть, следует отнести к третичной эпохе, к тому климатическому режиму, когда богатая гумусом почва вызывала реакции распада силикатов в зоне гипергенеза и когда вымываемые из одних горизонтов соединения железа накапливались в других. Ср. замечание по поводу генезиса железных руд Камско-Вятского бассейна стр. 166.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из вышеприведенного описания геохимических особенностей пермских отложений восточной и северо-восточной частей России мы можем сделать несколько выводов:

1. Область осадков пермской суши и моря в изученных выше границах совершенно не затронута ни вулканическими, ни гидротермальными гео-

химическими процессами. Даже наблюдаемые на востоке и юге посторогенические процессы оказываются связанными лишь с холодными водами, обусловившими усиление нормальных реакций катагенетического характера.

2. Главнейшие и весьма сложные геохимические процессы области носят характер син-, диа-, ката- и гипергенеза, позволяя таким образом во всех стадиях проследить историю геохимических превращений осадочной серии пород.

3. Первую группу геохимических превращений представляют одновременные осадки химического типа: соль, гипс, известняк, доломит, тесно связанные с распространением в них соединений стронция, которые позднейшими процессами концентрируются в кристаллы целестина.

4. Вторую группу, связанную, повидимому, главным образом, с границей между карбоном и пермью, представляют скопления битумов, нефти, асфальта и битуминозных сланцев.

При позднейших процессах посторогенического характера эти элементы мигрируют, вызывая новообразование серы.

5. К третьей группе я отношу еще во многих отношениях загадочные скопления металлов Sr, V, Cu в пермских песчаниках, связанные, вероятно, с первичным осаждением из прибрежных зон морских бассейнов.

6. Очень большое биохимическое значение имеют осадки юры, богатые фосфором, серой и железом, вызывающие катагенетическое накопление железных руд в подстилаемых горизонтах.

7. Самостоятельную группу геохимических процессов составляют явления катагенеза и отчасти гипергенеза в известковых породах — доломитизация, дедоломитизация, окремнение, палыгорскитизация, перенос и перекристаллизация гипса.

8. Огромную геохимическую и притом практическую роль играют новообразования при современном рельефе, связанные в своем происхождении с длительным материковым периодом и многообразными процессами элювиального, флювиогляциального, ледникового, озерного и т. п. типов. Эти процессы приводят к накоплению огнеупорных глин, песков, сферосидерита и лимонита.

9. Наконец, последний тип геохимических процессов необходимо связывать с дислокациями и им подчиненными солеными и сероводородными источниками, миграцией углеводородов и т. д.

10. Сложность геохимических превращений и огромность захватываемых ими территорий заставляют смотреть на вышеприведенную схему лишь как на первую попытку связать химические преобразования района; в этом направлении желательнее обратиться больше внимания на минералогию и геохимию области и, подобно прекрасной работе Ноинского, попытаться точнее расшифровать химическую природу осадков.

Главнейшая литература по геологии

(только основные исследования или сводки)¹:

- Н. Головкинский. О пермской формации в центральной части Камско-Волжского бассейна. Материалы геол. России, 1869, I, 273.
А. Дитмар. Материалы геол. России, 1873, V, 169. (Владимирская губ.).
П. И. Кротов. Труды Казанск. об-ва естествоиспыт., 1878, VII, 1; 1879, VIII, 2. (Вятская губ.).

¹ За исключением юры и мела.

- А. К л о в. Материалы геол. России, 1881, X, 1—126.
 Материалы по оценке земель Нижегородской губ., под ред. В.В. Докучаева, 1884—1886 I—XIV (со статьями Докучаева, Ферхмина, Левинсона-Лессинга, Зайцева, Земятченского, Сибирцева и Амалицкого).
- С. Н. И к и т и н. Труды Геол. ком., 1884, I, № 2. (Лист 56-й).
- П. И. К р о т о в. Артинский ярус. Труды Казанск. об-ва естествоиспыт., 1885, XIII, вып. 5.
- П. И. К р о т о в. Геологические исследования на западном склоне Соликамского и Чердынского Урала. СПб., изд. Геол. ком., 1888, VI.
- А. А. К р а с н о п о л ь с к и й. Лист 126-й. Труды Геол. ком., 1891, XI, № 2.
- Н. М. С и б и р ц е в. Общая геологическая карта России. Лист 72-й. Труды Геол. ком., 1896, XV, № 2.
- А. Ш т у к е н б е р г. Лист 127-й. Труды Геол. ком., XVI, № 1, 1898.
- М. Э. Н о и н с к и й. Труды Об-ва естествоиспыт. Казанск. ун-та, 1899, XXXIII. (Строение Казани).
- А. Ч е р н о в. О залегании прикамской соленосной толщи. Ежегодн. геол. мин. России, 1908, X, 3.
- В. И. И с к ю л ь. Геология и почвы Сысольского лесничества. Труды иссл. Печерского края, 1909—1910, I—II.
- С. С. Н е у с т р у е в и Л. И. П р а с о л о в. Материалы по оценке земель Самарской губ., 1911, V. (Самарский уезд).
- П. И. К р о т о в. Западная часть Вятской губ. Труды Геол. ком., нов. сер., 1912, LXIV.
- А. В. Н е ч а е в и А. Н. З а м я т и н. Труды Геол. ком., 1913, LXXXIV.
- А. А. Ч е р н о в. Труды Геол. отд. люб. ест. н., 1913, I. (Дислокации нижнепермских отложений).
- М. Э. Н о и н с к и й. Самарская Лука. Труды Об-ва естествоиспыт. Казанск. ун-та, 1913, XIV, вып. 4, стр. 487—768.
- А. Н. З а м я т и н. Индерское озеро и его окрестности. Изв. Геол. ком., 1914, XXXIII, 681. (Сравнение).
- А. Н. З а м я т и н. Возраст каменной соли Илецкой Запщты. Геол. вестн., 1917, III, 38.
- М. Э. Н о и н с к и й. Прилож. прот. Об-ва естествоиспыт. Казанск. ун-та, 1917, № 334. (Геол. Казани).
- М. Э. Н о и н с к и й. Геологические исследования в Сюкеевском битуминозном районе. Изв. Главн. нефт. ком., 1919, № 6—7, 20.
- Б. К. Л и х а р е в. Обзор литературы по верхнепермским отложениям Европейской России за истекшее десятилетие (1910—1919). Пг., изд. Геол. ком., 1920 (со списком главнейшей литературы).
- А. В. Н е ч а е в. Верхнепермские отложения России. Пг., изд. Геол. ком., 1922.
- А. И в а н о в. Новые данные о возрасте жигулевской дислокации. Сообщения о научно-технических работах в России, 1922, VII, 24.

По минералогии

(главнейшая с преобладанием литературы последних лет)¹:

- О нахождении фольборгита. Горн. журн., 1839, II, 315. (Первое сведение).
- И. И л и м о в. Горн. журн., 1842, I, 479 (см. волконскоит).
- И. А у э р б а х. Серные копи на Самарской Луке. Вестн. Русск. геогр. об-ва, 1854, XII, 129.
- Н. И. К о к ш а р о в. Materialien zur Mineralogie Russlands (Материалы к минералогии России), I, 1853, 140 (волконскоит); IV, 1862, 145 (фольборгит); IX, 1884, 267 (фольборгит).
- А. О з е р с к и й. О месторождениях серы в Приволжском крае. Сборн. Мин. об-ва, СПб., 1867, 67.
- F. G e n t h. Zs. Kryst. u. Min., 1878, II, 12.
- В. Е р о ф е е в. Горн. журн., 1878, II, 60. (Нефть и сера Казанской и Самарской губ.).
- В. А. К р а т. О характеристике месторождений железных руд на отводах Омутн. завода. Горн. журн., 1884, II, 68.
- Г. В и л е н и у с. Горн. журн., 1885, II, 313. (Колчедан Тетюшского района).
- П. А. З е м я т ч е н с к и й. Железные руды центральной части Европейской России. Труды СПб. об-ва естествоиспыт., 1889, XX, 24.

¹ За исключением минералов юры и мела.

- С. Н. Никитин. Изв. Геол. ком., 1889, VIII, стр. 165. (Поиски гудрона).
 Рязположенский. Труды Казанск. об-ва естествоиспыт., 1893, XXVI, вып. 1. (О поисках гудрона).
 Н. П. Соболев. О карстовых явлениях Онежско-Двинского водораздела. Изв. Русск. геогр. об-ва, 1899, XXXV, 482—502. (Холмогорит).
 П. Покровский. Рудопосная площадь Камско-Вятского водораздела. Горн. журн., 1899, I, 241. (Генезис).
 П. И. Кротов. Волконскоит из Ухтыма. Зап. Мин. об-ва, 1902, XI, 1.
 Я. В. Самойлов. О целестине из дер. Печич. Изв. Акад. Наук, 1909, 485.
 К. И. Богданович. Рудные месторождения. СПб., 1912, I, 402—405. (Жел. руды Вятско-Камского района).
 К. К. Матвеев. Соле-ин-соле структура с р. Чусовой. Труды СПб. об-ва естествоиспыт., 1910, XLI, № 5. (Ангидрит исправить на целестин).
 А. Н. Замятин. Сергиевские минеральные воды. Изв. Геол. ком., 1911, XXX, 687—713.
 В. П. Мамонтов. Геологические исследования и полезные ископаемые в районе Ухта-Печ.-Камской жел. дор., СПб., 1911.
 А. Е. Ферсман. Исследования в области магнезиальных силикатов. Зап. Акад. Наук, 1913 (VIII), XXXII (пальгорскит), 2.
 А. Frenzel. Die Erdöl-Bitumen und Schwefellagerungen Tetjuchi. Zs. f. Petr.-Ind., 1913.
 F. Angel. über Wolkonskoit. Zs. Kryst. u. Min., 1913, LII, 568—579.
 В. И. Крыжановский в отчете В. И. Вернадского. Изв. Акад. Наук, 1914, 1360. (Фольборгит).
 Г. Петульников. Ежегодн. геол. мин. России, 1914, XVI, вып. 5—6 (Находка калиевой соли в Иваново-Вознесенске).
 В. Хименков. Отчеты по исследованию фосфоритов. 1914, VI, 91; 1915, VII, I, 125.
 П. Л. Драверт. Целестин и стронцианит пермских отложений Свияжского уезда. Ежегодн. геол. мин. России, 1915.
 П. Л. Драверт. Целестин. Камско-Волжская Речь, 1915, № 116.
 А. А. Пушкин. Минеральные источники Костромской губ. Кострома, 1915.
 В. Н. Робинсон. Огнеупорные глины Кунгурского и Красноуфимского у. Отчет Геол. ком. за 1916 г., стр. 601.
 П. Л. Драверт. К минералогии пермских отложений по р. Ик. Прилож. прот. Об-ва естествоиспыт. Казанск. ун-та, 1916, № 317.
 В. Хименков. Железные руды в районе р. Сысоли. Рудный Вестник, 1916, I, 53.
 А. Н. Замятин. Очерк полезных ископаемых севера Европейской России. Поверхность и недра, 1916, № 6—9.
 П. Л. Драверт. Труды Комиссии сырья Комитета военно-технической помощи. Казань, 1917, I. (Целестин, колчедан, сера, битумы).
 В. А. Варсановьева. Рудный Вестник, 1917, II, 72, 131. (Огнеупорные глины Пермской губ.).
 Н. С. Курнаков и др. Изв. Акад. Наук, 1917, № 8, 467—474. (Соликамские соли).
 В. Смирнов и др. Железные болотные руды Костромской губ. Труды Костр. научн. об-ва по изуч. края, 1918, IX.
 А. Н. Замятин. Нефть Приволжского района. Материалы КЕПС, 1918, IV, вып. 22, 144.
 Н. И. Сургунов. О химическом составе соляных рассолов Соликамского района. Рудный Вестник, 1918, III, № 1, 12—22.
 Б. Ф. Мефферт. Глины Камско-Вятского водораздела. Материалы общ. и прикл. геол., 1918, № 37.
 Я. В. Самойлов. Об источниках калиевых солей в России. Изв. Главного спич. комитета, 1918, I, 12.
 П. Л. Драверт и М. Бродский. Чистопольский уголь. Изв. Горн. отд. ВСНХ, 1919, № 2—3.
 А. Рябинин. К вопросу о месторожд. калиевых солей в Соликамском районе. Материалы общ. и прикл. геол., 1919.
 К. П. Калицкий. Нефтяные месторождения Казанской, Уфимской и Самарской губ. Нефтяное и сланцевое хозяйство, 1920, № 1—3, 44.
 В. И. Вернадский. Опыт описательной минералогии. 1921, II, 2, стр. 145, 159. (Сероводород).
 А. А. Чернов. Задачи разведочных работ на каменную соль и соли калия. Горн. журн., 1922, XCVIII, 15.

ПРИЛОЖЕНИЯ

I. Геохимическая таблица восточной

В о з р а с т		Геологическая характеристика	Л и т о г е н е з
Современный		Биохимические процессы моря	Ракушечки, водоросли (литотамниевые, ламинарии)
		Химическое выветривание	Железистые растворы
		Минеральные источники	
		Осадки болот, озер, морей	Илы, конкреции железистые
		Болото- и торфообразование	Подзолы, ортштейн
Постплиоценовый	—	Осадки морских трансгрессий. Ледниковые процессы. Образование горста	17. Ракушечники, илы
Третичный	—		16. Валунные пески и суглинки
Палеозой	Эокарбон (?)	Покровы? Жилы, Лакколиты и жилы	15. Жилы, покровы лимбургита (?) Щелочные жилы Турьего мыса
	Девон (?)	(Следы каледонской складчатости)	14. Щелочные массивы Кольского полуострова
	Кембрий (?)	Сбросы с интрузией	13. Песчаники, конгломераты, глинистые сланцы островов Кильдина и Рыбачьего и восточного берега Кольского полуострова
		Прибрежные осадки	12. Рудные жилы Кандакшского залива и Западного Мурмана
		Сбросы с интрузией	11. Диабазы и диориты Мурманского побережья
Архейская серия	Иотнийский (Неясные ископаемые)	Штоки, батолиты, пегматиты, аплиты, кварцевые жилы	10. Граниты (рапакиви Выборгской губ.) Аплитовые жилы (Валаам)
		Интрузии, жилы, штоки, покровы, вулканы	9. Диориты и диабазы (Валаам, Южная Олония, Свирь) Петрозаводские извержения
		Прибрежные мелководные осадки	8. Песчаники и кварциты Свирь, Ладога)

части Фенноскандинавского щита

Главные химические элементы	Минералы сингенеза	Минералы метаморфизма	Минералы гипергенеза
J, K, (Br), Ca	Кальцит, жемчуг (речной)	«Беломорские рогульки»	
Fe, S, O, H			Ржавые полосы фальбандов с карбонатами Cu, Ni, Co; мелантерит
Fe, Mn, (Ba), P	Лимонит, вад, манганит		
C, Fe, Si	Опал, кварц, лимонит		
Ca, C—O Fe, Au (в песках)	Кальцит и арагонит раковин Магнетит, самородное золото		
Na, Zr, Ti и др.	Элеолит, эгирин, арфведсонит, энigmatит, микроклин, альбит, эвдиалит, эвколит, мюзандрит, титанит, ильменит и др.	Цеолиты, флюорит, кварц (Контактное действие на породы, особенно 13)	Каолин (?), гидраты, глинозема, пески элеолита, арфведсонита и эгирина, кальцит (редко)
Si, F	Кварц, мусковит	Плавиловый шпат, аметист Барит	
Pb, Zn, Cu, S, Ag, Ba, (Sb), (Ni, Co)	Сфалерит, галенит, кальцит, кварц, барит, серебро самородное		Свинцовая охра, выплеты солен
C(?)		Эпидот, уралит, серпентин, хлорит	Серпентин, хлорит эпидот
K, F, немного B и P, Mo	Главные пегматиты. Мусковит, турмалин, апатит, полевые шпаты, молибденит	Образование контактных сланцев, цоизит, актинолит, альмандин	Верхние части жил свесены
Fe, Mg, Ti, Cu, Ag, Au, P, S, B	Гематит, магнетит, титаномagnetит, самородное золото Медный блеск, халькопирит, борнит, самородная медь, немного сфалерита	Контактное изменение известняков и кварцитов. Гидротермальное накопление Cu и Fe. Эпидот, кварц, аксинит	Эпидот, хлорит, азурит, малахит
Si	Кварц		

В о з р а с т		Геологическая характеристика	Л и т о г е н е з
А р х е й с к а я с е р и я	Верхний=Онежскому	Вулканические интрузии и покровы	7. Диабазы Петрозав. (част.)
	Ятульский (и Калевский)	Складчатость, сбросы, динамометаморфизм Морские осадки глубокого (6) и мелкого моря	6. Известняки, доломиты (О) глинистые сланцы, шугит, туфы
			5. Песчаники, кварциты (Петрозаводск)
			4. Тальковые и хлоритовые сланцы. Кварциты сливные (Сегозеро)
А р х е й с к а я с е р и я	Докалевский (ботнийский и ладожский)	Инъекция в сланцы и зеленокаменные породы (образование мигматитов и метабазитов)	3. Граниты, превратившие всю свиту 1 в гранито-гнейсы и глуб. кристалл. слюдяные сланцы, филлиты, андалузитовые и ставролитовые сланцы. Гранат, гнейсы (К)
		Лакколиты, батолиты, жилы	2. Порфириты, габбро, перидотиты, нориты и др.
Катархейский		Пустынные, делювиальные образования	1. Первичные осадки и скопления (превращенные в гранито-гнейсы)

Примечания: Таблица весьма гипотетична и может быть рассматриваема как грубая схема, пытающаяся связать в одно целое довольно разнородные части восточных областей шита: Олония, Кольского полуострова и Поморья. Сокращения: О—Олония, К—Кольский п—ов.

В графе химических элементов мною отмечены лишь главнейшие, наиболее типичные для данной серии, при этом часть указанных элементов внесена позднейшими процессами и не отвечает хронологическому моменту образования данных отложений.

Номера в графе литогенеза относятся к наиболее вероятной хронологической последовательности, хотя надо иметь в виду, что повторяемость одних и тех же процессов (например, излияний основных магм) приводит к невозможности очень резкой параллелизации некоторых геологических явлений.

Не менее сложным является вопрос о времени минерализации рудными элементами, каковая, повидимому, относится тоже к различным моментам, не подлежащим пока более точной хронологии.

Равным образом, весьма предположительно датируется возраст щелочных массивов Кольского полуострова. Если думать, что Хибинский массив метаморфизовал девонские осадки (Рамзай), то его возраст будет последевонским; с другой стороны,

Продолжение

Главные химические элементы	Минералы сингенеза	Минералы метаморфизма	Минералы гипергенеза
Mg, Fe		Эпидот, хлорит, уралит	
Ca, Mg, C—O, Sr, Ba	Кальцит, уголь (?)	Кристаллы доломита, альбита, микроклина, флогопита. Гематит, стронцианит, барит, аметист, гетит (Волкостров). Шунгит	Следы медного карбоната на шунгите, палыгорскит
Si Mg, Fe, Si	Кварц	Вторичный крист. тальк, плотный стеатит, хлорит	Бурые железняки
Al, Si	Мусковит в пегматитах, полевые шпаты	Ставролит, андалузит, дистен, мусковит, силлиманит, гранаты	
Mg, Ca, Fe, (C?)	Пироксены, оливин, роговые обманки	Превращение в друзиты и метабаты; дегренистый асбест (O) серпентин, хлорит, скаполит, доизит и др.	Тальк
Au, Ag, Co, Ni, Fe, S	Фальбанды с колчеданом (синг. ?) Железистые и песчаные осадки и золотые скопления	Магнетит Западного Мурмана	Карбонаты меди, кобальта и никеля

аналогия с другими щелочными массивами северных щитов (Норвегия, Гренландия, Канада, Швеция) не позволяет считать его возраст более молодым, чем эокарбонный. Может быть, исследование южных кандалакшских жил прольет свет на их возраст и позволит поставить в хронологическую связь с остальными eruptивными процессами области. Под цифрой 15 мной помещены эффузивные фации щелочных пород, согласно находкам валунов (лимбургита и фонолитового туфа).

Графа, в которой даны минералы метаморфизма, необычайно сложна и разнородна и объединяет минералы весьма различных генетических типов: основной чертой их является позднейшее возникновение их в данной породе, частью путем перегруппировки уже имеющихся в породе элементов, частью путем привнесения новых. Нет никакого сомнения, что как этот столбец, так и столбец самих химических элементов (как первичных, так и позднее привнесенных) нуждаются в серьезной переработке после новых полевых и экспериментальных исследований.

Условными значками обозначены: волнистой линией — перерыв в образовании отложений, двумя смещенными друг против друга параллельными линиями — период дизъюнктивных или плинктивных дислокаций.

II. Геохимическая таблица кембросилура

Западная часть — про

В о з р а с т	Геологическая характеристика	Л и т о г е н е з	Главные химические элементы	
Современная эпоха	(Влажный климатический режим)	Торфяники Подзолистые почвы . Известковые туфы (гажа) Морской ил, осадки моря	C, N, P, Fe, Mn Si Ca, C—O Fe, S, Mn, P	
Ледниковая ~~~~~	Механическое разрушение, размыв	Глины, пески, валуны, межледниковые осадки		
Д е в о н	Верхний ~~~~~	Пески и песчаники Прослойки глин, известняки	Si	
	Средний	Доломиты Доломитовые мергели, гипсы, соль	Si, Al S—O, C, Cl, Br Na, Mg, Ca, Sr, Ba Cu, Fe, Mn, Pb, S	
	Нижний	Красные песчаники и мергели	Si, Ca, Mg Fe, Mn	
	Верхний силур	Н. и В. Эзельские слои (K, J)	Мелкое море	Мергели, известняки
Верхний силур	Пентамеровый ярус (H, G)	Небольшое обмеление	Известняки, мергели и доломиты	Pb, Zn, (Ag, Au) S Следы P
Нижний силур	Эстляндские слои (F, E)	Открытое море	Известняки с мергелями, кремнистый известняк	Ca, C—O Cu, Pb S
	Иевский и кукуерский ярусы (D, C _{3,2})	Углубление Мелкие морские лагуны и заливы	Известняки Известняки с прослойками кукуерсита	Ca, C—O C, N, H (S), (Cl)

Примечания: Волнистая линия — перерывы в отложениях; стрелка — главные источники или водоносные горизонты.

* Минералы обломочного происхождения (не новообразование) из разрушенных

и девона северо-запада России

должение см. в табл. III

Минералы син- и диагенеза	Минералы катагенеза	Минералы гипергенеза
Торф, вивианит, болотные руды Кальцит (туф) Желваки лимонита на дне моря Ил с гидротроилитом	Янтарь (вымытый) Пирит	
	Кальцит	
Кальцит Гипс, каменная соль	Кальцит, сталактит, вад Гипс, псевдоморфозы по галиту Асфальт в гипсе, барит и целестин в гипсе Кристаллы полевого шпата и слюды (новообразование) Пирит, малахит, галенит (по Двие очень редко, у г. Холма)	Выцветы $MgSO_4$, KNO_3 → Источники с H_2S , $NaCl$ $CaSO_4$, $MgSO_4$ S—из источников
Слюда магнезиальная, полевошпат *, кварц, манганит	Цементация песков известковым или доломитовым цементом, манганит в остатках рыб	
	Кальцит, доломит Пирит в редких мелких кристаллах	При окислении пирита—эпсомит и гипс
Мелко рассеянный пирит Кремень с халцедоновыми ковкирециями	Кальцит, доломит, халцедон, ковкиреция лимонита, пирит Галенит Асфальт на кварце и кремне (о-в Даго, Гапсаль)	Гипс, мелантерит, эпсомит Железная охра, сера (?)
Кальцит Кремень	Кальцит, кварц Галенит (Е, F), пирит Малахит, азурит (Е—Наров)	
Кальцит Глинистый кукурсит		

гранитов и зеленых пород Фенноскандии; слюда типа бауерита, в разных стадиях изменения биотита — от золотистого до бесцветного.

III. Геохимическая таблица кембро

Восточная часть—про

В о з р а с т	Геологическая характеристика	Л и т о г е н е з	Главные химические элементы
Эхиносферитовый ярус	(Перерыв на востоке) Открытое море	Доломитовый трещиноватый известняк Верхний чечевичный слой на границе	Ca, Mg, C—O P, Fe, S
Ортоцератитовый ярус (на западе~~~~~)	Открытое море (углубление продолжается)	Трещиноватый известняк (частью доломитизированный) = так называемая петербургская плита Нижний чечевичный слой	Ca, C—O, Mg P Cu, Pb, Zn, Ba Fe
известковый Глауконитовый ярус песчанистый	Углубление моря Мелкое море	Известняк, частью доломитизированный («динарь») Глауконитовый песок и песчаник	Ca, Mg, C—O K, Si, Fe, Mg Ba, Cu, S
Диктионемовый сланец	Обмеление Углубление	Наверху — красная глинистая прослойка Битуминозный черный сланец	Ca, Mg C, N, H Fe, S
Унгулитовый песчаник (под ним так называемый пустой песчаник)	Мелкий бассейн	Наверху пиритовый песчаник Пески, песчаники с редкими глинистыми прослойками	Si Fe P, F в раковинах
Синяя глина (мощность до 170 м)	Неглубокое море размыв	Глина с редкими прослойками песков и доломитизированных песчаников, внизу галечники	Si, Al K Fe, Pb, S, C *
Кристаллическая платформа	Докембрийские породы Фенноскандинавского щита	Серый гнейс	Si, Al, K, Na Ca, Mg, Fe

Примечания: Волнистая линия — перерыв в отложениях; стрелка — наиболее важные водоносные горизонты.

* Возраст синих кронштадтских глин с конкрециями, содержащими тяжелые

силура и девоиа северо-запада России

должение табл. II

Минералы син- и диагенеза	Минералы катагенеза	Минералы гипергенеза
В верхней части изредка прослойки кукерсита Асфальт (над чечевичным слоем) Лимонитовые стяжения	Кальцит	Поглощение воды
В основании блестящие фос- фориты Чечевицы глинистого лимо- нита с 3% P_2O_5	Кальцит, доломит, углстое вещество, пирит, халькопи- рит, халькозин, галенит, сфалерит, тетраэдрит (?), ба- рит, новообразования поле- вых шпатов	Поглощение воды Малахит, азурит, медная чернь (?)
Кварц, кальцит; нефть (?) в раковине из Павловска Глауконит Пирит (изредка в нижних горизонтах) в песках—скоп- ления асфальта (Балтийский порт)	Кальцит Барит (в нижних горизонтах) Фосфат Са в скоплениях три- лобитов Новообразования полевых шпатов Самородная медь (?)	Гипс(окисление пирита) Малахит —→Осадки туфа $CaCO_3$
Пирит Кальцит, антраконит	Доломит	Гипс, мелантерит, вод- ные сульфаты окиси железа Сера самородная (?)
Слюда серицитовая Фосфорит в Obolus Гидрогетит или гидрогема- тит (?)	Пирит (чаще марказит) — в верхних горизонтах Кальцит, лимонит Цементация песков SiO_2 водн. углекисл. и глинист. цемен- том	Изменение пирита, как выше Лимонит —→Железистые осадки, H_2S
Глина, калиевая слюда, кварц Глауконит, мелкий пирит, м. б. из гидротроллита Асфальт—альбертит (Эстляндия)	Марказит (реже), пирит, ли- монит Сферосидерит, галенит, доло- мит *, сфалерит	—→Вода H_2S , $CaCO_3$, Fe_2O_3 Известковый туф —→Артезианская вода, $NaCl$
Кварц, полевой шпат, биотит, алмазиды		

металлы, проблематичен; вероятно, кембрийский.

** Мощность всего нижнего силура с иевскими и эстляндскими слонми (см. табл. II) — около 150 м.

IV. Геохимическая таблица палеозойских

В о з р а с т	Геологическая характеристика	Л и т о г е н е з	Главные химические элементы
Юра и мел см. табл. V Пермотриас ¹	Материковые прибрежные	Пестрые мергели	
Верхнекаменноугольные отложения ⁴	Гжельский ярус С ₃	Желтые доломиты Известняки Глины огнеупорные ²	Al, Si, C редко Ca, Mg, C—O
	Московский ярус С ₃	Открытое море 8—доломиты ³ 7—мягкий известняк 6—фузулиновый известняк 5—мраморовидный известняк 4—оолитовый известняк 3—известняк 2—красная глина 1—известняк	Ca, Mg, (Fe) Si, Al, Mn C—O Ni (?) Fe, P, (S)
Нижнекаменноугольные отложения	Серпуховской Продуктусовый ярус С ₂ ¹	↑ Углубление бассейна 3—серая и красная глины 2—известняк 1—известняк, стигмариевые глины	Ca, C—O (C, Fe, S) Mn, Fe, P, S
	Угленосный ярус С ₁ ¹	Заболоченные озера и топи, иногда заливаемые морем Обмеление Глины (1) Пески и песчаники (2) Угльные прослойки (3) Внизу известняки	Si, Al, Ti C, S, следы As Fe, Zn, Cu, Pb, Au Ag Mn
Девон на юге (Малевко-Муравнинский) на севере ⁵	Открытое, но замкнутое, мелкое море	Слюдистые известняки и доломиты	Al, Si, Mg, (Mn) Ca, C—O, S—O
	Мелкое море прибрежная полоса	Слюдистые глины и пески	Al, Si Fe, K

Примечания: Волнистая линия — перерывы в отложениях; стрелка — главные водоносные горизонты и источники.

¹ См. подробнее при описании области IV табл. VI. Известен только на северо-востоке области.

² Образование огнеупорных глин, вероятно, связано с постпалеозойскими материковыми процессами между верхним карбоном и юрой, тогда как вторичные скопления их могут быть отнесены к третичному времени или даже к процессам современного гипергенеза.

отложений Центральной России

Минералы син-и диагенеза	Минералы катагенеза	Минералы гипергенеза
Гипс, соль		? Соляные источники
Листочки мусковита (?) Конкреции пирита	Доломит, кварц Кальцит	Доломит Глины огнеупорные и гончарные (3)
Кремневые стяжения Доломит Кальцит	Бурый железняк (сферосидерит) Пирролюзит, гидраты Al Аллофан, аллофановиды Кальцит, доломит Кварц, аметист, дымчатый кварц, агат, кремнь, опал, хальцедон Пальгорскит (α - и β -) Ратовкит (1—3) Пирит очень редко Новообразования полевого шпата	Бераунит Бурый железняк, сферосидерит Пенистый шпат, туф известковый — → ряд водоносных горизонтов — → со свободной CO_2 — → на границе ярусов
Кремневые стяжения (?) Очень редко марказит Прослойки охры (1), уголь (1) Огнеупорные глины (1)	Бурый железняк (2), горизонты охры Кальцит, кварц, кремнь, (редко) Аметист (?) Новообразования полевого шпата	Охра — → Источники (Калужск. г.) частью железистые — → с H_2S , углеводородом и FeSO_4
Красный железняк, охра Конкр. сферосидерита Кварцевый песок Огнеупорные глины Пирит (3), марказит (2) Уголь	Боксит, гидрогематит Гидраргиллит, рутил Сидерит (2), бурый железняк Кальцит, доломит Пирит, халькопирит, галенит Сфалерит (2,3)	Мелантерит Железные квасцы, сульфаты окиси железа Гипс Самородная сера — → Несколько горизонтов
Кремнь (в нижних горизонтах)	Боксит, аллофан, гипс Бурые железняки, гидрогетит Ортоклаз, микроклин	— → Пресные воды ← — Поглощение воды
Слюда, глина Кварцевый песок		

* Наиболее типичная последовательность в 1-рубой схеме; выдерживается далеко не всюду и со значительно более сложной и многообразной перемежаемостью горизонтов различного петрографического состава.

Цифры в графе литогенеза совпадают с аналогичными значками в скобках в последующих графах для указания, что данный минерал приурочен именно к данной породе.

* Вся толща карбонатных пород под Москвой около 460 м.

* У Вышнего Волочка ниже глауконитовый известняк силура.

V. Геохимическая таблица мезозойских ■

Возраст		Геологическая характеристика	Литогеоцез	Главные химические элементы	
Послеледниковый		Почвообразование Размыв	Торфяники Подзолистые почвы Пески безвалунные Суглинки, делювий	C, Fe, P, S Si, Mn	
Ледниковый		Размыв	Моренные пески, валуны, межледниковые отложения	Si, Al	
М е л ¹ Верхневолевские слои	В. турон	Залив моря	Опоки	H, C, N, O, F, Na, Mg, Ca, K, Al, Si, P, S, Fe, Mn, следы As и Cu	P — P, K — P, K — P, K Ba, P Ba, Fe Fe, P, C
	Гольт, апт	Материковые и прибрежные образования	Опоки Железистые песчаники		
	Неоком		Слюдистые черные глыны, реже пески		
	(Рязанский)	Частью прибрежные, частью мелководные отложения плоского моря с многочисленными перерывами и фацialsными изменениями	Мергелистые и железистые глауконитовые пески и песчаники		
	Аквилон		Слюдистые черные глыны и мергели, часто песчаные В основании келловеев — галька кремней карбона В основании портланда — глауконитовые пески В среднем и верхнем келловее — лепные глыны		
	Портланд				
	Кимеридж (часто размыт)				
	Секван				
	Оксфорд				
	Келловей				
Пестрые пермские мергели или верхний карбон		См. табл. IV и VI			

Примечания: Волнистая линия — перерыв в отложениях; стрелка — главные водоносные горизонты.

¹ Мощность мела до 75 м, юры до 25 м.

² Глянцевый фосфорит находится во вторичном залегании и генетически должен

последних отложений Центральной России

Минералы сип- и диагенеза		Минералы катагенеза	Минералы гипергенеза
Вивианит Опаловое вещество в подзолах Лимонит в орштейне Болотные и дерновые руды Сапропель в озерах			Бераунит Фульгурит Известковый туф
Торф, глина В песках — магнетит, гранат, золото		—	→ железистые ключи с CaSO_4
Битуминозные и слоистые глины, пески кварцевые; конкреции и кристаллы пирита, стигмения сферосидерита, лимонита и фосфорита, глауконит, бурый уголь, бобовые руды	Гидрат SiO_2		Источники с H_2S , FeCO_3 , FeSO_4 , CaSO_4 , H_2S , SO_2 , гипс, мелантерит, водные сульфаты окиси железа, дендриты марганца Превращение фосфорита в штаффелит; вивианит на фосфоритах
	Фосфорит		
	Фосфорит глянцевый глауконит	Кальцит	
	Фосфорит, глауконит	Цемент кварца в песчанике	
	 прослойки фосфорита	Гипс, кальцит	
	² Фосфорит глянцевый, глауконит	Кальцит	
	Фосфорит матовый Барит	Барит, гипс, кальцит	
	Барит в септариях сферосидерита		
	Фосфорит Оолиты, лимонит Остатки древесины	Гипс	

быть связан с более древними горизонтами.

² Нижние горизонты этой серии в Рязанской губ., может быть, принадлежат бату. Часть гжельских глин может быть отнесена к этой же эпохе (?).

VI. Геохимическая таблица западной

Возраст	Геологическая характеристика	Литогенез	Главные химические элементы
Современная эпоха	Речной аллювий	Чернозем, торф Валуны лёссовидные глины и пески	Fe, Mn, P,
Постплиоценовая	Пресноводные бассейны	Пресноводные отложения (глины, пески и руды железные)	Si, C, Fe
Третичная (акчагыл)	Образования Жигулей Морская трансгрессия	Пески и глины	C
Мел (неоком)	Береговые и мелководноморские образования	Серые и черные глины, пески, мергели, оолиты, горючие сланцы, огнеупорные глины в основании	P, S, C, (F)
Юра (бат-аквилон)			Si, Al Fe, Ba, K
(Триас) P + T Татарский ярус (пестрые мергели P ₃)	Пресноводные, мелководные и материковые отложения	Пестрые мергели — рухляки с прослойками песчаников, известняков и гипсов, пески, опоки	P, Cl (?) C—O, S—O Fe, Ca, (Mg)
Пермские отложения	б) кониферовый (гастроподовый) Казанский ярус P ₂ а) брахиоподовый Углубление Обь-Иртышского бассейна Замкнутый морской бассейн	Известняки (частью кремнистые, частью воюющие) ⁴ Доломиты (иногда оолитовые или битуминозные) Гипс (ОК, КТ) К востоку сменяются песчаниками	Mg, Ca, (Fe) Si, C, S C—O, S—O Sr, Ba (Ni, Cu)
		Мелкие бассейны или перерыв местный	Мергели, глины, песчаники (Ж)
		Морской бассейн с повышенной соленостью	Доломит Ангидрит и гипс (песчаных пород мало)
	3 = уфимскому ярусу P ₁ = кунгурскому Пермояркен PС (= артинскому)		Ca, Mg C—O, S—O Cl, C Si, K ?
1 Верхний карбон C ³	Неглубокое, во открытом море	Доломит глинистый, кремнистый и железистый Известняк плотный пористый	Ca, Mg Si, C—O S—O (?) C

Примечания: Стрелками обозначены: водоносные горизонты и источники; волнистой линией — перерывы в напластованиях; >< — наиболее крупные тектонические нарушения. Сокращения: Вятско-Камский район — ВК; Окско-Клязьминский район — ОК; Казань-Тетюшский район — КТ; Жигули — Ж.

¹ См. подробнее при описании области III.

² Кунгурский и артинский ярусы представляют скорее фациальные, чем хронологические различия.

части пермского моря и суши

Минералы син- и диагенеза	Минералы катагенеза	Минералы гипергенеза
Болотные руды Пирит на обугленной древесине	Вивиянит Журавички (известковые конкреции) Розы гипса Огнеупорные глины с сидеритом (ВК)	Бераунит Пресноводные туфы из ключей
Остатки бурого угля Битуминозные скопления	—	— $\rightarrow$ с CaCO_3 , CO_2
Фосфорит Пирит, глауконит Сферосидерит Углистые вещества, битуминозные сланцы (?)	Барит (ОК, в бате Ж) Асфальт (Ж)	Гипс, мелантерит, квасцы, фельсобанит (Ж) $\rightarrow$ железистые воды Растворы сульфатов железа
Гипс Углистые прослойки Костеносные слои (галки кремня, агата, порфира)	Палыгорскит Песчаники с асфальтом по р. Унже (превращены в рудные слои ОК)	Соль (?) в скважинах и источниках Костромской губ.
Доломит Кальцит Гипс Ангидрит (ОК, Ж) Кремень (агатный)	Кальцит, кальцинирование доломитов Доломит, доломитизация известняков Гипс (из ангидрита) Пирит (редкий) в известняке Кварц, халцедон, кремень, агат β -палыгорскит Сера, асфальт, нефть, гулрон в песчаниках Целестин (К, Ж), барит Остаточные глины с образ. сферосидерита с прослойками угля и пиритом (ОК)	Инфильтрация растворов с Fe и S Мелантерит (Т), эпсомит (Ж) Сероводород (Т), сера (Т) Кварц, халцедон, опал Лимонит по пириту и сферосидериту β -палыгорскит Стронцианит $\rightarrow$ с CaSO_4 , NaCl , H_2S (Сергиевские воды)
Конкрекции кремня (Ж) Ангидрит, гипс Соль Глауконит (?)	Кальцит, доломит, кварц Асфальт Остаточные глины при материковом выветривании (ОК)	$\rightarrow$ пресные воды ? $\rightarrow$ воды с NaCl
Кальцит, доломит Желваки кремня (ОК) Гипс [Балахна (?)]	Огнеупорные глины (ОК) Доломитизация и кальцинирование Окремнение, кварц Асфальт (Ж)	Доломит мучнистый Эпсомит Пирит в асфальте

³ Вопрос о параллелизации уфимского яруса (см. таблицу VII) с отложениями западной части бассейна представляется не вполне решенным. Значительное число фактов говорят за перерыв отложений в западной части, захватывающий или только уфимские отложения (Самарская Лука), или же и пермокарбон (по Шешме и Соку)

⁴ Вокругие известняки Арзамасского уезда Нижегородской губ.

⁵ Посередине между конхиформным и брахиоподовым горизонтами в Казани М. Э. Нойвский отмечает песчаниковую прослойку с углем и колчеданом.

VII. Геохимическая таблица восточной части

Возраст	Геологическая характеристика	Литогенез	Главные химические элементы
Современная эпоха	Почвообразование	Чернозем, торф Аллювий речной	C, P
Последледниковые образования	Речные наносы	Россыпи (золотоносные на Урале)	Fe, Au, Pt (отчасти)
Постплиоценовые образования	Флювиогляциальные образования	Пески, валуны, глины ледниковые	
	Озерные образования	Пески постплиоценовых бассейнов	
~~ P + T Ирус пестрых мергелей P ₂ Татарский ярус	Пресноводные, мелководные и материковые отложения	Конгломераты Пестрые мергели (рухляки) Переслаивание с песчаниками Внизу с доломитами, гипсами и известняками	Si, C — O Ca, Mg, (Fe) P, C S — O
Пермские отложения Бурая и серая толща P ₂ (синхр. казанскому ярусу ?)	Прибрежные и материковые образования	Серые и бурые песчаники и мергели (Прослойки серых известняков) Конгломераты	Si Ca, C — O
(Красноцветная толща) Уфимский ярус P ₁	Прибрежные, пресноводные и частью материковые образования, может быть, пустынного типа	в) Серые песчаники и конгломераты медистые песчаники б) Красные глинистые песчаники, гипс, соль, битуминозные сланцы	Cu, V, S Cr, Mn, Ca Ba Si, C
(Мергелисто-песчаная толща)	(Слабо изогнуты)	а) Пестрые известковые мергели, песчаники и глины	Ca, Mg, Na Cl, S — O

пермского моря и суши — Приуралья

Минералы син- и диагенеза	Минералы катагенеза	Минералы гипергенеза
Вивианит		Солонцы (Мензелинский уезд)
Углистые прослойки Кости ящеров, скопления гипса ¹	Выщелачивание гипса и перенос его в нижние горизонты Палыгорскит (?) Гипс	Замещение рудными слоями (Fe) в Вятской губ. см. табл. VI → Ряд неправильных водоносных горизонтов
↑ ↑	Гипс (очень редко) Конкреции с кристаллами кальцита	→ } Ряд неправильных водоносных горизонтов →
Медные соединения в разных горизонтах (куприт, халькозин, халькопирит) Волконскоит Цирит в угле Вонючие известняки Гипс, соль (илецкая ?)	Фольбортит Палыгорскит (в жильных проявлениях) Кварц в полостях омертвевшего дерева Конкреции и жилы кальцита Лимонит, красная охра Гипс	Малахит, азурит, самородная медь Дендриты марганца Перекристаллизация и размывание гипса → источники с NaCl, H ₂ S → выделение S самородной

Возраст	Геологическая характеристика	Литогеогео	Главные химические элементы
Пермоярбон	Кунгурский ярус	Морской залив (более замкнутое море)	Доломиты, известняки (мергелистые), ангидрит, гипс C—O, S—O Ca, Mg Na, Cl
	Артинский ярус	Прибрежная полоса вдоль о-ва Урала и о-ва Уфимского нагорья	Мергели, глины, гипс, соль Песчаники, конгломераты Изредка прослойки известняка Na, Cl, Br, (K) Fe, Ca, Mg Si, C, C—O Ba, Sr
	C ³ (Частично) ~~~~~	Открытое море	Известняки и доломиты Ca, Mg, (Fe) C—O
	C ² (Московский ярус)	(частью геосинклиналь)	Известняк (частью кремнистый) Si
Карбон	Нижний отдел C ¹	Мелкие бассейны Прибрежные, частью материковые образования	Известняк, доломит Глинистый песчаник с углем Ca, Mg, C—O Fe, S, C

Примечания: >< — периоды крупных тектонических процессов, складчатости или сбросов, имеющих значение для геохимии (в данном случае конечная фаза горообразования приходится на середину артинского времени); волнистая линия — перерыв в напластовании; стрелки — главнейшие водоносные горизонты и источники; C—O, S—O обозначают кислородные соединения углерода и серы, в противоположность C и S, отвечающим скоплениям угля (или углеводородов) и серы в металлическом или сульфидном виде. Двухконечная стрелка в вертикальном направлении обозначает приуроченность какого-либо соединения (в данном случае медных) к различным выше- и нижележащим горизонтам.

Продолжение

Минералы сп- и диагенеза	Минералы катагенеза	Минералы гипергенеза
Доломит Октаэдры пирита Соль, гипс, ангидрит Геох	Лимонитизация известняков (Урал) Перекристаллизация гипса (селенит) Палыгорскит, кремень — Псевдоморфозы глины по соли химическая граница	Лед (в пещерах) → с NaCl, H ₂ S, S (Соликамск ?) неясна ³
Соль, гипс, пирит Конкреции сферосидерита Обугленные растения Глауконит	Жилы кальцита и кварца — в карбонатных породах Окремнение песчаников в кварциты (точильный камень) Барит в септариях и аммонитах	→ NaCl, H ₂ S Кальцит в трещинах Дендриты марганца Кварц, кремень Лимонитизация сферосидеритов
(Иногда вонючий известняк) Кремень, кварц	Лимонитизация известняков Накопление остаточной белой глины и песку Углистый сланец Уфимского плато	
Сферосидериты Уголь, пирит	Лимонитизация карбонатных пород	Лимонитизация известняков (на поверхности)

¹ Медные руды отмечаются П. И. Кротовым в Уржумском районе среди пестрых мергелей.

³ Граница между артинским и кунгурским ярусами скорее носит характер горизонтального изменения фации, чем хронологической последовательности.

³ В таблице есть ряд неясностей благодаря трудности параллелизовать отложения разных районов. Хронологическая последовательность переплетается с фациальными изменениями в горизонтальном направлении и далеко не всегда может быть отличена от последней.

УКАЗАТЕЛЬ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

- Азот 38, 44, 45, 52, 58, 63, 110, 137, 160
Алюминий 52, 53, 57, 61, 63, 83, 99,
110, 131, 136, 137, 161
Аргон см. благородные газы
Барий 52, 53, 56—58, 60, 62, 82, 85, 108,
113, 136, 138, 151, 158, 168, 169
Бериллий 52, 53, 57, 58, 61
Благородные газы 53, 58
Бор 52, 53, 58, 82, 90, 101
Бром 53, 58, 60, 109, 113, 168
Ванадий
Висмут 53, 57, 58, 60, 63
Водород 45, 52, 53, 58, 63, 82, 98, 109,
128, 136, 158
Вольфрам 53, 54, 58, 63
Гелий 57, 58
Индий 58
Иод 53, 58, 95, 136
Иридий 58, 62
Иттрий 53, 56, 58, 98, 100
Кадмий 53, 57, 58
Калий 38, 46, 52, 53, 57, 58, 63, 83, 95,
98, 100, 111, 117, 132, 136, 138,
151, 163
Кальций 45, 48, 52, 53, 57, 58, 61,
63, 80, 83, 98, 100, 112, 132, 136,
138, 164
Кислород 52—54, 58, 63, 82, 99, 110,
129, 137, 160
Кобальт 53, 58, 62, 82, 85, 157
Кремний 52, 53, 58, 63, 83, 99, 110, 131,
137, 162, 173
Криптон см. благородные газы
Ксенон см. благородные газы
Литий 52, 53, 58, 101
Магний 45, 52, 53, 58, 61, 63, 80, 83,
98—100, 110, 130, 137, 160
Марганец 45, 52, 53, 57, 58, 84, 93, 94,
100, 102, 112, 121, 128, 132, 136, 138,
157, 165
Медь 53, 55, 56, 58, 60—63, 82, 85, 90,
92, 100, 112, 118, 120, 133, 136, 138,
142, 157, 166, 167, 169
Молибден 53, 58, 85
Мышьяк 53, 57, 58, 60, 63, 85, 133, 136,
138, 167
Натрий 45, 52, 53, 58, 60—62, 83, 98, 99,
102, 108, 114, 129, 136, 137, 160
Никель 53, 58, 62, 63, 82, 85, 121, 133, 157
Ниобий 53, 57, 58, 86
Олово 53, 58, 60, 63, 169
Осмий 58
Палладий 58, 62
Платина 53, 58
Радий и радиоактивные элементы 28, 57,
58
Редкие земли 53, 58
Родий 58
Ртуть 53, 58, 63
Рубидий 53, 57, 58
Рутений 58, 62
Свинец 58, 60, 63, 82, 85, 86, 92, 113,
134, 142, 158
Селен 53, 58, 167
Сера 45, 47, 52, 53, 57, 58, 63, 83,
90, 92, 99, 108, 111, 132, 136, 138,
142, 162
Серебро 53, 57, 58, 60, 63, 80, 85, 113,
157
Стронций 53, 54, 56, 58, 60, 62, 85, 113,
128, 158, 168
Сурьма 53, 56—58, 82, 157
Таллий 53, 58
Тантал 53, 57, 58, 86, 98, 100
Теллур 53, 57, 58
Титан 52, 53, 60, 83, 90, 98, 100, 101,
102, 112, 132, 141, 157, 164
Торий 53, 57, 58, 86
Углерод 25, 45, 52, 53, 57, 58, 63, 82,
98, 108, 109, 135, 136, 158, 159
Уран 57, 58, 63
Фосфор 27, 45, 52, 53, 57, 58, 90, 99,
111, 128, 131, 138, 148, 149, 151, 157,
162
Фтор 27, 42, 52, 53, 57, 58, 83, 90, 99,
101, 110, 128, 129, 137, 143, 149, 157,
160
Хлор 45, 52, 53, 58, 62, 63, 83, 98, 100,
108, 109, 111, 132, 136, 138, 163
Хром 53, 58, 61—63, 157, 164, 169
Цезий 57, 58
Цинк 53, 55, 57, 58, 60, 63, 82, 85, 92,
108
Цирконий 52, 56, 57, 58, 62

УКАЗАТЕЛЬ МИНЕРАЛОВ И ГОРНЫХ ПОРОД

(исключительно к специальной части)

Сокращения: гн.—гнейс; ж.—жйла; ист.—источник; п.—порода; р.—руда; сл.—сланец

- Авгит 81
 Агат 127, 145, 157
 Азурит 112, 119, 157, 167
 Акинит 82, 85
 Актинолит 81, 88
 Алебастр 156, 173, 178
 Аллофан 127, 140, 147, 150
 Аллофановиды 127, 140, 146, 147, 150
 Альбит 89, 97, 111
 Альм 112
 Альмандин 81
 Аметист 81, 82, 87, 90, 92, 127, 145
 Аммиак 117
 Амфиболит 78, 88, 89, 90
 Амфиболовый гн. 78
 — сланец 78, 96
 Анальцим 97
 Ангидрит 157, 162, 168, 171, 172
 Андалузит 81, 87
 Андалузит-ставролитовая п. 78
 Андалузитовый сл. 78
 Аврадит 81
 Анкерит 127
 Анортозит 82
 Анортоклаз 111, 148
 Автофиллит 81, 97
 Антраконит 110, 117, 168
 Антракосилит 91
 Антрацит 108, 109
 Апатит 81, 83, 89, 99, 129
 Аплит 78, 95
 Аюфиллит 82
 Арагонит 127, 157
 Арсенопирит 80, 85, 167
 Арфведсонит 97, 101, 102
 Аспидный сл. 81
 Астрофилит 99, 100
 Асфальт 108, 109, 118, 120, 156—159, 163, 171, 174, 180
 Базаномелан 97
 Барит 77, 81, 84, 87, 92, 107, 112, 113, 118, 120, 135, 139, 149, 157, 168
 Бауерит 120
 Беломорская рогулька 81
 Бераунит 127, 135, 136, 174
 Бикарбонат кальция 116
 Биотит 82, 88, 89, 97, 120
 Битуминозный сл. 110, 156, 157, 180
 Битумы 118, 158, 159, 160, 173, 180
 Блеклая р. 80, 157
 Бобовая р. 107, 135, 165
 Богхед 128, 140, 141
 Боксит 127, 128, 131, 132
 Болотная р. 111, 112, 138, 150, 162, 165, 166
 Борнит 80, 90
 Бурый железняк 105, 127, 139, 140, 162
 Вад 112
 Вивинит 108, 111, 121, 135, 150, 157, 161
 Волконскоит 157, 158, 164, 165, 171
 Габбро 79, 90
 Гагат 159
 Гажа 112, 121
 Гейлоссит 81
 Галенит 80, 85, 92, 107, 115, 118, 119, 120
 Галит 107, 110, 157
 Гардбургит 90
 Гематит 80, 81, 147
 Гетит 80, 81, 147
 Гидраргиллит 127, 141
 Гидрат глинозема 145, 147, 150
 — железа 107, 110, 112, 115
 — кремнезема 135, 145, 147
 — марганца 115, 127
 — сернистого железа 142
 Гидрогематит 116, 127, 141
 Гидрогетит 127, 139, 147
 Гидроокись железа 115
 — марганца 115, 127
 Гидротроилит 115
 Гиперстен 97
 Гиперстен — кордиеритовый роговик 97
 Гипс 81, 107, 109, 112—114, 117, 120, 122, 127, 135, 138, 139, 156, 159, 161, 162, 164, 168, 171, 173, 174, 177, 178, 180
 Глауберова соль 157
 Глауконит 80, 107, 110, 111, 112, 113, 115, 117, 118, 122, 135, 137, 138, 147, 148, 157, 164, 171, 174
 Глина 106, 110, 119, 125, 128, 129, 130, 136, 138, 139, 144, 146, 147, 150, 161, 162, 174
 Глина гончарная 127, 135, 141
 — квасцовая 137, 140, 141
 — огнеупорная 127, 132, 139, 141, 143, 148, 157, 164, 166, 170, 175, 179, 180
 — синяя 105, 111—115, 122
 — керамическая 179
 Глинисто-углистая толща 78
 Глинистый сл. 87, 90, 96, 101
 Гнейс — см. соотв. назв.
 Горная кожа, см. Палыгорскит
 — пробка, см. Палыгорскит
 Горнфельс 96
 Горный хрусталь 99
 Горькая соль 173
 Горючий сл. 119, 159
 Гранат 82, 87—89, 115, см. также Гроссуляр Альмандин
 Гранат известково-железистый 90
 Гранатовая п. 78
 Гранатовый амфиболит 90
 — гн. 78
 — сл. 78
 Гранит 75, 77, 78, 84, 87, 89—91, 95, 105, 115
 Гранитогаейс 75, 84, 87, 90, 105, 115
 Графит 82
 Графитовый сл. 89

- Грахамит 109
Гроссуляр 81
Гуминовая кислота 175, 177
Гуминовые соединения 94
Гумус 99, 102, 179
- Дерновая р. 135, 150
Диабаз 78, 83, 84, 87, 90, 92, 96
Диаспор 127
Диорит 79, 83, 84, 87, 90—92
Дистен 83, 88
Доломит 78, 79, 81, 87, 91, 105, 107, 110, 112—114, 116, 117, 119, 120, 126, 128—130, 132, 139, 143, 145—147, 150, 156, 157, 159, 160, 162, 170, 172, 176, 177, 180
Доломитовая мука 170
Друзит 79, 84, 87, 90
Дунит 79
- Железистая конкреция 116
Железная р. 132, 145, 147, 155, 162, 170, 172, 175, 179
Железный купорос 149
Железник см. соотв. назв.
Железо-марганцевая конкреция 110, 121
Жемчуг 81
Жерновой песчаник 136
- Заратит 165
Зеленокаменная п. 76, 78, 89
Земля черная олонеккая 82
Змеевик 87, 97
Золото 80, 90, 133, 135, 136
- Известковая п. 79
Известковый туф 107, 117, 127, 135
— шпат 127, 135
Известняк 76, 91, 105, 107, 110, 112, 118, 119, 125, 127—131, 133, 135, 139, 140, 143, 145—147, 153, 154, 156, 158, 159, 162, 164, 166, 170, 173, 175, 178, 180
Ильменит 80, 97, 99, 100, 101, 132
Имандрит 97
Иолит 96, 101
- Калиевая селитра 107, 110
— слюда см. Мусковит
Калий хлористый 122
Кальций сернокислый 122, 172
— углекислый см. Кальцит
— хлористый 122
Кальцит 81, 90, 92, 97, 107, 110, 112, 117, 118, 119, 127, 133, 135, 137, 143, 145, 157, 170
Каменный уголь 157, 159
Камень горшечный 78
— точильный 79
Кавкринит 97, 99
Каолин см. Глины
Каолинит 141
Карбонат кальция см. Кальцит
— магнезия 107, 109
— меди 107
Кварц 79, 81, 88, 89, 91, 92, 97—99, 102, 107, 111, 115, 116, 119, 135, 137, 143, 145, 148, 157, 174
— дымчатый 90, 127
Кварцевая ж. 80, 82, 84, 85, 87, 90
Кварцит 76, 79, 80, 84, 90, 91, 96
Квасцы 107, 110, 157
Кеннель 140
Кианит 81, 82, 89
Кир 159
Киричная медная р. 80, 157
Кнопит 97
Ковеллин 80
Колчедан 107, 111, 113, 117, 120, 122, 127, 133, 135—138, 140, 142, 148, 157, 165, 167, 172, 179
— медный 80, 100
Конгломераты 144, 148
Кордиерит 81, 97
Кордиеритовый сл. 78
Корунд 80, 83
Красный железняк 142
Кремень 111, 119, 122, 127, 128, 131, 142, 144, 145, 148, 162, 165, 170—172
Кремневая кислота 176
Кремнезем 110—112, 131, 143, 172
Кремнистый сл. 78, 87
Кривозерит 79
Кристаллические сл. 78, 87
Крокоит 81, 82
Кукерсит 107, 108, 109, 111, 119
Куприт 157
- Лабрадор 81
Лабрадорит 79
Лабрадоритовая п. 83
Лабрадорпорфирит хлоритизированный 97
Лампрофиллит 97, 100, 101
Лампрофиллитовый лувирит 101
Латерит 129, 176
Лед 81, 157, 158, 178
Лидит 81
Лимонит 81, 117, 127, 135, 150, 157, 166, 180
Ловенит 97, 100
Лопарит 97, 100
Лувирит 96, 101
Лярдит 147
- Магнезит 177
Магнетит 80, 84, 89, 91, 97, 100, 136
Магнитный железняк 93
Малахит 112, 113, 119, 157, 167
Манганит 107
Марганцево-железистые дендриты 165
Марганцево-железистые конкреции 94, 95
Марганцевые окислы 110, 114, 127
Марказит 106, 116, 127, 135, 138, 140, 157
Медная зелень 112
— углекислая соль 81
— чернь 112, 157
Медные окислы 118
Медный блеск 157
Медь 80, 156
Мелантерит 81, 117, 135, 138, 149, 157, 163
Мергель 105, 115, 119, 120, 122, 130, 139, 143, 144, 148, 153, 154, 156, 160, 174, 177, 179
— доломитовый 119, 120, 130, 145
Метабазит 79, 87, 90

- Метан 109
 Микроклин 82, 97, 111, 127, 139, 147
 Минеральные воды 113, 114, 174
 Мозандрит 97, 98, 100
 Молибденит 80, 85
 Мопчикит 96, 99, 101
 Мрамор 77, 81, 90, 127, 147
 Мусковит 82, 89, 127
 Мыльник 162
- Натрий хлористый 114, 122, 174
 Натролит 97
 Нефелин 97, 101, 102
 Нефть 72, 156—160, 163, 171
 Никелевый карбонат 166
 Нозеан 97, 99
 Норит 79, 90
- Озерная руда 112
 Окислы железа 107, 116, 127, 135, 138, 149
 Оливин 81, 90, 97
 Оливино-актинолитовая кремнистая п. 97
 Оливиновый диабаз 79
 Олигоклаз 89
 Онегит 80, 81, 90
 Оолит 127, 135, 138
 Опал 131, 157
 Ошока 131
 Ортоклаз 89, 97, 111, 127
 Орштейн 112, 135, 136, 139, 150, 175
 Охра 127, 141, 147
 — железистая 119
- Пальгорскит 82, 127, 130, 131, 145—147, 150, 157, 161, 166, 173, 176, 177, 180
 Паргасит 81
 Пегматит 78, 81, 83, 87, 89, 90, 92, 95, 96, 100, 102
 Песистый шпат 145
 Перидотит 79, 90
 Перовскит 97, 100
 Песок 105, 107, 111, 112, 115, 116, 119, 120, 122, 125, 134, 135—137, 139, 140, 148, 154, 162, 166, 178, 180
 Песчаник 79, 87, 90, 102, 105, 110, 111, 113, 115, 116, 120, 125, 131, 153, 156, 159, 162, 164, 166, 178, 180
 — гипсовый 164
 — медистый 167
 Пирит 110, 112, 117, 119, 121, 127, 133, 139, 166
 Пироксен 81
 — титановый 90, 97
 Пироксенит 92
 Пироксеновая п. 89
 Пироклор 97, 100
 Пирротин 80, 85, 90
 Плавниковый шпат 83, 92, 101, 129
 Плагиоклаз 81, 82, 90, 99, 100
 Плагиоклазовая п. 89
 Плита 167
 Подзолы 112, 135, 136, 137
 Полевой шпат 79, 87, 97, 99, 101, 102, 112, 115, 120, 139, 145, 147
 Полевошпатовая ж. 89
 Полуопал 127, 145
- Рапакиви 89
 Ратовкит 127, 128, 131, 137, 143, 145, 147
 Роговая обманка 81, 85
 Роговообманковый сл. 87
 Рутил 81, 137, 141
 Рухляк 156
- Самородная сера 117, 127, 173
 Самородное серебро 92
 Сапропель 109, 115, 121, 135
 Свинцовый блеск 82, 113, 114
 Селепит 172, 178
 Септария 135
 Сера 107, 111, 120, 141, 156, 173
 Сердолик 127
 Серебро 80, 90, 92
 Серпичитовый сл. 78
 Серная кислота 135, 149
 Сероводород 107, 109, 111, 117, 122, 135, 146, 149, 156, 163
 Серпентин 81
 Сиецит эфеолитовый 96, 99
 Сидерит 142, 157
 Силлиманит 81, 88, 97
 Силлиманитовый гн. 97
 — сланец 78
 Сильвин 157
 Сильвинит 164
 Скаполит 81, 83, 87, 88
 Скаполитовая п. 79, 89
 Сланец — см. соотв. назв.
 Слюда 84, 87, 120, 135, 139, 157
 — калиевая см. Мусковит
 Слюдяной гн. 79
 — сланец 78
 Содалит 97, 100
 Соль см. Галит
 — азотно-кислая 110
 — калиевая 178
 — каменная 107, 111, 120, 160
 — углекислая медная 81
 Ставролит 81, 87
 Стеатит 81
 Стронцианит 81, 157, 168
 Стронцианокальцит 81
 Суглинок 125
 Сульфат глинозема 137
 — меди 112
 — окиси железа 107, 127
 Сфалерит 80, 91, 107, 112, 114, 115, 118, 133
 Сфен 97, 100
 Сферосидерит 114, 115, 118, 127, 134, 135, 141, 142, 149, 157, 165, 166, 175, 180
- Тавит 96
 Талоконка 176
 Тальк 81, 87
 Тальково-хлоритовый сл. 78
 Тальковый сл. 78, 87
 Тералит 96, 101
 Тегга rossa 129
 Тетраэдрит 157
 Тингуаит 96, 101
 Титанат 97
 Титановая роговая обманка 100
 Титаномagnetит 80, 84

Титаносиликат 97
 Тимсонит 97
 Торф 107, 109, 121, 141
 Травертин 174
 Тремолит 80, 97
 Трепел 107, 122
 Турмалин 82, 89
 Туф 112, 114, 135, 157, 159, 166, 174
 Уваровит 165
 Угледороды 109, 158, 172
 Углекислота 129, 146, 149, 150
 Углисто-глинистый сл. 156, 157, 159
 Углистый сл. 109, 130, 159
 Уголь 109, 116, 118, 122, 128, 139, 140, 143, 157, 170
 — бурый 108, 109, 122, 128, 135, 157
 — курный 140
 Уралит 83, 89
 Уртит 96
 Фельсобаниит 157
 Ферросиликаты 127
 Филлит 78
 Флогопит 79
 Флюорит 80, 82, 87, 92, 97, 99
 Фольбортит 164, 167, 168
 Фосфорит 108, 111, 122, 131, 135, 137, 138, 148, 149, 157, 160
 Франколит 137
 Фторапатит 97, 110, 116, 129, 135, 137
 Фузит 82
 Халцедон 111, 119, 127, 157
 Халькозин 80, 90, 157, 167
 Халькопирит 80, 90, 99, 107, 112, 122, 133, 157, 167
 Хиастолитовый сл. 78
 Хибинит 96

Хлорит 81, 83, 90, 97
 Хлоритовый сл. 78, 87, 96
 Хлорито-гальковый сл. 78
 Холмогорит 157, 161
 Хромистый железняк 165
 Целестин 107, 157, 162
 Цемент кремневый аморфный 111
 Цеолит 98, 101
 Цинк серпистый 122, 142
 Цинковая обманка 133
 Циркон 80, 96, 100, 101
 Цирконосиликат 97, 100
 Цитрин 81, 89
 Цоизит 81
 Цоизитовая п. 79
 Чечевичный слой 112
 Шаявский 127, 147
 Шерл 90
 Шпат — см. соотв. назв.
 Шпинель 97
 Штаффелит 135, 137
 Шунгит 77, 91
 Эвдиалит 97, 99, 100, 101
 Эвдиалитовый луаврит 101
 Эвколит 97, 101
 Эгирин 97, 102
 Эгирин-эзолиит-апатитовая п. 99
 Эзолиит 98, 99, 101
 Эзолиит-сиенитовая п. 96
 Эпигматит 97, 99, 100, 101
 Эпидиорит 79
 Эпидот 81, 82, 83, 89, 97
 Эпсомит 157
 Янтарь 108, 122
 Яшма 81

УКАЗАТЕЛЬ ГЛАВНЕЙШИХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ И ГЕОХИМИЧЕСКИХ ТЕРМИНОВ

Алтаиды 72, 73
 Альпийская система 72
 Ангарский шит 71, 73, 75
 Архейский шит 78
 Ассоциация естественная геохимическая 64, 150
 — естественная минеральная 17, 26
 — типическая геохимическая 58
 Атмосфера 21, 25, 29, 37—40, 55
 Базальтовая постель 24
 Биолит 29
 Биосфера 24, 25, 38, 39, 54, 57, 128
 Биохимические образования 37, 146
 Бокситизация 141
 Болота 41, 45, 94
 Вода подземная 41, 45
 Возраст минерала 26, 27
 Вулканическая деятельность 24, 28, 29, 41
 Выветривание см. Гипергенез
 Выщелачивание см. Гипергенез

Генерация 17
 Генетический тип 18, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 32, 86, 102, 114
 — цикл 18, 26, 28, 29, 40, 42, 45, 78, 88, 115, 144, 170
 Геосинклиналь 73, 178
 Геохимическая ассоциация см. Ассоциация
 — диаграмма 23, 84, 112
 — пара 40
 Геохимический процесс 19, 21, 22, 25, 27, 43
 Геохимия 28, 30, 56, 67
 Гердинская складчатость 27
 Гидатометаморфизм 87
 Гидросфера 25, 55
 Гидротермальная деятельность 22, 26, 32, 42
 Гидротермальное выделение 21, 33
 Гипергенез 21, 38, 39, 46, 87, 114, 120, 127, 147, 169
 — древний 39, 40, 145

- Глубинный метаморфизм давления 127
Горобразующий процесс 42, 126, 178
- Делювий 75
Деятельность льда 41
Диагенез 21, 37, 38, 39, 114, 117, 145, 169
Диагенетическое образование 27
Динамометаморфизм 79
Дислокация 27, 28, 92
— дизъюнктивная 35, 41, 42, 92, 114, 123
— пликтивная 41, 143
Дифференциация 101
Доломитизация 110, 145, 146
- Железисто-марганцевые конкреции 93
Жила альпийского типа 21, 23, 34
— гидротермальная 18, 34, 36
— метасоматическая 34, 35
— пегматитовая 21, 33, 34, 89, 92, 102
— рудная 24, 31, 34, 92, 169
- Закон Оствальда 18, 24, 26, 29, 32
Зона анаморфизма 23, 24
— магматическая 24, 26
— цементации 23, 24, 55
Зоны земной коры 18, 23, 25, 35
- Кальцитизация 145, 147
Каолинизация 145
Катагенез 18, 21, 23, 37, 38, 39, 40, 87, 114, 118, 120, 127, 135, 147, 150, 169
— перерыва 46
Катаморфизм 24, 38
Кислородная поверхность 129, 137
Климатический режим 43
Коллоидальное состояние материи 25
Контакт 21, 31, 36, 42, 87
Континентальный перерыв 125
- Лакколит 27, 77, 93, 101
Ледник 88, 93, 102, 106, 154, 155
Литосфера 25, 38, 43
Лучи солнца 25, 29
- Магма 21, 23, 26, 30, 31, 36, 42
Магматический процесс 18, 26, 33, 40
Марганцево-железистые конкреции 95
Месторождение 30, 36, 56, 90
Метаморфизм 31, 88
— геотермический 43
— давления 43, 87
— глубинный 38
— инъекции 87
— контакта см. Контакт
— мигматизации 87
— региональный 21
Метеориты 29
Мигматизация 21, 87, 95
Миграция 6, 70, 160
Микрокосмическая смесь 64
Минералогия 21, 28, 30
— генетическая 20, 30, 42
Минералы 20, 22, 26, 31, 37, 38, 97
Минералообразовательный процесс 23, 26, 28, 31, 38, 39, 42, 93, 136
- Минеральная ассоциация 31, 33
Мутабельное соединение 25, 39
- Озера 21, 31, 37, 41, 45, 77, 93, 106, 108, 140
Океан 46, 73, 76
Окремнение 145, 172
Органический мир 25, 28, 41, 47
Орография 106, 155
- Пальгорскитизация 145, 146
Парагенезис 17, 26
Перемещение береговой линии 46
— регрессивное 46, 122, 126, 134
— трансгрессивное 46, 122, 126, 134
Петрографическая провинция 78
Пневмолит 21, 22, 35, 36, 42, 88
Пневматолитический процесс см. Пневматолит
Поверхностное разрушение см. Гипергенез
Поле равновесия 32
— существования 32
Поствулканическая деятельность 18, 26, 41, 42, 122, 127
Построгенические явления и процессы 42, 122, 127, 169, 173
Почвенный покров 38, 102, 150
Пустынный цикл 44
- Распространение элементов 19, 32, 49, 56
Реголит 38
Рудная жила 24, 31, 34, 92, 169
- Сингенез 39, 114, 122, 143, 150
Сингенетическое образование 87, 114, 122, 144, 150, 167
Соляные озера 45
Состав земной коры 54
- Тектонический процесс 126
Теплота Земли 28
Тепловые лучи 29
Топоминералогическое исследование 11
- Фаза 17, 31
— пневматолитическая 36, 101
Фальбанд 21, 36, 95
Фенноскандинавский щит 22, 71, 74, 76, 78
- Химико-географическое описание 19
Химические лучи 21, 29
Химический элемент 16
Хронология геохимического процесса 26
- Щит см. соотв. назв.
- Электрический разряд 44
Элементогенетическая провинция 65, 67
— эпоха 65
Элювиальное выветривание см. Гипергенез
Энергетика геохимических процессов 28
Энергия живого вещества 29
Эпимагматическая стадия 26
Эрозия 95, 101
— ледниковая 77, 83, 106
- Ювенильные воды 42

УКАЗАТЕЛЬ ГЕОГРАФИЧЕСКИХ НАЗВАНИЙ

(только для специальной части)

Сокращения: б.— бухта; басс.— бассейн; г.— гора, горы; гор.— город; губ.— губерния; дер.— деревня; з.— залив; кр.— край; м.— море; масс.— массив; м. в.— минеральные воды; мр.— месторождение; о.— остров; оз.— озеро; ок.— океан; п-ов.— полуостров; р.— река; рдн.— рудник; р-н.— район; с.— село.; ст.— степь, степи; стц.— станция; у.— уезд; ущ.— ущелье; хр.— хребет

Азия 78

Александровск 89

Алтай 22, 73

Аннинский завод 165

Ардатов гор. и у. 152, 156

Ардатовско-Муромский р-н 166

Армения 72

Архангельск 125

Архангельская губ. 74, 78, 105, 152, 174

Астраханские ст. 71, 154

Астрахань 134

Балахна 163

Балтийское м. 93, 111, 121

Баренцово м. 94

Барнуковская пещера 172

Белая р. 156

Белое м. 74, 76, 81, 86, 89, 93

Блорке 121

Богородское с. 167

Боровичские пороги 143

Боровичский р-н 127, 128, 133, 140

Вазуза р. 145

Варзуга р. 79

Великая р. 107, 113

Верхний Услон 168

Ветлуга 125

Виндава гор. и р. 104, 109, 111

Витебская губ. 105

Вишерский Урал 152

Владимир 125

Владимирская губ. 156

Войцкий рдн. 80

Волга 138, 148, 152, 154, 155, 156, 157, 165, 168

Волжская грива 174

Волк-остров 81

Вологда 102, 125, 154

Вологодская губ. 152, 163, 175

Волхов р. 108, 112

Воронеж 134

Воронежский горст 71, 75

Воскресенский рдн. 169

Выг р. 85

Выксунский р-н 165, 175

Вытегорский у. 74

Вычегда р. 156

Вятка р. 168

Вятская губ. 153, 175

Вятско-Камский водораздел 156, 162, 164, 166, 179

Гекмана ущ. 99

Гапсаль 111

Гатчина 121

Горный Туркестан 73

Даго о. 111

Донецкий басс. 126

Донская ст. 71

Дорогомислово 145

Елатьма 148

Елец 125

Ефимьятское с. 165

Жигули 152, 154, 155, 156, 159, 168, 169, 170, 171, 173

Западная Двина 107, 113, 158

Западная Сибирь 73

Закавказье 73

Закаспийский кр. 71, 158

Зашейки 81

Зубцов 144

Иваново-Вознесенск 164

Изборские ломки 111

Ииваара 96

Икша ст. 136

Илецкая Защита 163, 164

Имандра оз. 102

Иргинский р-н 164

Кавказ 71, 72

Кавказа предгорья 71

Кавказский хр. 71—73

Казанская губ. 153, 156, 174

Казань 154, 156, 157, 162, 167, 168

Калужская губ. 125, 148

Кама р. 156

Камско-Вятский водораздел 156, 162, 164, 166, 179

Камчатка 73

Канда р. 88

Кандалакша 87

Кандалакшский з. 76, 78, 81, 82, 92

Канин 92

Капорье 107, 117

Каргопольский у. 74

Карелия 75, 77, 78, 81, 82, 84, 85, 90, 92

Карское м. 94

Касимов 125

Каспийское м. 71

Кемлуда 80, 85

Кемский у. 75, 81, 88

Кереть 85

Киев 108

Киргизские ст. 73

Ковда 89

Ковенская губ. 105

Ковров 152

Козлов 125

Козьмодемьянский у. 159

Колы долина 81

Кольский з. 81, 91

- Кольский масс. 75, 77, 79
 Кольский п-ов 75, 77, 81—86, 92
 Кокшер о. 110
 Кончезеро 83
 Корабль г. 81, 83
 Костромская губ. 125, 138, 148, 162, 163, 165
 Котельнический р-н 167
 Котлин о. 114, 115
 Красновидово 168
 Крым 72
 Крымская Яйла 74
 Кудно стд. 148
 Кукас оз. 89
 Кунгурская пещера 178
 Кунгурский р-н 164
 Курляндия 105, 111, 113, 118

 Ладожское оз. 74, 75, 93, 94
 Лапландия 75
 Ледовитый ок. 74, 76, 89, 93, 95, 152, 154, 156
 Липецк 125, 148
 Лифляндия 105, 111
 Лодейпопольский у. 74
 Луаврский массив 80, 96, 97, 102
 Луаврурт см. Луаврский масс.

 Макарьев 149
 Маньчжурия 72
 Медвежьи о. 80, 85
 Минская губ. 75
 Миусинский кр. 73
 Могилевская губ. 105
 Молога р. 152
 Монча-гундра 102
 Моркваши 168
 Москва 89, 132, 145
 Московская губ. 86, 125, 143
 Московский басс. 143, 170
 Мста р. 143
 Мурманск 78
 Мурманское побережье 81, 85, 86
 Муром 152
 Мценск 125

 Нагольный кряж 150
 Нарова р. 112, 114, 122
 Нева 121
 Нижегородская губ. 153, 162, 165
 Нижний Новгород 177
 Новая Земля 94
 Новгород 125
 Новгородская губ. 105, 125
 Нотозеро 96

 Ока р. 156, 175
 Окско-Клязьминский р-н 162, 166, 171
 Окско-Муромский р-н 166
 Олоний о. 82, 87
 Олонецкая губ. 74, 75, 80, 105, 125, 163
 Олония 74, 75, 77, 78, 83, 84, 85
 Онега гор. 74
 Онега р. 74
 Онежская губа 75, 80
 Онежское оз. 74, 82, 93, 94
 Орел 125, 134

 Оренбург 152, 154
 Орловская губ. 125
 Осуга р. 145
 Оханский у. 165

 Павловск 112, 114
 Паз р. 93
 Пахель 114
 Пермская губ. 153, 165, 169, 175
 Петербург см. Петроград
 Петровско-Разумовское 128
 Петроград 107, 108, 113, 114, 115
 Петроградская губ. 105, 112, 122
 Петрозаводский у. 85
 Печищи 168
 Печора р. 134
 Пихекуру 96
 Повенский у. 80, 91
 Поволжье 133, 163, 167, 169, 170, 171, 173
 Подмосковный р-н 128, 140, 148
 Подольск 71
 Подольский цементный завод 133
 Подольско-Азовский горст 71
 Полярный кр. 73
 Полярный ок. 93
 Поливна 138
 Поморье 75, 82, 85
 Поповка р. 106, 107, 112, 113
 Поповка стд. 116
 Предкавказье 158
 Прибайкалье 73
 Прибайкальские хр. 73
 Прибалтика 110
 Прииртышский кр. 73
 Прикаспий 73, 155
 Прионежье 106
 Приуралье 155, 163, 166, 170, 171
 Псковская губ. 105, 111
 Пулковка р. 107
 Пьяна р. 172

 Раненбургский у. 132
 Ревель 107, 108, 112, 113, 114, 121
 Ржев 144
 Рига 108
 Ропша 121
 Рославльский у. 105
 Русавкино 145
 Рязанская губ. 125, 132, 141, 142, 148

 Самара гор. 168
 Самара р. 152
 Самарская губ. 156, 173
 Самарская Лука 157, 162
 Саяны 22, 73
 Свирь р. 74
 Свияжский у. 168
 Северная Двина 156, 162
 Северная Карелия см. Карелия
 Северный Ледовитый ок.— см. Ледовитый ок.
 Северный Урал см. Урал
 Северо-восточная Сибирь 75
 Селенгинская Даурия 73
 Сергиевские м. в. 174
 Симбирск 152
 Симбирская губ. 167

- Смоленск 125, 134
Смоленская губ. 105, 125
Смолка дер. 122
Сок р. 159
Солигалич 125
Соликамский р-н 156, 164, 167, 179
Сородкий р-н 81, 88
Старая Русса 111, 113, 120
Стерлитамак 159
Сура р. 152
Сухона р. 156, 162
Сыслова р. 166
Сюкеево 154, 156, 163, 166, 167
- Таврокавказские хр. 71
Тамбовская губ. 125
Тверская губ. 75, 125, 143, 144
Терский берег 80
Тетюши 152, 156, 165
Тетюшский у. 156
Тивдия 90
Тиман 73, 92, 152, 154, 155
Тихвин 105
Тихвинский у. 141
Тихий ок. 73
Томилово стц. 168
Тосно р. 116, 122
Троицкий завод 164
Тулома р. 81
Туломозерское мр. 84
Тульская губ. 125, 148
Тунгусский басс. 73
Турий п-ов 96
Туркестан 73
- Умба 76, 99
Умптек 80, 99, 102
Урал 73, 105, 126, 152, 153, 155, 158, 160, 165
Уральский хр. 126, 154, 156, 162, 170
Уржумский р-н 167
- Урмаево 167
Усолье 163
Уссурийский кр. 73
Уфа р. 168
Уфимская губ. 153, 168
Уфимское плато 162, 164, 166, 179
Ухтым 165
- Феллин 112, 113, 114
Финляндия 74, 75
Финский э. 74, 75, 93, 94
- Харьков 153
Хибинский масс. 78, 80, 84, 93, 97, 101
102
Хинган 73
Хитоварака 89
Холм г. 113
- Черемуховские м. в. 174
Чердынский Урал 179
Черное м. 71
Чистопольский у. 174
Чуна-тундра 102
Чусовая р. 168
- Шелонь р. 111
Шешма р. 154, 160
- Эзель 111
Энотекис 96
Эстляндия 105
Эстония 121
- Юрьевец 125
- Яблонный хр. 73
Ямбург 167
Яранский у. 168
Ярославль 152
Ярославская губ. 125, 15

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ СОЮЗА

Очерк первый

ОСНОВНЫЕ ЧЕРТЫ ГЕОХИМИИ СОЮЗА¹

ВВЕДЕНИЕ

Геохимия — наука о распределении и перемещении химических элементов Земли, но в рамках определенных территорий она вырастает в науку о той сырьевой и отчасти энергетической базе, на которой строится хозяйство. Геохимические проблемы Союза поэтому не проблемы отвлеченной теории или узко-практических задач — это проблемы того и другого вместе, проблемы культурного строительства страны на основе научного анализа природы и ее производительных сил. Поэтому мой очерк неизбежно превращается в попытку подвести научную базу под геолого-поисковую деятельность и наметить основные руководящие линии в поисках ископаемых богатств. Он написан трудным научным языком, базируется на сложнейших проблемах современной геохимии и геологии и является лишь канвой, весьма схематичной и мало точной, для того чтобы позднее в более углубленной проработке отдельных намеченных проблем можно было разрешить более точные и более совершенно поставленные мною основные задачи².

Основные линии этого построения давно уже выявились в моей работе и частично нашли свое выражение в первом томе моей Геохимии (Геохимия России, I, Научн. хим.-техн. издат., 1922) и в брошюре, посвященной химическим проблемам промышленности (Научн. хим.-техн. издат., 1924). Частично эти идеи я развивал последние два года в ряде научных собраний: доклады — в 1929 г. на Геологическом съезде в Ташкенте, на Химической конференции в Госплане СССР летом 1930 г., на Краеведческом съезде в Алма-Ата в апреле 1930 г., в Общем собрании Академии Наук и в научных собраниях Ленинграда и Москвы.

Кисловодск.

Ноябрь, 1930 года

I. ОБЩИЕ СООТНОШЕНИЯ

Я решаюсь написать настоящий очерк и достаточно смело набросать ряд перспективных картин геохимии Союза, так как думаю, что именно по линии этих идей должна развиваться не только наша геологическая поисковая и разведочная деятельность, но и наше крупное промышленное строительство: наши производительные силы и источники энергии и в особенности полезные ископаемые недр нашей страны не случайно и не бессистемно разбросаны по территории Союза; многочисленные точки и обозначения полезных ископаемых на прекрасных картах, изданных

¹ Печатается по тексту, опубликованному в Трудах СОПС, серия полезн. ископ., 1931, вып. 2.

² Прилагаемая карта весьма схематична и дает представление лишь об основных геохимических системах Союза.

по этому вопросу для Европейской России, Сибири, Туркестана, пока являются для нас лишь суммой эмпирически накопленных данных: они — результат огромной описательной работы наблюдателей-натуралистов, и только на них пока строятся и жизнь и наука. Но эти точки не случайны, и глубочайшие законы геохимии связывают их между собой, управляют геохимическими полями, дугами, поясами и зонами. *Законы пространственного распределения отдельных элементов на поверхности Земли и в земной коре являются глубочайшими законами современной геохимии*, и проблемы производительных сил, география их распределения и даже география промышленности в значительной степени вытекают из этих геохимических законов.

В настоящем очерке я пытаюсь набросать лишь отдельные черты этих явлений; они во многих своих частях не проработаны, для ряда выводов не хватает материала. Я ставлю ряд положений лишь как проблему, как рабочую гипотезу, как наведение для дальнейших исследований, для точного и детального нанизывания природных фактов и хочу обратить внимание на ряд острых научных и научно-технических задач.

Я хотел бы, чтобы изложенные ниже идеи послужили канвой особенно для поисковых работ, которые до сих пор шли бессистемно и случайно, чтобы выявление богатств недр нашей страны определялось не моментом случайности, а законами самой природы, которые могут подсказать более правильные и быстрые пути.

II. ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ФАКТОРЫ

Два основных момента определяют геохимию каждой области — геологическое прошлое и климатическое настоящее. Под первым я разумею всю совокупность геологических явлений прошлого, начиная с тектонической истории, истории вулканических и магматических процессов, палеогеографические и палеобиологические особенности земной поверхности в прошлом. Под вторым я, равным образом, подразумеваю совокупность всех явлений, которые создаются Солнцем на земной поверхности, начиная с самого климатического режима, геофизических явлений земной поверхности, кончая теми химическими процессами, которые вызваны солнечной энергией, создающей круговорот воды и химических элементов, почвенный покров с его зонами, растительную и животную жизнь. Из этих двух основных факторов природы рождаются еще два как их непосредственный и логический результат: 1) современные формы земной поверхности, распределение воды и суши, высоты гор и цепей с их естественными зонами, с направляющим влиянием речных систем и долин и 2) социальная и хозяйственная жизнь человека, все более и более влияющая на ход геохимических процессов, но вместе с тем создающая свои собственные формы и развивающаяся на их основе.

Краткому рассмотрению этих основных факторов и посвящается настоящая глава.

1. Геологическая история

Геологическое прошлое прежде всего складывается из основных форм, определяющих характерные черты геохимии: платформ — древних платформ устойчивого типа, геосинклиналей и возникающих из них хребтов-дуг и осадков прибрежных морей, озер, болот, т. е. мелководных, глубоководных или даже материковых отложений больших пространств.

Обобщения Э. Зюсса, дают нам картину пространственного и хронологического соотношений этих элементов прошлого. *Щиты* — платформы являются для нас прежде всего остатками в значительной степени наиболее древних поверхностных образований, претворенных в глубинах, путем палингеза (Седергольм), в архейские комплексы. Высокая температура и высокое гидростатическое давление определяют геохимию этих образований, и законы миграции в них отвечают этим термодинамическим соотношениям: все образования, более богатые летучими компонентами, отдельные термальные водные процессы, рудные жилы, т. е. все то, что генетически связано своими корнями с глубинами, но по характеру отложения отделено от этих корней, — все это отсутствует в общей геохимической схеме этих щитов.

Здесь господствуют образования непосредственных магматических выделений, даже среди постоянных спутников древних щитов — пегматитов — мы встречаем лишь их наиболее высокотемпературные корни.

К щитам непосредственно примыкают, их облекают или окружают венцами *орогенические цепи*, образующиеся путем смятия ослабевших геосинклиналей между соседними более устойчивыми щитами. Эти системы представляют целый цикл не только механических, но и геохимических процессов, идущих весьма закономерно и начинающихся еще с основных излияний в глубинах геосинклиналей и заканчивающихся гранитными интрузиями с их пегматитами и жилами в осях поднявшихся хребтов. Сложные разломы на границах этих цепей и обрывающихся сдавленных щитов определяют места наименьшей механической устойчивости, а отсюда и места наиболее интенсивных геохимических процессов (Ниггли).

Длинным рядом закономерных процессов проходит перед нашими глазами вся история этих горных цепей; более древние непосредственно окружают венцами-гирляндами старые щиты, подобно венцам обломков льда и снега на льдинах, сталкивающихся во время ледохода.

Эти первые венцы облекают старые щиты, но более молодые дуги в свою очередь огибают их, все дальше и дальше отходя от щитов, частично подминая под себя более древние образования и сгибаясь и заменяясь еще более молодыми тектоническими и геохимическими дугами; вслед за ними, за их механическими и геологическими законами, следуют геохимические превращения, миграция элементов и их новые сочетания.

Древние архейские щиты¹ первое время были нарушены в своей однородности эо- и неoarхейскими движениями, которые еще в них самих дали начало новым процессам перемещения химических масс. Затем начались так называемые каледонские движения, захватившие в Европе северные оконечности Фенноскандинавского щита и частично погребенные в процессе движений под другими образованиями. Далее начались герцинские (варисийские) движения, мощным поясом охватившие всю Евразию и вливавшие свои магмы и горячие термы между остывшими щитами с севера и юга. Далее следовали все более продвигавшиеся к югу от наших северных щитов движения мезозойские, пока в середине третичной эпохи не начались мощные процессы альпийской складчатости, снова опоясавшие всю Европу и Азию и оттеснившие мировой океан — «Тетис» Зюсса — к югу, туда, где сейчас находится Средиземное море.

К этим венцам прибавились молодые гирлянды современных вулканов, более выраженные на востоке и на западе (Кавказ — Камчатка), но

¹ Я беру в основу своего дальнейшего изложения геолого-химическую историю Евразии. С ней в основных чертах сходна история Африки; но совершенно иначе складывалось геохимическое прошлое Американского и Австралийского материков.

связанные между собою сейсмически беспокойными районами на стыке Европы и Азии.

И наконец, к этим двум основным системам геохимического процесса присоединяется третья — это те большие пространства, где более спокойно шли химические процессы и которые не были опущены глубоко в морские геосинклинали и не превратились в могучие горные цепи. Это — то осадки глубоких морей, то огромные озерно-речные конусы выноса, то пояса соляных озер вдоль молодых хребтов, то болотистые топи тундры или тайги. На спокойных шитах (шельфах), мерно колебавшихся в процессах изостазии, вдоль более устойчивых границ геосинклиналей и цепей тянутся эти более спокойные поля земной поверхности, в пестрой свите сменяя глубоководные осадки мелководными или прибрежными, сменяя моря на озера и на пустыню. Лишь по краям обрываются эти поля, то обломанные сбросовыми линиями, то мягко согнутые в увалы и мягкие фестоны. И всюду в тесной зависимости от этих процессов идет и геохимическая история, и если есть палеогеография, рисующая нам изменения морфологии земной поверхности, то есть и палеогеохимия, говорящая о смене химических равновесий земной коры. Если мы в последнее время привыкли говорить и думать о геохимических эпохах, связывая с ними представление об определенном времени появления из глубины определенных металлов, то еще гораздо более применимо это понятие к геохимии тех полей, которые создавались в течение долгой геологической истории как результат ее геологии.

2. Климатическая и почвенная зональность

Вторым фактором, который определяет понимание и смысл законов поверхности и распределение производительных сил, является, конечно, все то, что связано с Солнцем и его воздействием на Землю. Идея широтной зональности во всей глубине была впервые охвачена в почвоведении В. В. Докучаевым, а в климатологии — А. И. Воейковым, и мы не можем сейчас недооценивать значение углубленного анализа этих факторов. Казалось бы, что школьной истиной является существование широтных климатических поясов, начиная со льдов приарктических областей и кончая тропиками и субтропиками. Но эта зональность идет гораздо глубже таких внешних картин, и изменение метеорологических и геофизических факторов гораздо глубже влияет на ход химических процессов земной поверхности, чем это принято думать. Только русская школа почвоведов (К. Д. Глинка, С. С. Неуструев и др.) во всем объеме стала подходить к пониманию геохимии этих процессов, а Гарассовиц, Кайзер и Бланк в Германии стали точнее анализировать эту новую геохимическую зональность. Нет никакого сомнения, что в этой области климатические зоны не только и даже не столько влияли на ход химических процессов земной поверхности, сколько обуславливали течения определенных процессов жизни, гораздо более чувствительной к колебаниям термического режима, чем неорганическая химическая реакция. Поэтому вся зональная смена животного и растительного мира, начиная с крупных животных и кончая бактериальным миром почвы, осадка и вод, оказалась еще гораздо более важной для понимания геохимической зональности, чем многие другие геофакторы. Я не останавливаюсь дольше на этих общеизвестных вопросах, хотя их конкретизация и реальный анализ далеко еще не совершенны и в значительной части не базируются пока на детальных геохимических данных.

Несомненно, что и хозяйственная и промышленная деятельность человека относится к этим зональным факторам. Ее растущее геохимическое влияние, несомненно, подчиняется все тем же законам зон, и хотя в них человечество переступает через узкие границы, определяющие появление и существование других живых существ, но и здесь мы имеем дело с такими же пределами социальной и хозяйственной жизни, которые ставятся законами Солнца и физиологическим влиянием его лучей.

3. Современные тектоника и орография

Из приведенных двух основных факторов рождается ряд других, имеющих очень большое значение для течения современной жизни и для распределения производительных сил. Как результат взаимодействия тектонических сил и созданных ими цепей, влияния изостазии, стремящейся уравновесить материковые массивы, влияния водной эрозии, речных систем и общего распределения воды и суши — создается целый цикл явлений, которые влияют на хозяйственную жизнь, создают запасы гидроэнергии, видоизменяют законы распространения химических элементов и географически направляют ход развития страны. Их можно было бы, по Пенку, объединить термином *географических факторов*, подразумевая под этим словом не только чисто пространственные взаимоотношения, но и их генетическую связь, не только морфологию объектов, но и их динамику и самую химическую сущность; и если в последние годы понятие географии в значительной степени расширилось, охватив самые разнообразные стороны жизни и природы, и создало важнейшую отрасль этой науки — экономическую географию, то столь же справедливо введение и термина *геохимической географии*, определяющей статику и динамику основного фактора, создающего все многообразие природы и жизни, — сочетания химических элементов. С этой точки зрения орография и распределение высот и глубин на какой-либо территории представляют явление очень большого значения не только потому, что оно создает ту вертикальную зональность процессов, которая налагается на широтную, но и потому, что оно говорит нам о ряде геохимических явлений, для которых абсолютная и относительная высота является нередко решающим фактором. Орографическая характеристика страны есть, несомненно, крупнейший фактор геохимического понимания данной области.

III. ВЛИЯНИЕ ОТДЕЛЬНЫХ ФАКТОРОВ НА ГЕОХИМИЮ

Уже в предыдущей главе мы видели, что все основные геологические и географические процессы в природе приводят в результате к процессам геохимического характера. Больше того, процессы геохимии лежат нередко в основе этих геологических и геофизических явлений, являясь обычно их первопричиной, не всегда, однако, замечаемой и понимаемой. Действительно, под геохимическим процессом мы подразумеваем процесс перемещения, миграции и перегруппировки химических элементов, вызываемый сменой одних физико-химических и механических условий другими. Всякое изменение существующего равновесия (истинного или ложного) в ту или другую сторону ведет к новому равновесию среди отдельных химических атомов, а их перегруппировка в новом сочетании в свою очередь вызывает изменение тех или иных сторон термодинамической обстановки. Таким образом, все то, что изучается геологией и географией, должно быть проанализировано заново геохимическим исследованием, и для меня нет никакого сомнения в том, что именно *космохи-*

мические законы определяют в первую очередь явления окружающего нас мироздания в целом, а *геохимические* законы — судьбу нашей планеты и самой земной поверхности и, в частности, того, что мы называем полезными ископаемыми.

Мы наметим далее вкратце основные типы геохимических явлений в связи с общим ходом геохимической истории Земли.

1. Геохимические пояса¹

Цепи и гирлянды орографических систем, опоясывающие более устойчивые плиты, являются не только областями механических перемещений и поднятий, но и местом особенно интенсивной миграции химических элементов. С ними связаны по преимуществу глубинные или поверхностные интрузии и экструзии магматических пород, их нарушенность делает возможным легкое и свободное перемещение флюидных, газовых и водных растворов, сама их масса должна переходить в новые группировки соотношением с новыми условиями равновесия, боковым давлением, местным изменением температуры, контактным воздействием глубинных расплавленных масс и т. д. И так как сами тектонические процессы вытягиваются в линии и дуги определенных направлений, то и связанные с ними геохимические явления образуют пояса, сплошные гирлянды, тянущиеся иногда на тысячи километров. Так, по линии восточноафриканского грабена тянутся геохимические линии не только щелочных пород молодых вулканов, но и глубинных перидотитовых массивов с платиной и алмазом (углеродом), и те открытия в области этих элементов, которые были сделаны только в последние годы на оз. Танганьике, Ньяссе в отношении алмаза или в Южной Африке в отношении платины, в сущности, могли быть и раньше предсказаны, если бы заранее было учтено геохимическое значение этого огромного пояса, северная часть которого уходит за пределами Абиссинии в пески Сахары и Нубийской пустыни, а южный конец не обрывается в грандиозном геохимическом комплексе Бушвельда и алмазоносных воронках взрывов, но намечается еще южнее в районах Наталя и Капской провинции.

Великий серебряный пояс на протяжении 3000 км прорезает Северную и Южную Америку, оканчиваясь где-то на юге Бразилии, — с ним связана вся история человечества в XVI—XVII вв., и нельзя писать историю культуры Испании и Португалии, не учитывая значения драгоценных металлов этого пояса (Спарр).

Однако самое важное в понимании этих поясов — это их геохимическая зональность, закономерное распределение химических элементов в этих поясах, преимущественно вкост их простираения на сотни километров. Я не буду сейчас останавливаться на объяснении этих геохимических зональностей, приведу лишь самые результаты. В середине, по оси этих поясов, там, где непосредственно эрозия обнажает их корни — ядра поднявшихся из глубин по преимуществу гранитных или гранито-

¹ Необходимо иметь в виду, что геохимическая характеристика какого-либо пояса в меньшей степени, и то только косвенно, связана с хронологическими его особенностями, а в основном зависит от тектонического типа. Поэтому геохимические пояса поверхностных типов [например, *plis de couverture* (покровные складки), по Аргану] будут совершенно иного типа, чем связанные с тектоническими поясами, названные Арганом «*plis de fond*» (глубинные складки), которые вызывают совершенно иные геохимические ассоциации (алтаиды Зюсса). В общем надо сказать, что вопрос о взаимоотношении геохимических процессов и типов тектонических явлений еще очень мало разработан, хотя и представляет очень важную теоретическую и прикладную задачу.

диоритовых массивов, — там, в области дифференциации этих магм, мы встречаемся с самыми глубинными и самыми высокотемпературными образованиями — это будут руды редких металлов, урана, ниобия, тантала, руды бериллия и лития, пегматитовые жилы с драгоценными камнями, флюевым шпатом и кварцем.

Далее, но в непосредственной близости, нередко прорывая толщу подстилающих пород, мы встречаемся с целым циклом скоплений летучих и легко подвижных веществ — это пневматолиты (по нашей номенклатуре) со скоплениями олова, вольфрама; далее, на границах с висмутом и радием — выделения золота и мышьяка. Еще дальше следуют горячие водные растворы — гидротермолиты с соединениями меди, цинка, свинца, далее — серебра, никеля, кобальта, и, наконец, в наибольшем расстоянии от магматических очагов следуют руды сурьмы и ртути и сернистого мышьяка как наиболее легко мигрирующих элементов, отлагающихся в наиболее холодных частях процесса. В этой последовательности зоны или симметрично вытягиваются вдоль пояса, или замыкаются в отдельные концентрические дуги вокруг отдельных массивов, или накапливаются по периферии по мере перехода к более ослабленным и потому скрытым в больших глубинах процессам пояса. Грандиозные системы в сложных тектонических областях не всегда идут столь определенными геометрическими линиями, как мы их знаем в гирляндах древних, архейских и неопалеозойских дуг Китая или в некоторых рудных центрах Северной Америки (например, Блэк-Хиллс в Южной Дакоте и др.). Мы иногда видим гораздо более сложную картину нескольких пересекающихся направлений различных фаз процесса (например, в Корнуэлле) и в этих случаях получаем более сложные узловые точки их наложения.

2. Геохимические поля (геохимический шельф)

Геохимическими полями мы называем такого рода геохимически однородные области, которые связаны с большим пространственным (по преимуществу в горизонтальном направлении) накоплением какой-либо группы или ассоциации элементов. Они по преимуществу¹ связаны с осадочными свитами пород и представлены закономерной серией химических осадков, связанных с большими морскими бассейнами (фосфориты, уголь), или вытянуты в виде полос вдоль берегов или горных цепей (соль, нефть, глауконитовые скопления и т. д.), или образуют заливы — понижения, опущенные котловины, или, наконец, представлены пространственно разорванными, но геохимически едиными площадями осадков пустыни (сера, скопления солей калия и натрия и т. д.).

Геохимические поля создаются по преимуществу в областях, испытывающих лишь изостатические колебания, или они протягиваются вдоль молодых тектонических хребтов, прорывая несколько пониженные части форланда, а нередко захватывают большие пространства старых щитов, лишь медленно поднимающихся и опускающихся под влиянием новых механических равновесий коры. Геохимические поля обычно не несут на себе следов магматических зон, и их циклы отвечают геохимии земной поверхности так, как она раскрывается в современной литологии и палеонтологическом поведении. Тесно связанные с биогеохимическими законами процессы полей несут на себе черты тех своеобразных химических реакций, которые и сейчас идут на дне океанов, морей, озер, болот и соляных водоемов.

¹ Весьма редко геохимические поля связаны с изверженными покровами, например базальтовыми выделениями Деккана в Индии или траппами Сибири.

В ходе геохимических процессов полей и зон мы не наблюдаем тех термальных фаз, которые связаны с последовательным ходом магматических процессов, где закон охлаждения и понижения температуры определяет не только ход реакций, но и их физико-химическую систему. Здесь мы имеем другие типы процессов, которые мы можем следующим образом наметить в схеме:¹

Цикл II

Нормальный осадочный процесс (температурные колебания в пределах верхней пленки земной коры)

- A. Образование самого первичного осадка.
 - B.) Диagenез — образование отдельных конкреций или стяжений и в дальнейшем
 - C.) сплошное превращение в породу, но все еще в сочетании с той водной системой, из которой она образовалась.
 - D.) Катагенез — отдельные фазы процессов взаимных химических реакций
 - E.) между серией химически и физически разнородных сред.
 - F.)
 - L. Гипергенез — изменения образований под влиянием климатического режима и реакции земной поверхности.
- Мы в данном случае имеем последовательную серию процессов, образующих единый геохимический цикл.

Цикл III

Процесс повышения температуры и давления (метаморфические поля и зоны)

- M. Метаморфизм контакта изверженной магматической породы с осадочной серией. Образование ряда концентров различных температурных и геохимических особенностей:
 - а) чисто температурный процесс — пирометаморфизм,
 - б) пневматолитический процесс (геохимический).
- N. Метаморфизм давления (гидростатического и одностороннего).
- O. Метаморфизм гидротермальных процессов (воздействие горячих и средних терм, гидротермальный метасоматоз).

3. Геохимические глубины (ковцентры)

Мы уже говорили, что современная эрозия, коррозия, абразия и дефляция, т. е. действие воды, льда, снега и ветра, моделируют земную поверхность и создают тот орографический ландшафт, который стоит в основе понимания современной географии и лика Земли. Но, помимо громадного непосредственного значения этих факторов для геохимии поверхности, их геохимическая роль сказывается весьма определенно в том, что эти факторы создают глубинные различия в других циклах, выявляют более глубокие зоны геохимических процессов, обнажая их корни, некогда образовавшиеся при больших температурах и давлениях. Та геохимическая зональность, о которой я говорил при описании отдельных поясов, существует и по вертикали, где она сказывается еще гораздо более существенно. С одной стороны, здесь намечается влияние различной глубины застывания самого массива благодаря чему создается очень серьезное различие между эффузиями вулканов, полуглубинными лакколитами и весьма глубинными массивами, с другой стороны, эрозия и размыв в широком смысле этого понятия обнажают и в том и в другом случае различные вертикальные зоны процесса и создают внешние геохимические

¹ Первым геохимическим циклом я называю совокупность геохимических процессов, связанных с охлаждением земной коры в целом и с охлаждением отдельных магматических очагов.

различия в разных частях земной поверхности, хотя по существу они принадлежат к тождественным процессам. Так, случайная эрозия может обнажить корни пегматитов в одном месте, смыв и разрушив все верхние горизонты с рудными жилами и гидротермальными растворами, и, наоборот, где-либо может полностью сохраниться весь вертикальный разрез.

К таким результатам приводит не только эрозия, но и тектонические движения, которые перемещают в вертикальном направлении отдельные клинья и глыбы и таким образом обнажают на поверхности различные концентры всей геохимической системы. Идея о глубочайшей связи между магматическим очагом и теми расстояниями, на которых совершаются процессы, является выводом огромного эмпирического значения; даже глубины современных горных разработок (до 2 км) уже достаточны, чтобы практически подметить некоторые изменения, например, увеличение содержания олова с глубиной в полиметаллических рудниках Рудных Гор (Пршибрам), замена вольфрама оловом в Бирме и в Корнуэлле, замена свинца цинком в Садоле, увеличение содержания меди с глубиной и и т. д. и т. д. В общем, глубинный ряд химических элементов совершенно отвечает той же последовательности, которую мы намечаем для отдельных геохимических зон и поясов.

4. Геохимические эпохи и провинции

Уже из предыдущего следует, что геохимические процессы можно изучать в хронологическом и топографическом разрезе. Поэтому мы условились применить, вместо старых терминов — металлогенических, петрографических или рудных эпохи и провинций, термин, гораздо более широкий, охватывающий вопрос полностью, — геохимические.

Под именем *геохимических эпох* мы подразумеваем такие отдельные моменты геологической истории, для которых характерно особое накопление некоторых отдельных элементов или их сочетаний; это может быть вызвано как сходством петрогенетических моментов, так, в свою очередь, сходством физико-химических условий застывания в определенные моменты истории или же господством на широкой площади каких-либо климатических зон, например пустынь, вызвавших весь комплекс пустынных минералов. Но не надо забывать, что, утверждая характерные геохимические эпохи, мы нередко их определяем не потому, что для них были особенно характерны те или иные геохимические сочетания, а потому, что степень их эрозии отвечает вообще определенным глубинным зонам. Так, обилие в герцинских системах полиметаллических соединений с преобладанием свинца, цинка и серебра объясняется большей эрозией этих древних горных цепей, по сравнению, например, с жилами альпийских процессов, очень бедными этими элементами, и меньшей эрозией, по сравнению с эопалеозойскими жильными выделениями пегматитов, аплитов и кварцевых жил с золотом.

Геохимические эпохи ближе всего определяются единством и господством в целом ряде территорий определенных физико-химических условий и определенных типов тектонических процессов, вызывающих и соответствующую миграцию химических элементов.

Гораздо менее определено понятие о *геохимических провинциях*; в проведении границ таких провинций могут быть применены различные методы; условность самого понятия вызывает условность и этих границ. Более определено связывается это понятие со строго определенным циклом геологических явлений, и их границы должны предопределить и границы самой провинции; так, можно геохимической провинцией

считать, например, район прибрежных пермских осадков Уральского хребта, центральный каменноугольный бассейн (Подмосковный) с совершенно замкнутой и очень определенной геохимией; в области магматических процессов очень определенно отвечает это понятие Фенноскандинавскому щиту, вулканическим поясам Азии, менее характерно в применении к столь сложному геохимическому комплексу, как Урал, в противоположность, например, Крыму и центральному Кавказскому хребту, несомненно намечающим одну общую геохимическую провинцию.

5. Геохимические центры сырья

Этим термином мы будем обозначать те районы, в которых наблюдались большие скопления тех или иных полезных ископаемых и особенно их сочетания. Современная горная промышленность в своих новых масштабах и новой технологии стремится к комплексному использованию целой группы полезных веществ, с тем чтобы их целиком применить в хозяйстве и промышленности. Особенно важны сочетания металлов и угля, солей и источников серной кислоты, черных металлов и редких тяжелых металлов и т. д. Но такие сочетания приобретают значение в промышленном использовании только тогда, когда они носят не случайный, а геохимически закономерный характер; эта закономерность может быть двоякого рода: во-первых, это могут быть закономерные сочетания, вытекающие из свойства самого геохимического процесса, например совокупность веществ, выделяемых гранитными пегматитами — полевошпат, слюда или кварц, соединения лития, олова, тантала, или, если привести пример из другой области, закономерные сочетания солей калия, кальция и магния, брома, хлора и серной кислоты в остаточных озерных бассейнах; во-вторых, и это наиболее интересный случай, закономерные сочетания получаются тогда, когда различные геохимические системы налегают друг на друга и в местах пересечения дают наложение геохимических процессов; так, например, пересечение рудного пояса и климатической (пустынной) зоны создает особые минеральные ассоциации (например, в южных штатах Северной Америки) или же геохимические поля пересекаются новыми рудными поясами. В результате этих пересечений мы получаем некоторые закономерные узловые точки, о которых мне дальше придется говорить при анализе геохимических систем Евразии.

IV. ГЕОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СССР

Мы переходим теперь к специальной части, к попытке приложить вышеизложенные общие соображения к анализу процессов Евразии и, в частности, на территории СССР. Мое изложение будет касаться давно известных фактов, но их геохимический анализ должен нам дать руководящие линии для того, чтобы наметить некоторые основные принципы геохимических проблем в районном разрезе.

1. Щиты

Основным элементом всей механической системы Евразии являются древние щиты, из которых на территорию СССР приходится прежде всего два основных щита. **Фенноскандинавский** щит своей восточной частью охватывает северо-запад Союза, отделяясь пониженной

озерной линией, тянущейся от Финского залива до Белого моря, от Центральной Русской кристаллической платформы, которая хотя разбита на отдельные части, тем не менее в схеме представляется единой вместе с Воронежским горстом и Южным кристаллическим щитом. Замечательная тектоническая линия — пояс герцинских и зомезовских процессов — отделяет Южный щит от более северных частей платформы. На востоке большой Восточно-Сибирский щит, который мы скорее могли бы назвать Якутским, чем Ангарским, определяет второй массив устойчивых механических масс в геологической истории СССР. В гораздо большей степени, чем первый, он перекрыт полями позднейших отложений и в гораздо более рельефной форме окружен гирляндами-венцами набегавших на него тектонических волн.

Геохимия самих щитов изучена еще очень мало, между тем ее сложность заключается в том, что самые древние щиты в отдельных своих районах прорваны в неархейскую и палеозойскую эпохи более поздними процессами, которые мы частично видим в финляндской части Фенноскандии и которые, вместе со Швецией и Норвегией, сливаются в определенный геохимический пояс (см. дальше).

Первоосновой геохимических моментов щитов являются геохимические процессы как основной, так и гранитной магмы, по преимуществу, однако, пегматиты разного возраста и их дериваты. Как и следовало ожидать, в этих сверху сильно снесенных щитах мы встречаемся лишь с корнями магматических процессов: поэтому все то, что связано с пневматолитическими и гидротермальными фазами, здесь отсутствует, и мы находим лишь высокотемпературные выделения глубин с обильным накоплением полевых шпатов, кварца, некоторых редких металлов, но зато с очень слабо представленными соединениями бериллия, лития, т. е. типов пегматитов более низких температур; в этом проявляется характернейшая черта всех щитов — древних платформ, которая выдерживается довольно определенно и в Канаде, и в Сибири, и в Индии.

Если мы вспомним (по сравнительной геохимической таблице), что большинство пневматолитов с оловянными, вольфрамовыми и сульфидными рудами отвечает по своим температурам, фазам еще более холодным и следовательно, еще более отдаленным от очага, то и их мы не будем ожидать в этих условиях. Зато могут быть, и то только в ограниченном количестве, самые высокотемпературные фазы пневматолитов с молибденитом и касситеритом, т. е. с рудами молибдена и олова. Эти закономерности полностью отвечают геохимии наших щитов (ср. пегматиты Белого моря, Вольни, Сибирского щита).

Но древние щиты в последних фазах своей архейской истории несут на себе следы и первых по возрасту тектонических поясов, а в отдельных более слабых частях этих платформ мы встречаемся с рядом процессов, которые вытягиваются по определенным тектоническим линиям, но не окаймляющим, подобно другим поясам, какие-то неподвижные массы и не образующимся вдоль геосинклинальных опусканий под влиянием боковых давлений. Связанный с ними тип архейских геохимических процессов стоит обособленно по существу своему среди других поясов.

Второе очень характерное явление, типичное для наших щитов, — это накопление в них осадочных железных масс, преобразованных в дальнейшем сложном полумагматическом, полуметаморфическом процессе в магнетитовые или гематитовые скопления. Эти образования нам известны и в Фенноскандинавском щите (пояс юга Варангерфиорда и ряд поясов Кольского полуострова), они характерны и для Южного щита (Кривой Рог и обе полосы Курской аномалии, Бердянский район и т. д.).

2. Пояса

Пояса, несомненно, являются самыми важными геохимическими системами и в Союзе в значительной степени определяют основные рудные процессы и горно-промышленные районы.

Архейские или эозойские пояса, как указано выше, интересны по своим особенностям геохимии, и мы их знаем как в Фенноскандинавском щите, так и в Сибирском; они связаны по возрасту с концом архея и древнейшим палеозоем, и в то время как в Средней Азии и в Сибири они сменяются типичными поясами закономерных типов (каледонских и герцинских), в Фенноскандии мы их видим вдоль Скандинавской оси, где они предопределяют во многих отношениях последующие процессы бывшей силурийской и девонской складчатости — каледонских движений (Брёггер). Для нас интересно то, что северо-западный конец этого частью докаледонского пояса заходит и на Кольский полуостров, где дает, подобно близким областям Швеции и Норвегии, начало интрузиям как основных и ультраосновных пород, так частью и щелочных со связанными с ними месторождениями железных руд, апатита, сульфидов меди и никеля, кобальта и титановых соединений. Эти минеральные скопления образуют совершенно замкнутую специфическую геохимическую провинцию, в которую укладывается Кольский полуостров, по своей геохимии гораздо более близкий к Скандинавскому полуострову, чем к побережьям Белого моря, и, подобно западной Фенноскандии, переживший влияния каледонских движений и грандиозных четвертичных разломов.

Имеем ли мы аналогичные неархейские (или эозойские) пояса в Сибири, — сказать трудно, но то, что сейчас расшифровывается В. А. Обручевым как архейский и эозойский пояса вокруг Сибирского щита, уже носит совершенно другой характер и геохимически приводит к несколько иным типам. Одни из наиболее характерных поясов связаны с Прибайкальем, и в Хамардабанской дуге, окаймляющей Байкал с юга и востока, проявляются их специфические черты с глубинными пегматитами как чистой (слюда, соединения редких земель и др.), так особенно контактной и мигматической линий, и с рядом образований, характерных для глубоких метаморфических зон, богатых золотыми жилами.

Каледонские пояса и зоны Союза расшифрованы геохимически очень плохо, главным образом потому, что они перекрываются нередко более молодыми, особенно герцинскими, движениями и потому скрыты в глубинах метаморфических зон. Вероятно, часть уральских процессов (особенно северных разветвлений) относится уже к каледонским движениям; несомненные каледонские интрузии отмечаются в Туркестане, и более обширная роль принадлежит им в Сибири. О них прекрасно пишет В. А. Обручев, подчеркивая необычайно сложную картину каледонского минералогенеза.

В Европейской части СССР мы должны отнести к древнекаледонскому времени (с наибольшей вероятностью) те грандиозные процессы щелочных интрузий, которые все шире и шире раскрываются на территории Кольского полуострова, где они сейчас известны в количестве более десяти; они сливаются с многочисленными щелочными выделениями, несомненно, последевонского возраста в грандиозную картину скандинавской щелочной провинции, идущей по краям разломов и расколов щитов в виде взрывных масс. Они захватывают, по своему геохимическому типу, и северную Шотландию и южную Гренландию и, вероятно, загибаясь через полуостров Канин, имеют продолжением щелочные породы Чешской губы. Эти щелочные образования всем своим геохимическим комплексом

представляют как бы естественное дополнение к более ранним выделениям основных интрузий.

Появление щелочных комплексов по краям древних щитов вообще весьма закономерно, и все больше и больше накапливается подтверждающих это фактов (Гренландия, Канада, Кольский полуостров, Южный кристаллический щит, Синайский щит и т. д.). Причина этого пока непонятна, но интересно накопление в них элементов титана, циркония, алюминия и фтора.

В Восточной Сибири, при неясности хронологии отдельных поясов, окружающих Сибирский щит, мы склонны заменить старые тектонические понятия более общими чисто геохимическими обозначениями. Ввиду сложности этих хронологических зон и несогласия во взглядах исследователей, уже ранее было предложено заменить хронологические названия районными, выделив байкальские и енисейские пояса. Еще дальше и смелее по этому пути пошел А. Н. Чураков, выделивший тунгусский пояс. Я склонен в своей схеме итти исключительно геохимическим путем и, откладывая возрастное разрешение этого вопроса до новых детальных работ, выделить единый геохимический пояс, окружающий Ангаро-Сибирский щит, под именем Сибирского или *сибирид*. Этот пояс тянется, вероятно, от Северной Земли через Таймыр вдоль Енисея, образует горные районы Енисейского и Канского горстов, загибается в области Кана и Бирюсы и проходит через Мамскую и Витимскую тайгу, теряясь на востоке в течении Алдана и скрываясь на юге под более молодыми образованиями, частью подмявшими, частью обломавшими его по мощным сбросовым линиям. Хронологически перед нами старый комплекс, охватывающий архей, и зо- и мезо-палеозой вплоть до более молодых герцинских движений алтаид; геохимически — это области весьма глубинных процессов, корней глубоких интрузий и их пегматитов; золото и слюда характеризуют эту зону как два специфические сибирские полезные ископаемые. Геохимия *сибирид* еще ждет своих исследователей и своего завершения.

Герциньские (варисцийские) пояса, несомненно, принадлежат к самым важным и интересным геологическим поясам всей Евразии. Они закономерно следуют эксцентрично за архейскими и каледонскими поясами, частью подминая их под себя, частью перекрываясь и омолаживаясь мезозойскими альпийскими движениями. Они охватывают огромные промежутки времени, намечая несколько фаз [от карбона — перми (Урал) до триаса (Донецкий бассейн) и даже до начала юры]. Мы имеем основной пояс (замечательно схваченный А. П. Карпинским и развитый позднее В. Н. Чирвинским и С. Бубновым), который тянется от берегов Атлантического океана в Корнуэлле, проходит через Бельгию и Германию, создавая богатства основной варисцийской рудной линии, проявляется в Рудных горах, чувствуется в медных процессах Сандомирского края, затем — в мощном разломе Великой Российской плиты, — этот пояс делит ее на северную Воронежскую и Подольскую части, давая начало выходам основных кристаллических пород, серебро-свинцовых и ртутных руд Донецкого бассейна, перебрасывается на тот берег Каспийского моря, где скрывается сначала в складках мезозойских хребтов Мангышлака, а далее теряется под глинистыми отложениями Устьурта, песками Кызыл-Кумов, чтобы слиться со второй дугой герцинской орографии и геохимии — с загибающимися с севера уралами.

Это вторая дуга особенно привлекает наше внимание; если первую мы могли бы по существу назвать варисциды (европиды), то эту вторую дугу с ее восточным продолжением я буду называть *уралидами*. Начинаясь

на мысе Желания на Новой Земле, эта дуга определяет собой весь геохимический пояс Урала, с тем, чтобы постепенно сойти на нет в Мугоджарах; но было бы огромной ошибкой не искать ее продолжения по ту сторону Аральского моря: здесь уралиды частично уходят под пески Кызыл-Кумов, частью вырываются из них в виде длинных широтно вытянутых «островов» Султан-Уиз-Дага, Букан-Тау, Ак-Тау и т. д., с тем, чтобы часть ветвей ушла далее в южные предгорья Ферганы, преобразовавшись и перекрывшись сбросовым и слабо складчатым альпийским движением Северного Памира и Алая; другая ветвь идет на север и мощными сбросами и горстами отмоделирована в виде хребтов Тянь-Шаня, начиная с их западных предгорий у Ташкента и уходя своими цепями за высоты Хан-Тепгри в Западный Китай (Восточный Туркестан).

Однако на этом не заканчивается картина герцинских геохимических поясов — отдельные дуги напоминают связку веток, стянутых в один узел где-то между 40 и 50° западной долготы в Западном Китае, Тянь-Шане, Русском Алтае и Ала-Тау, в то время как отдельные ветки широко разошлись к северо-западу: первая — европиды — ушла далеко на запад, вторая — уралиды — загнула дугой к северо-западу, третья пригнула к сибирядам, загнувшись прямо на север вдоль Енисея, образуя как бы начало третьей дуги уралид на юге. Мелкие ветви отходят от основных стволов, особенно между уралидами и сибирядами, где они скрываются под пески Прибалхашья, под степи Казахстана и тайгу Западной Сибири, обнаруживаясь лишь в виде сложной синусоиды геофизических кривых силы тяжести и магнитных аномалий. Геохимически все эти пояса в общем довольно однотипны и в схеме характеризуются очень обильным минерогенезом. На самом рудном Урале мы имеем преимущественно корни процессов с глубинными дунитовыми массивами; к юго-востоку мы переходим к более высоким зонам геохимических концентров с медными рудами Киргизских степей, с участками более высоких температурных зон свинца, цинка и серебра Прибалхашья и Западного Алтая. Этими же полиметаллическими жилами сравнительно низких температур характеризуются и варисциды, наоборот, в более глубинных зонах обнаруживаются пегматиты с редкими глубинными золотыми жилами, слюдяными месторождениями и вероятными рудами олова. В Тянь-Шане, в Кузнецком Ала-Тау и Минусинском районе появляется особый генетический тип процессов, который я называю тяньшанским, который мы лишь слабо видим в уралиде характерного уральского типа (за исключением Магнитогорска) и который оказывается связанным с менее глубокими интрузиями со средними давлениями, — тип контактно-метасоматический: красный железняк в апофизах, магнетит в более внутренних концентраторах, контактные гранаты и пневматолитически выделенные (но не богатые) сульфиды с преобладанием меди и с некоторым содержанием цинка, с баритово-кварцевым жильным телом в случае жильных апофиз. Этот тип встречается на самом юго-западном конце Тянь-Шаня, охватывает тысячи небольших отдельных месторождений самого Тянь-Шаня на нашей и на китайской территории и далее на северо-востоке обуславливает богатства Тельбеса и Абакана¹.

Заканчивая мое описание уралид и тех больших геохимических и практических проблем, которые с ними связаны, я не могу не обратить внимания на одну область, которая остается пока загадочной, — это

¹ Мы относим к поздним герцинидам и те движения, которые названы были В. А. Обручевым тяньшанскими и которые по времени относятся к началу мезозоя; к ним принадлежит часть процессов Урала и особенно южной части Казахских степей.

область Западной Сибири между уралами и сибирядами. Еще А. П. Карпинский указывал, что рудные месторождения Урала не ограничиваются известными нам геохимическими полосами по его восточному склону, но заходят далее на восток, перекрытые осадками прибрежной части палеогенового моря. Действительно, всматриваясь в геохимические особенности уралит и в их изменения, мы должны ожидать к востоку от современного хребта продолжения тех явлений более отдаленных концентров, которые себя частично выявляют на огромном пространстве так называемых Киргизских степей. Я склонен ожидать более низкотемпературных концентров, именно — дальше к востоку от современного Урала, вплоть до течения Иртыша и, может быть, Оби и далее. Думаю, что в будущем предстоит интереснейшая задача путем физических методов и частично наклонного бурения доказать эту мысль и найти методы, пока, может быть, еще очень фантастичные, для поисковых работ в этом равнинном районе, перекрывшем своими третичными осадками огромную древнюю складчатую область с несомненными ископаемыми богатствами — область, представляющую по своей геохимии скорее часть Урала, чем Сибири.

Мезозойские пояса. Серьезную геохимическую роль играют тектонические и магматические процессы мезозоя. В одних случаях в этих явлениях мы имеем лишь последние фазы палеозойских процессов (нередко эффузивных), которые как бы заканчивали магматические циклы герцинского времени, в других, наоборот, мезозойские явления ближе примыкают к движениям альпийским и, охватывая юру и отчасти мел, служат как бы передовыми вестниками в мощных процессах кавказид. Возможно, к мезозойским движениям надо хронологически относить часть геохимических процессов Монголо-Охотского пояса. Во всяком случае анализ мезозойских движений очень интересен, но его геохимическая датировка неясна. По типу дислокаций мы имеем здесь чаще всего процессы средних глубин, во всяком случае меньших, чем глубинные складки алтаид.

Я выделяю мезозойские геохимические процессы прежде всего в системе кавказид, так как в этом случае мы их можем несколько определеннее фиксировать: мы видим южнее частью подводные излияния, диоритодацитовые лакколиты Крыма с их своеобразной, но очень бедной геохимией, имеем сходные процессы, тоже бедные, на Кавказе (где их отделение от более древних герцинских и от более новых альпийских процессов затруднено), наконец, может быть, частично к ним относятся геохимические явления Копет-Дага и, несомненно, с тавридами приходится параллелизовать некоторые геохимические процессы Северного Памира (Д. И. Щербаков). Всюду — мало дифференцированные магматические породы средней кислотности, слабые рудные выделения гидротлов, больше мофетных и гидротермальных процессов, частью даже типа альпийских жил. Местами характерны только низкотемпературные концентры, местами мы имеем дело с полуэффузиями без ясно выраженных пневматолитических фаз.

Сложнее складывается история восточносибирских дуг, возрастные соотношения коих не вполне ясны: новые идеи по хронологии поднимают их до мезозойских и даже до альпийских движений. Сейчас мы совершенно определенно относим к альпийским поясам Монголо-Охотский пояс, как бы заканчивающий, по А. Н. Чуракову, на востоке ту гирлянду, которая с запада примыкает к более древним сибирядам, окаймляющим Сибирский шпт. Несмотря на определенные возражения такого исключительного знатока Сибири, как В. А. Обручев, я сохраняю понятие об этом поясе,

хронология которого будет расшифрована, очевидно, только в дальнейшем; его геохимические и минералогические особенности настолько специфичны, что я не могу отказаться от идеи единства этой мощной и закономерно построенной геохимической системы¹.

Существование Монголо-Охотского пояса в последних работах Геологического комитета подтверждается целым рядом очень серьезных доказательств, которые углубили понятие этого пояса, установив его в центральных частях Забайкалья и продлив его как на юг в область Акшинско-Ононского района, так и на северо-восток в верховья Буреи и Зеи. Характерными чертами этого пояса, тянувшегося как одна из тишичных гирлянд простирания Яблонового хребта, являются его необычайная закономерность и наличие всех концентров, начиная от глубинных пегматитов² и кончая гидротермалитами с их метасоматическим воздействием наиболее низкотемпературных³ фаз.

Наконец, на северо-востоке Сибири намечается область крупных мезозойских процессов (С. В. Обручев), геохимия которых еще неясна и которые в своей геохимической истории, может быть, стоят ближе к Америке, чем к Азии.

Кавказиды (альпийские процессы). Тектонические процессы, известные под именем альпийских движений, охватили, особенно в середине третичного времени, огромные пояса земного шара, положив начало современным широтным цепям Альп, Гималаев и других горных хребтов Евразии. Они частью подмяли и смяли старые складчатые пояса, частью собрали в складки, частью, путем дизъюнктивных дислокаций, подняли старые образования клиньями на разные высоты. Их предвестниками в геосинклинальных понижениях широтного моря Фетиды (Зюсс) были движения конца мела и начала третичной эпохи; наоборот, их отражениями и наследниками являлись движения и процессы послетретичного времени вплоть до современной эпохи. Кавказиды, как я их называю в пределах западной части Союза, для нас начинаются в Крыму, где они выражены довольно чисто, связываясь с тавридами в единое геохимическое целое; далее они определяют линию Кавказа со связанным с нею магматическим хинтерландом Закавказья, перебрасываются через Каспийское море, чтобы в высотах Красноводска и хребтах Куба-Тау, Кюренъ-Даге и Комет-Даге получить свое дальнейшее течение и соединиться со складками Мангышлака, скрывающимися под сарматом Устюрта; далее на восток они частью уходят в северные предгорья

¹ Вопрос о хронологии отдельных поясов сложнее, чем принято думать. Положение тектонических движений разных возрастов вызывает наложение, повторение и перегруппировку и химических образований, и нередко единый в своем геохимическом построении пояс может оказаться хронологически и тектонически много сложнее. Определенные очаги магматических выделений носят определенный геохимический характер, и геохимическое сходство может сказываться на химическом комплексе различных моментов магматизма этого очага, охватывая огромные промежутки геологической истории. В свете этих идей следовало бы пересмотреть геохимическую историю отдельных поясов. Конечно, при такой концепции мы подходим к несомненному осложнению в общей постановке вопроса, данной мною в описании пегматитов, о более или менее одинаковом первичном составе отдельных магматических очагов. Но, конечно, не надо забывать, что эти очаги являются уже продуктами магматической, ликвационной и частично кристаллизационной дифференциации, а поэтому их первичное избирательное обогащение определенными геохимическими ассоциациями вполне вероятно и возможно.

² В монгольской части пояса мы видим усиление фазы С по моей номенклатуре (т. е. еще более глубинных частей), тогда как фазы В—С в характерном их развитии мы встречаем только в древних пегматитовых зонах Прибайкальского архейского пояса.

³ А. Ферсман. Монголо-Охотский пояс. «Поверхность и Недра», 1926, № 3, 7.

п хребты Гиндукуша, снова появляются в Средней Азии, определяя, с одной стороны, слабые пликативные процессы Алая, переходящие к югу в сильно складчатую альпийскую область Памира, и постепенно сменяясь на сбросовые дизъюнктивные дислокации там, где они налегают на уралиды с их сложной механической системой. Это альпийское омоложение захватило частично даже Урал, Донецкий бассейн и «древние острова» Кызыл-Кумов, постоянно проявляясь сенонскими движениями в палеозойских зонах.

Это омолаживание (вертикальное) рельефа в третичное и даже послетретичное время шло и дальше к востоку, запутываясь в сложной картине геологии и геохимии Алтайско-Кузнецкого края, чтобы снова получить свое закономерное течение в Прибайкалье, Забайкалье и Северной Монголии, где система горстов и глыб опускания снова совершенно определенно омолодила более древний рельеф и древнюю геологию.

Уже из этой характеристики должны быть ясны и некоторые основные черты геохимии кавказид. С одной стороны, как образования молодых поверхностных пликативных процессов, подверженных еще малой эрозии, — они должны по преимуществу характеризоваться наружным концентром процессов, т. е. в них должны преобладать не только вообще гидrolиты, но низкие термы с сурьмой, ртутью и мышьяком, — термы, богатые угольной кислотой, т. е. карбонатные, реже баритовые жильные процессы, минеральные источники, углекислые мофеты и т. д. Этот тип геохимических процессов, действительно, проходит красной нитью через Кавказ, Копет-Даг и Среднюю Азию.

Вторая характерная черта кавказид — это их наложение на более древние геохимические провинции или пояса и связанная с этим новая миграция (ремиграция) элементов этих более древних геохимических циклов. Менее характерно это положение в Крыму, где мы имеем дело с очень слабой геохимической дифференциацией; не очень характерно это и для самого Кавказа, но зато с исключительным своеобразием проявляется в Средней Азии, где мы имеем несомненное наложение кавказид на уралиды и геохимическую переработку последних первыми. Если в самом Тянь-Шане мы реже наблюдаем такие процессы [хотя своеобразные кокардовые свинцовые месторождения восточных частей русского Тянь-Шаня, несомненно, говорят нам об альпийской миграции этого элемента (Н. М. Проккопенко)], то необычайно резко они проявляются по линии тектонических сбросов Фергано-Алая, где кавказиды дают начало не только типичным для них скоплениям элементов (ртуть, сурьма, барий, угольная кислота, кремнезем), но и подвергают вторичной миграции элементы уралид (ванадий, барий, цинк, молибден).

В отношении генезиса эта идея имеет очень большое значение и выявляет ряд моментов, до сих пор оставшихся загадочными в геохимии Средней Азии¹.

Современные геохимические пояса, в общем, следуют альпийским процессам кавказид, причем наиболее характерными являются выделения углекислоты (наиболее поздние стадии постагматических процессов). Таковы — вулканический пояс Кавказа и минеральные источники его предгорий, продолжения этих же геохимических процессов по другую сторону Каспия (горячие термы Челекена), далее в виде аналогичных горячих терм прослеживаются в ряде термальных линий Копет-Дага, Памира, Алая и Тянь-Шаня, связываясь с выделениями лету-

¹ Очень большую геохимическую роль будут играть мало изученные мезо- и неозойские процессы Приморья.

чих компонентов, в том числе и редких газов. Находя частично выход в источниках Горного Алтая, современный геохимический пояс того же типа проявляется с особой резкостью снова в районе Забайкалья (отчасти и Прибайкалья), уходя на север в мало изученные районы Витимской тайги. Паконец, наиболее ранний и поэтому сернистый тип геохимических процессов мы встречаем на Камчатке, в той крайней гирлянде современных вулканов, которая окружает Центральный Сибирский щит, начиная с самой Камчатки и кончая дугами Японских островов и Формозы. Надо сказать, что современные геохимические пояса вулканического типа, несмотря на огромное научное и практическое значение, изучены необычайно плохо; по геохимии, например, Камчатки мы ровно ничего не имеем, кроме общих описаний (Конради, Баклунд), только намечающих проблемы большого геохимического интереса. Даже современные кавказские геохимические процессы, несмотря на их теснейшую связь с богатейшими минеральными водами, остаются почти совершенно непонятными, а геохимия мофетно-сульфаторных выделений только сейчас начинает химически изучаться (А. Н. Огильвп, И. Д. Курбатов и Э. Э. Карстенс — Минеральные Воды; П. И. Лебедев — Алагёз).

3. Современные климатические зоны

Переходя к этой второй важнейшей группе геохимических систем Союза, мы прежде всего наталкиваемся на необычайную скудость геохимических данных при анализе зон, вытянутых в широтном направлении. Наше почвоведение, при всей огромной его исторической заслуге, тем не менее построено было на анализе преимущественно средних широт, и поэтому целые большие геохимические циклы оказались вне детального геохимического обследования.

Арктическая (тундровая) зона. Геохимия арктических областей вообще еще совершенно не изучена, и мы даже не можем себе представить картины тех геохимических процессов и их закономерностей, которые типичны для областей, лежащих за пределами Полярного круга как в Арктике, так и в Антарктике. Этот исключительный пробел одинаково касается как материковых, так и подводных образований, хотя в последнем направлении работы «Метеора» в Атлантическом океане и «Персея» в Ледовитом дают, несомненно, ряд ценных фактических установок.

Геохимия арктических зон определяется прежде всего медленностью геохимического процесса, отсталостью его от процессов механического разрушения и накопления дисперсно-коллоидальных масс. Очень характерные кислые почвенные реакции вызывают процессы переноса металлов в водные бассейны, а коллоиды алюминия и железа в виде гидрозолей таким же образом накапливаются в водоемах. Кристаллизация воды и льда в ее своеобразных формах, выпветы солей, напоминающие нам иногда выпветы жарких пустынь, наконец, особые геохимические реакции низких температур в местах впадения в морские бассейны рек с карбонатными водами¹ или мощные диатомовые процессы в пресноводных бассейнах (при местном потеплении) — все это вызывает ряд своеобразных геохимических процессов нашей арктической и тундровой области.

¹ Я склонен именно к этому процессу относить еще совершенно неизученное явление образования морских рогов тек, типичное для полярных морей (Белое море, Баренцово море, побережья Ледовитого океана в Сибири и т. д.). Возможно, что мы в данном случае имеем дело с первичным гейлюсситом, легко переходящим путем отделения соды в чистый карбонат кальция.

Подзолисто-лесная зона. Почвенные процессы нашей подзолистой зоны изучены хорошо, но скорее только морфологически, и их геохимия и связь с общими геохимическими процессами выявлены очень слабо. Тем не менее, общий ход процесса ослаблен к югу кислотной реакцией; накопление горизонтов кремнезема и окиси железа (ортштейна) определяет общий геохимический тип. К этой зоне приурочены, по картам В. В. Алабышева, сапропелевые озера частью с железистыми, частью с карбонатными осадками и весьма значительными скоплениями сапропеля.

Черноземно-степная зона. То же можно сказать и про степную зону, частью с мощным лёссовым покровом, частью геохимически тесно связанную с подстилающими породами. Область огромного культурно-исторического значения, с севера окаймляющая замечательную зону соляных озер.

Озерная зона является одной из наиболее характерных зон Евразии, отделяя или субтропическую область на западе или пустынную на востоке от степных более северных зон. Ее геохимическое и промышленное значение еще недостаточно учтено, а между тем она является местом накопления разнообразных солей калия, натрия, магния и кальция в качестве катионов и хлора, брома, иода, серы, угольной кислоты в качестве анионов, своеобразных процессов образования грязей и коллоидальных сульфидов железа. Геохимия озерных процессов, благодаря блестящим исследованиям Н. С. Курнакова и В. П. Ильинского, дает нам не только картину стационарного их состояния, но и раскрывает динамику озерного процесса, в котором последовательно идет накопление в растворах сначала углекислых соединений калия и магния и отчасти натрия (фиксирующихся на дне), потом — сернокислых (по большей части одновременно с восстановлением их в сероводород и потерей сероводорода) и, наконец, галоидных (с накоплением хлористых кальция, калия и натрия и т. д.). Процессы метаморфизации соляных растворов идут в этом направлении, причем одни озера являются более ранними, предшествуя второму этапу, отвечающему по составу нашим морям, другие — в окончательном виде дают начало озерам с хлористым кальцием (типа перекопских). Во всей Средней Азии по преимуществу наблюдаются начальные стадии, чем и объясняется накопление в ней сульфатных солей.

Соляной пояс тянется на огромном протяжении, и, по всей вероятности, мы найдем его продолжение и на западе — в районе Венгерской низменности, и на востоке — в Китае. На нашей территории он начинается пограничными с Румынией лиманами, затем переходит в северный Крым и Перекоп, далее следует параллельно северному предгорью Кавказского хребта вплоть до озера западного берега Каспия, далее через Карабогаз и оз. Молла-Кара перебрасывается в озерные водоемы среднеазиатских пустынь, образуя десятки тысяч озер, начиная с «морей» — Арала и Балхаша и кончая такырами и временными шорами (сорами). Эта зона расширяется в Западной Сибири, охватывая громадные пространства Казахстана и Кулундинской степи, с ней мы снова встречаемся на берегах Енисея в Минусинском районе и после перерыва, созданного Прибайкальским узлом, вновь находим ее в юго-восточном Забайкалье и в Северной Монголии. Трудно себе представить более глубокую и разнообразную геохимическую задачу, чем изучение этой живой физико-химической диаграммы, которая до сих пор не только не проанализирована, но даже морфологически не описана и не учтена. У нас до сих пор нет хотя бы элементарного списка озерных бассейнов и их геохимической карты, нет и самого схематического распределения их по типам химических процессов. Между тем, нет сомнения в том, что озерная зона определяет собой

огромные и притом совершенно специфические богатства для химической промышленности, и было бы необычайной ошибкой не связывать строительство химических центров с теми частями этой зоны, которые пересекаются металлическими поясами с их скоплениями сульфидов.

Пустынная зона. Вслед за озерной зоной к югу, между степями с одной стороны и сложной системой по преимуществу молодых или омоложенных хребтов с другой, протягивается исключительного интереса пустынная зона, отдельные элементы которой мы видим еще в предгорьях Кавказа, но которая получает свое развитие к востоку от Каспия, проходя через Кара-Кумы и Кызыл-Кумы, Бедпак-Дала, пустыни низовий Балхаша, перебрасываясь далее в пустыни Восточного Туркестана и Внешней Монголии (Гоби). Геохимия этой пустынной зоны только начинает выявляться, но для нее собрано пока еще мало фактических данных (А. Е. Ферсман, Д. И. Щербаков, Б. А. Федорович, А. Ф. Соседко, А. Димо, В. А. Дубянский); в моих работах я старался выдвинуть один характерный признак пустынной геохимии — дифференциацию легко- и труднорастворимых веществ и самостоятельные пути миграции и тех и других. Основные черты геохимии пустынной зоны можно охарактеризовать следующими пунктами¹:

- 1) Пространственное разобщение легко- и труднорастворимых веществ.
- 2) Отсутствие стока и связанное с этим накопление и периодическое перемещение легкорастворимых соединений.
- 3) Накопление электролитов на поверхности и коагуляция ими гидрозолей.
- 4) Отсутствие гуминовых веществ.
- 5) Щелочной характер почвенных процессов.
- 6) Псевдотермальный характер поверхностных процессов.
- 7) Движение растворов к поверхности и вызванное этим образование кор и эффоресценций.
- 8) Растворяющая и гидролизующая деятельность воды при высокой температуре.

4. Древние геохимические поля и зоны

К сожалению, имеющийся материал слишком мало проработан, для того чтобы дать полное геохимическое освещение этому исключительно важному вопросу. Я кратко перечислю лишь наиболее важные геохимические поля с основными их чертами.

1) **Московское каменноугольное поле** с отдельными остатками юрских отложений геохимически детально освещено в моей Геохимии России (1922). Помимо нормальных отложений и диагенетических процессов в них, мы наблюдаем ряд явлений катагенеза как в период перерыва до московского яруса с образованием кольца плавикового шпата (флюорита), так и при наложении разнородных сред глинистых продуктов с окисляющимися колчеданами и лежащими под ними карбонатными породами.

2) **Волжско-пермское поле** (см. А. Е. Ферсман. Геохимия России) характеризуется таким же любопытным сочетанием физико-химических процессов в глубоководных бассейнах, освещенных в работах Ноинского и Кротова. Интересна роль стронция в этих процессах, восста-

¹ А. Е. Ферсман. Geochemische Migration der Elemente, II (Geochemie der Wüste) [Геохимическая миграция элементов, II (Геохимия пустынь)], 1930, стр. 72.

новительные реакции углеводородов с образованием серы и своеобразная и интереснейшая миграция магния с фиксацией в фазы: диагенеза — в виде доломитов, катагенеза — палыгорскита и гипергенеза — сульфата Mg.

3) Восточно-приуральская зона носит очень закономерный характер, отвечая наступившим после пермского моря пустынным образованиям с процессами отложения солей соляных озер, с одной стороны, и некоторыми глубинными пароксизмами заканчивающегося магматического процесса и обрывами восточного края опустившейся части большой Русской кристаллической платформы — с другой. Отсюда — вся геохимия этой интереснейшей зоны с ее скоплениями меди, ванадия, хрома и серы, с одной стороны, и натрия, калия, магния, хлора, брома и серы и углеводородов (нефти, битумов, угля) — с другой.

4) Украинское третичное поле. Геохимически мало изучено, хотя охватывает огромные области (начиная с мела) отложений Украины, Крыма и Северного Кавказа. Между тем, некоторые реакции имеют исключительное геохимическое значение (накопление марганца и железа, отчасти фосфора и стронция).

5) Предкавказские нефтяные зоны. Равным образом нуждаются в очень детальном геохимическом анализе, которого пока нет, и нефтяные, сопочные и газовые зоны Кавказа и их продолжение на восточном берегу Каспия, где на Боя-Даге и о. Челекене мы имеем интереснейшую, но и весьма сложную геохимическую картину, набросанную мною в статье в журнале «Природа» (1929, № 7/8). Перед нами — зоны опускания вдоль восставших из геосинклинали хребтов, но подогретые снизу воздействием молодых третичных вулканических масс.

6) Мезозойские, третичные и послетретичные поля Средней Азии. Весьма замкнутая геохимическая провинция с очень интересными мелководными, прибрежными и озерными отложениями (сера, гипс, соль, глауберова соль, целестин, барит, кремний и пр.) в отдельных опустившихся бассейнах.

7) Верхнепалеозойские и мезозойские поля Кузнецкого и Тунгусского бассейнов и трапповых покровов. Геохимическое исследование еще почти не коснулось этих огромных областей с появлением трапповых эффузий, во многих геохимических особенностях напоминающих нам траппы Деккана (графит — контактный процесс, магматическая ликвидация пирротина, гидротермальные пеолитовые процессы, накопление в осадочных свитах соли, соединений магния и стронция и, наконец, грандиозные скопления угля). Очень важны южные заливы поля с мощными угольными бассейнами.

8) Якутское мезозойское поле, примыкая к предыдущему, охватывает огромные территории Сибирского щита, перекрытые палеозойскими и мезозойскими отложениями, смятыми по краям щита, измененными частично трапповыми эффузиями. Геохимически очень мало изучено.

5. Геохимические эпохи и провинции СССР

Геохимические эпохи Евразии в части, приходящейся на СССР, могут быть сравнительно легко выявлены и сведены к следующим основным моментам:

1) Архейские щиты и архейские и мезозойские (сибириды) пояса — характерны соединения: SiO_2 , Fe, Na, Ta, TR, F, P, Ti, Au.

2) Герцинские (уралиды, тяньшаниды) и мезозойские пояса — Pb, Cr, Ni, Fe, Cu, S, F, Be, Li, Sn.

3) Мезозойские озерные и мелководные отложения — S, CaSO₄, Sr, Ba.

4) Альпийские пояса (кавказиды) (в Сибири — излияния траппов) — Sb, Hg, Ba, As, S (слабее Zn, Cu, Pb).

5) Современные пустынно-озерные процессы — Na, K, SO₃, Br, J, углеводороды.

Конечно, помимо этих отдельных наиболее важных геохимических эпох, мы имеем еще целый ряд геохимических моментов, освещенных в значительной степени на предыдущих страницах, но все они имеют сравнительно второстепенное значение.

Гораздо труднее ответить на второй вопрос о геохимических провинциях Союза, между тем он имеет особенно большое и теоретическое и практическое значение. Как мною было выше указано, вопрос о геохимических провинциях нуждается еще в методологической проработке, но мы можем в первом подходе наметить нижеследующие геохимические районы СССР, уточнив и значительно развив идею районирования, намеченную мной в 1922 г.:

- 1) Фенноскандинавский щит.
- 2) Неоархейский и эопалеозойский пояс Кольского полуострова.
- 3) Кембро-девонское плато северо-запада.
- 4) Московский каменноугольный бассейн.
- 5) Среднее Поволжье (пермские моря и суша).
- 6) Прикамье и западное Приуралье.
- 7) Третичное и меловое поле Украины.
- 8) Южный кристаллический щит (Воронежский и Подольский) с его палеозойскими свитами.
- 9) Южная геосинклиналь и герцинские складки.
- 10) Крым и Кавказ.
- 11) Закавказье.
- 12) Озерная зона Европейской части СССР.
- 13) Кавказиды Средней Азии и Памиро-Алай.
- 14) Урал (Новая Земля и Вайгач) и Тиман.
- 15) Уралиды центральные и их части под Западно-Сибирской низменностью.
- 16) Уралиды восточные (Тянь-Шань и его система).
- 17) Прииртышско-Алтайский край.
- 18) Пустынно-озерная зона Средней Азии.
- 19) Кузнецко-Минусинский край (Кузнецкий Ала-Тау, Салаир, Западные Саяны).
- 20) Сибириды (пояс Таймыр — Енисей — Байкал — Мама — Алдан).
- 21) Прибайкалье, Хамардабан, Восточные Саяны.
- 22) Монголо-Охотский пояс.
- 23) Сибирский щит и его мезозойский покров.
- 24) Камчатско-Сахалинская дуга.
- 25) Приморская область.
- 26) Колымо-Индигоирский и Чукотский края и др.

Этим дается как бы первая схема геохимического районирования СССР, но необходимо иметь в виду, что многочисленные процессы наложения и пересечения различных геохимических систем весьма затрудняют точное проведение по существу искусственных границ. Как раз к этим явлениям перекрытия и переходу в следующей главе.

У. УЗЛОВЫЕ ТОЧКИ ПЕРЕСЕЧЕНИЯ ИЛИ НАЛОЖЕНИЯ ГЕОХИМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Как было указано, я называю геохимическими узлами районы пересечения двух разнородных систем. Мы сейчас хорошо знаем, что построение нормального геохимического пояса или геохимического осадочного цикла идет строго определенным путем, подчиняясь более или менее определенным геохимическим и физико-химическим законам. Если бы так протекали процессы на всем земном шаре, то мы имели бы еще более ограниченное количество и минеральных видов и еще меньше геохимических сочетаний, определяющих расселение и концентрацию отдельных элементов, чем то, которое нам сейчас известно (т. е. меньше 1500). Только *перекрывание* различных систем вызывает новые, не вытекающие из единого процесса сочетания условий, а они в свою очередь вызывают новые, *особые пути миграции химических элементов и новые их сочетания*. Отсюда нам делается совершенно ясным, что наиболее своеобразные геохимические системы, наиболее редкие и ценные комплексы и, наконец, наименее обычные накопления каких-либо особо дисперсных (рассеянных) элементов наблюдаются именно в геохимических узлах.

Если мы посмотрим на прилагаемую схематическую карточку, то увидим, что наблюдается наложение и пересечение нескольких типов: наиболее характерным является наложение пояса на пояс, пересечение климатическими зонами поясов (в особенности столь геохимически важными зонами, как озерно-пустынные) и, наконец, глубинные разломы щитов наиболее молодыми поясами. Рассмотрим наиболее характерные геохимические узлы Союза (с запада на восток).

1. Кольский узел

Намечается как совершенно новое явление и представляет случай наложения на древний архейский щит неархейского и частично каледонского поясов. В своих схемах Хольтедаль и Седергольм, загибая к северу каледонские цепи, вместе с тем рассматривают, как и Вегман северную Фенноскандию как район наложения каледонских движений на древние эопалеозойские системы. Мы имеем очень интересное сочетание, несколько напоминающее второй узел и приносящее исключительную дифференциацию элементов, начиная с ультраосновных пород и кончая сильно щелочными, основными и кислыми комплексами. Своеобразные, единственные в мире сочетания элементов характеризуют этот узел (железо, титан, никель, медь, сера, фосфор, алюминий, натрий, цирконий, фтор, хлор). Большие энергетические запасы водной энергии увеличивают промышленную ценность этого района.

2. Донецкий узел

Очень интересный ряд перекрещивания и наложения различных геохимических систем определяет его исключительную промышленную ценность. С одной стороны, мы имеем здесь линию разлома древнего щита, очень характерного по своим железным скоплениям первичного характера (Кривой Рог, Курский район); с другой стороны, здесь сопряжены герцинская геосинклиналь со всеми позднейшими чертами герцинского и эомезозойского пояса (уголь, металлы, ртуть и сурьма) и вытянутое вдоль древнепермских хребтов предгорное поле с солью и гипсом. Если бы сульфидный процесс был резко выражен, то мы имели бы единственную область по сочетанию сырья и металла. Огромные угольные богатства обеспечивают энергетику края.

3. Ферганский узел

Характеризуется наложением трех элементов: герцинского с полиметаллическими накоплениями (в барите) и Тяньшанским типом медных и железных руд, альпийских кавказид с образованием скоплений ртути и сурьмы, плавикового шпата и вторичной перекристаллизацией герцинских элементов — барита, молибдена и более бедных сульфидов (меди и цинка) мезозойско-третичного пустынного поля с серой и стронцием, углеводородами и, наконец, пустынной зоны с накоплением соли, серы, гипса, меди в песках; весьма значительны современные запасы водной энергии в восточной части¹.

4. Урало-Иртышский узел

Представляет один из интереснейших геохимических узлов Союза, только начинающий сейчас выявляться: в основе лежит герцинский пояс, необычно развитый и богато представленный, который пересекается, тоже в исключительном развитии, озерной и пустынной зоной, и, наконец, на герцинские отложения налагает мезозойское поле, дающее энергетический источник наравне с гидроэнергией Иртыша и рек Алтая. Район Акмолинска (Караганда, Атбасар) намечает связующее звено между Уралом и Кузнецким бассейном.

5. Кузнецко-Минусинский узел

Очень мало еще известный или, вернее говоря, еще необобщенный. Мы имеем здесь, действительно, сложнейшее наложение архейских, каледонских (сибирид) и особенно герцинских поясов, к чему присоединяются палеозойские и мезозойские поля (дуги) и озерные поля, зажатые в омоложенных хребтах, богатых запасами водной энергии. Геохимически — это область концентрации углерода, железа, меди и золота.

6. Уралиды и Приуралье

Сам Урал представляет совершенно исключительное сочетание геохимических процессов, и, в противоположность другим областям, мы в нем не видим резко выраженного наложения и пересечения геохимических систем. Но его значительные богатства определяются не только самим герцинским магматическим поясом, очень сильно геохимически дифференцированным, но и двумя полями, окаймляющими его, — пустынной зоной эомезозоя с солью и нефтью с западной стороны и третичным морем с востока, давшим боксит, трепел, каолин, охру и целый ряд вторичных руд железа и марганца.

7. Забайкальский узел

Определяется пересечением Монголо-Охотского пояса с его повторным наложением и омоложением процессов (может быть, от эопалеозоя до позднего мезозоя) с соляно-озерным поясом Северной Монголии. Харак-

¹ Замечательное наложение трех специфических геохимических процессов: герцинского, альпийского и пустынного вызвало в Средней Азии наличие совершенно особенных специфических минералов и полезных ископаемых (глауберова соль, витерит, озокерит и др.).

терные элементы: золото, цинк, молибден, железо, свинец и другие. Интересны сода и сульфаты натрия. Хуже обстоит дело с запасами энергетическими.

8. Закавказье

Столь же обособленно, как и Приуралье, стоит геохимически и Закавказье, где проявляются черты самых разнообразных процессов и где сочетаются магматические явления молодого пояса Кавказа с геохимическим полем опускания (нефть, уголь, марганец). Довольно богатые энергетические ресурсы (белый уголь).

VI. ГЕОХИМИЯ И ПРОМЫШЛЕННЫЕ ЦЕНТРЫ

После того как мы подробно разобрали отдельные геохимические системы, мы можем перейти к последней, заключительной главе, но вместо с тем и самой важной. В ней я делаю попытку применить геохимические идеи к проблемам географии минерального сырья и включить в идею создания промышленных центров идею геохимии как важной слагающей. Я должен, однако, сразу оговориться, что было бы огромной ошибкой строить географию промышленности на одном минеральном сырье и считать эту слагающую единственной и доминирующей; мы знаем, что одинаковую, если в некоторых случаях не большую роль играет в этом отношении энергетика¹, но и из этих двух элементов — сырья и энергетики — не всегда рождается правильная экономика промышленности, есть целый ряд моментов современной промышленной географии, которые много шире этих двух предпосылок, и поэтому само решение вопроса о центрах промышленности лежит вне более специальных задач моего исследования. Центр сырья не всегда будет центром промышленности, но он является одним из важных факторов его географии.

Бессистемная картина современной геологии должна быть заменена геохимически и экономически обоснованным планом. Именно к этому и сводится мое настоящее исследование; оно выводит из глубочайших законов геохимии проблемы промышленного характера и, подводя под наше строительство фундамент сырья, обуславливает его не случайно накопленными фактами или открытиями, а теоретически продуманной общей схемой.

По линии поясов, зон, полей и дуг должна работать научно-исследовательская мысль, и мне кажется, что приведенная рабочая гипотеза позволит более систематически и более закономерно направить и экспедиционную деятельность тех многочисленных партий, которые работают в настоящее время над изучением производительных сил нашей страны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ, ВЫВОДЫ, ПОЖЕЛАНИЯ

Мы можем сейчас наметить основные выводы наших построений:

1. Геохимия, как наука о миграции и распределении отдельных химических элементов, определяет и законы накопления и рассеяния, в частности, и тех веществ, которые мы называем полезными ископаемыми.

2. Три основных фактора определяют законы современного распределения химических элементов — геологическая история, почвенно-климатическая зональность и современные тектоника и орография.

¹ Это положение применимо особенно потому, что успехи передачи электроэнергии в значительной степени расширяют границы влияния отдельных природных энергетических центров.

3. В результате сочетания этих факторов возникают определенные геохимические системы, а именно — геохимические *щиты, пояса, поля, зоны и концентры*, а также к ним относятся и геохимические *провинции, циклы и эпохи*.

а) Геохимическим щитом мы считаем более устойчивые и механические и геохимические платформы архейского возраста, отвечающие по своему геохимическому комплексу глубинным процессам.

б) Геохимическими поясами — области тектонического нарушения, окаймляющие более устойчивые щиты и представляющие районы интенсивной геохимической миграции.

в) Геохимическими полями — определенные районы геохимических процессов, связанные преимущественно с водными и материковыми накоплениями и перемещениями химических масс.

г) Геохимическими зонами — широтные климатические зоны со всей совокупностью вызванных ими специфических особенностей миграции элементов почвенного покрова и биосферы.

д) Геохимическими концентрирами — зональное распределение химических образований вокруг остывающих массивов, связанное с постепенным падением температуры от очага к периферии (радиально, т. е. по глубине и в сторону).

е) Геохимические циклы — понятие, объединяющее всю совокупность геологических явлений, связанных с определенной замкнутой геологической причиной.

ж) Геохимические провинции — области, геохимически однородные и характеризующиеся определенными ассоциациями химических элементов.

з) Геохимические эпохи — периоды специфического накопления или отдельных элементов, или целой ассоциации элементов.

4. Геохимическая характеристика Союза может быть дана лишь на фоне геохимии Евразии, но слабое геохимическое освещение Азиатского и Европейского материков не позволяет пока в достаточной мере определенно наметить черты геохимии Союза.

5. Основными и геохимически наиболее важными геохимическими системами СССР можно считать:

а) *щиты* — Фенноскандинавский, Украинская плита и Восточно-Сибирский;

б) *пояса* — неоархейский, зозойский и каледонский (сибириды), герцинский (уралиды), киммерийский (частью тавриды) и альпийский (кавказиды);

в) *поля* — Приуральское, Восточно-Сибирское и др.;

г) *зоны* — тундровая, лесная, степная, озерно-пустынная и горные зоны южных цепей;

д) *эпохи* — герцинская, зомезозойская и альпийская.

6. Главнейшие геохимические процессы, определяющие основные линии распределения элементов: магматические процессы архея и палеозоя, особенно герцинского времени, тектоническая история третичной и новейшей истории и климатическая зональность этих же периодов.

7. Пересечение отдельных самостоятельных геохимических систем и их взаимное наложение приводят к особому накоплению и сочетанию элементов и, в частности, к особому накоплению полезных веществ.

8. Точки пересечения или наложения геохимически закономерных систем мы называем *геохимическими узлами*, причем особенностями этих узлов является нередкое в них сочетание разнообразных геохимических ассоциаций.

9. Узловые точки в СССР определяются прежде всего пересечением больших герцинских и альпийских поясов, широтными зонами, наложением разных поясов друг на друга и т. д.

10. Наиболее характерными узловыми точками геохимии СССР надо считать: пересечение уралид с кавказидами в Средней Азии, наложение пустынных зон и полей на герцинский пояс (Киргизские степи), взаимное наложение нескольких поясов (Забайкальский или Кузнецко-Минусинский узлы).

11. Геохимические узловые точки намечают места наибольшей концентрации различных элементов и потому предопределяют основные точки концентрации практического сырья.

12. Геохимические данные должны направлять поисковую и разведочную работу в соответствии с общими геохимическими проблемами.

13. География промышленных центров должна учитывать геохимические законы как определяющие распределение основных видов сырья и источников энергии.

Приведенные выводы носят лишь схематический характер и не могут быть в настоящее время полностью обоснованы достаточным количеством точных данных. Геохимическое изучение Союза только начинается, и старые схемы, суженные обыкновенно только до изучения месторождений отдельных полезных ископаемых, оказываются недостаточными.

Поэтому в заключение я считаю нужным подчеркнуть ряд *пожеланий* для дальнейшей исследовательской работы:

1) Необходимо систематическое геохимическое изучение отдельных территорий Союза на фоне их общегеологического, петрографического и минералогического исследования.

2) Особое внимание в этом исследовании необходимо обратить на весьма детальное выборочное изучение некоторых типичных территорий, выводы о которых можно было бы перенести на аналогично построенные области.

3) Из теоретических проблем особого внимания заслуживает подведение теоретической базы под идею геохимических концентров и проработка понятия о геохимических провинциях.

4) Наибольшее практическое значение имеет исследование геохимии геохимических поясов.

5) Из отдельных заданий необходимо выдвинуть следующие геохимические проблемы:

а) Геохимия пегматитов и их дериватов Южного кристаллического щита.

б) Изучение архейских и эопалеозойских (каледонских?) магматических процессов Кольского полуострова.

в) Всестороннее геохимическое изучение золотых месторождений.

г) Изучение погруженных геохимических поясов в Кызыл-Кумах и Кара-Кумах.

д) Геохимия Кавказа и в отдельности геохимия Главного хребта и Дзирульского массива.

е) Геохимия кавказид в предгорьях Алая.

ж) Изучение тяньшанского и па железо-медных комплексов.

з) Изучение геохимии Магнитогорска, Тельбеса и Абакана (как магматически-метасоматического типа).

и) Геохимия пегматитовых и пневматолитовых месторождений Забайкалья.

к) Всестороннее исследование геохимического пояса Хамардабана (Прибайкалье).

л) Пегматитовый пояс Туркестано-Алайского хребта.

- м) Детальное изучение геохимии Крыма.
- н) Геохимия каменноугольного бассейна (Подмосковного).
- о) Изучение геохимического поля Приуралья.
- п) Геохимия восточного склона Урала в его перекрытой части.
- р) Геохимия вулканического поля Камчатки и Кавказа.
- с) Геохимия соляного пояса, особенно в Урало-Кузнецком районе.
- 6) Внедрение геохимических исследований в поисковую и разведочную деятельность всех партий и организаций.
- 7) Усиление поисковой деятельности по дуге сибирид, по стыку уралид с кавказидами.
- 8) Углубленное исследование наложения кавказид на уралиды в районе Алая и Северного Памира с продолжением дуг в Кызыл-Кумы.
- 9) Геохимия полярных областей и совершенно еще неизученных химических реакций Арктики.
- 10) Выявление геохимии пустынь Средней Азии и Монголии.
- 11) Изучение физико-химического равновесия озерной зоны в связи с общей геохимической обстановкой и с историей образования отдельных бассейнов.

Л и т е р а т у р а

- А. Д. А р х а н г е л ь с к и й. Введение в геологию Европейской России. Москва, ГИЗ, 1923.
- Л. С. Б е р г. Основы климатологии. ГИЗ, 1927, стр. 203 (климатические пояса).
- А. А. Б о р и с я к. Геологический очерк Сибири. 1923, изд. М. и С. Сабашниковых, 1—140.
- А. П. Г е р а с и м о в. Кавказская складчатость и вулканы. Природа, 1922, №№ 3—5.
- А. П. К а р п и н с к и й. Очерки геологического прошлого Европейской России. «Классики естествознания». Природа, 1910, 1—148.
- Д. В. Н а л и в к и н. Очерк геологии Туркестана. Москва — Ташкент, 1926.
- В. А. О б р у ч е в. Геология Сибири. Москва, ГИЗ, 1927.
- А. Е. Ф е р с м а н. Геохимия России. I. Европейская часть СССР, Научн. хим.-техн. изд. 1922.
- А. Е. Ф е р с м а н. Химические проблемы промышленности. Научн. хим.-тех. изд., 1924, 1—52.
- А. Е. Ф е р с м а н. Геохимия Сибири. Сибирская сов. энциклопедия, I, 1929, 651—656.
- А. Е. Ф е р с м а н. Минералогия и геохимия Южного Урала. Труды I Всесоюзной конференции по размещению производительных сил СССР, т. IV, Урало-Кузнецкий комбинат, М., изд. Об-ва изучения Советской Азии, 1933, 49—52. (Основные идеи были напечатаны в «Природе» в 1931 г., № 3.)
- А. Е. Ф е р с м а н. Geochemische Migration der Elemente. [Геохимическая миграция элементов]. Abhandl. prakt. Geol., 1929—1930, Lief. XVIII, 116 и XIX, 86.
- А. Н. Ч у р а к о в. История развития наших представлений о строении древнего течения Азии. Изв. Геол. ком., 1927, XLVI, 1—25.
- E. A n d r e w s. Structure unity of the Pacific Region-Evidence of ore deposits. Econ. Geol., 1925, XX, № 8.
- E. A r g a n d. La tectonique de l'Asie. C. R. Acad. Sci., XIII Congrès géol. de 1922, I, Bruxelles, 1928 (тектоническая карта Евразии).
- S. B u b n o f f. Geologie von Europa. Bd. I (Osteuropa), Berlin, 1926, B. II (Kaledoniden und Varisciden), 1930.
- L. d e L a u n a y. La géologie et les richesses minérales de l'Asie. Paris, 1911.
- S. W. G r e g o r y. The structure of Asia. London, 1929, 1—227.
- O. H o l t e d a h l. Geologische Karte der Arktis. Zs. «Arktis», 1930, 3—4.
- F. E. K l i n g e r. Die Verknüpfung der magmatischen Lagerstätten Südamerikas mit den grosstektonischen Einheiten. Zs. prakt. Geol., 1929, XXXVII, 161.
- W. K o e p p e n und A. W e g e n e r. Die Klimate der Geologischen Vorzeit. Berlin, 1924.
- P. N i g g l i. Erzlagerstätten, magmatische Aktivität und Grosstektonik. Zs. prakt. Geol., 1928, 159—164, 185—200.
- P. N i g g l i. Natürliche Klassifikation der magmatischen Erzlagerstätten. Abhandl. prakt. Geol., 1926, I.
- J. E. S p u r r. Ore magmas. New York, 1923, I, 1—11.

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ СИБИРИ¹

Я постараюсь быть очень кратким и наметить только основные линии тех больших геохимических проблем, которые стоят перед нами в Сибири.

Под впечатлением новых гигантов индустрии, небывалых масштабов и темпов строительства, на самом деле, живом деле я осознал, как резко меняются наши старые представления в области полезных ископаемых, как меняются самые списки полезных веществ, когда новые виды сырья врываются со своими требованиями новых качеств и новых показателей, а дешевые источники энергии заставляют пересматривать само понятие о полезных ископаемых. Перед громадными масштабами потребностей ничтожными кажутся имеющиеся запасы. Однако запасы нашего сырья далеко еще не выявлены геологической разведкой, и в этом направлении нужны новые темпы и новые методы работы.

Наряду с рудой, в громадных количествах требуются и другие ископаемые: разнообразные глины, известняки, доломиты, пески, кварциты, все, что нужно для металлургического производства, для строительства новых гигантов. Перед нами встают новые задачи. Одна десятая процента вредных примесей в этих подсобных материалах меняет иногда самый ход выплавки металла; несколько неправильная форма зерна и цемента в литейном песке изменяет характер отливки, качественные показатели сырья могут видоизменить характер всей работы.

Так, наравне с изучением свойств самих руд, нарождается совершенно новая потребность в изучении вспомогательных полезных ископаемых, создаются новые научные проблемы вокруг железа и угля, охватывающие десятки различных веществ, жизненно необходимых для производства.

Мне пришлось убедиться за последние годы, как при росте наших гигантов должны мало-помалу раздвигаться старые рамки и самые понятия о полезных и бесполезных веществах земной коры и как мощно внедряются в нашу промышленность именно эти новые продукты.

Год назад мы не знали, что такое нефелин, а сейчас он применяется в одиннадцати отраслях нашей промышленности, а в некоторых из них, например кожевенной или эмалевой, начинает играть ведущую роль. Нам удалось сейчас убедиться в возможности эксплуатации двух месторождений нефелина на Южном Урале. Мы едем в Минусинскую тайгу, где также надеемся наладить добычу этого нового ископаемого.

Когда в Иркутске на одном из съездов я заострил аналогичную проблему и сказал, что Ангарострой с его дешевой энергией должен

¹ Доклад на Чрезвычайной сессии АН СССР в Москве 21—27 июля 1931 г. Печатается по изданию Гос. соц.-экон. изд. 1931.— *Ред.*

найти применение этой энергии у себя, должен научиться превращать окружающие породы в полезные ископаемые, то вряд ли кто-нибудь мне поверил. Но не прошло и месяца, как мы, захватив с собой в поезд куски базальтов, сходных с теми, на которых будет строиться основная плотина Ангаростроя, поставили в Ленинграде ряд опытов, и в их результате нам удалось разрешить эту проблему настолько удачно, что мы думаем, что дешевое литье из базальта найдет себе применение в грандиозных количествах для самых разнообразных видов хозяйства, начиная с тонких электрических изоляторов и кончая мостовыми, оборудованием химических фабрик, трубами, особенно для теплоцентралей, кирпичами для теплового строительства, шналами и т. п.

И только сейчас, когда мне приходилось объезжать вокруг Магнитогорска новые районы, втягиваемые в хозяйственное использование комбинатом, мы встретились с новым полезным ископаемым. Нам сейчас еще не удалось даже угадать, для чего можно его применить в Магнитогорском строительстве, но на громадной площади в квадратные километры открыты миллионы тонн запасов мучнистого, мелко-раздробленного, белоснежного, почти чистого кремнезема. На 12 метров глубины уходят шурфы, и всюду залегает эта своеобразная белая масса, для которой у нас еще в минералогии нет названия. Вот серьезная проблема, которая ждет нас всюду, где открываются новые вещества и где необходимо сумеет ранее бесполезное и неизвестное связать с потребностями производства. В этих случаях надо творить, надо создавать полезные ископаемые, а не беспомощно искать их по официальным спискам.

Наряду с этой идеей нас особенно занимает вторая: мы чувствуем, что перед громадным масштабом сибирского строительства выявленные запасы полезных ископаемых являются недостаточными. Для целого ряда вспомогательных веществ в районе Магнитогорска мы обеспечены только на ближайшие 3—4 года; для потребностей литейного цеха запасы еще скромнее. Нам нужно искать и открывать под покровом земной поверхности новые месторождения, надо расширять нашу сырьевую базу, ибо известных сейчас месторождений нам недостаточно. Перед нами сейчас на громадном пространстве заброшенной царской Сибири стоит громадная задача: проникнуть рентгеновским лучом под покровы болот, степей и открыть новые точки, новые месторождения.

Эта задача решается только двумя способами. Первый, это — чисто научный способ, который позволяет путем геохимических предсказаний предугадать, где что надо искать; мы должны заранее с большим или меньшим вероятием догадываться, что и где мы можем найти, и только путем такого научного прогноза мы сможем подойти к выявлению месторождений тех веществ, которые являются пока скрытыми на громадной территории Сибири. Мы считаем, что распределение в земной коре полезных ископаемых подчинено глубочайшим геохимическим законам, и разгадка этих законов является нашей первой задачей.

Мы считаем, что металлы, на которых строится мощь новой промышленности, черные, цветные металлы, легкие редкие металлы, — все это связано закономерно между собою и прежде всего с охлаждением расплавленных масс, которые в разное время поднимались из глубины и как бы ореолом окружали себя скоплениями отдельных полезных ископаемых. Мы можем сейчас составить теоретическую таблицу таких ореолов полезных веществ вокруг, например, типичнейших гранитных очагов; налево в этой таблице будут расположены вещества, которые осаждаются раньше всего, при высокой температуре, дальше — правее, — вещества, отлагающиеся в более холодной части и, наконец, далеко направо — такие

металлы, которые встречаются лишь на расстоянии многих километров от этих охлаждающихся расплавленных очагов.

Такая таблица определяет распределение веществ по глубине (слева направо). Но вместе с тем в плане эта же таблица распределяет их от центра к периферии, намечая для определенных металлов как бы полосы, пояса, кольца. И если горные породы очага размыты до самых корней, если все, что было наверху, оказалось снесенным и размытым, то все то, что находится в таблице направо, должно в этой области отсутствовать, и месторождения будут образовываться только веществами, расположенными слева. Нужно разгадать геологическую историю местности, попытаться выявить характер очагов, наметить, где сохранились наружные части пород и где сейчас остались только корни. И если мы умело и правильно сделаем эту работу, то сможем с большим или меньшим вероятием предсказать распределение различных металлов в определенных районах Союза.

Когда мы от такой теоретической таблицы перейдем к карте Сибири, то и на ней мы сможем наметить те же районы. Мы можем, например, прежде всего закрасить на ней темноту цветом районы, в которых проявляются корни магматических процессов. Это будут те части, которые сильно размыты сверху, где отсутствуют все элементы, лежащие вправо, где встречаются лишь глубокие корни процессов. Такое бурое пятно мы намечаем вдоль южного берега Байкала, в той части, которая была освещена в трудах академика Обручева, — в древнейшем тени Азии. Дальше, окружая Сибирский щит, тянется светлая полоса, а в ней черная линия, окружающая центральное ядро, линия Сибирской оси, или сибирид, где сосредоточены главные скопления слюды и основные месторождения золота — этих двух типичных полезных ископаемых Сибири.

Но гораздо грандиознее наружное геохимическое кольцо Сибирского щита: на карте видна громадная цепь процессов, начинающихся с Новой Земли, проходящих через весь Урал и оканчивающихся далеко у Охотского моря, а может быть, еще севернее. Это те процессы, которые отмечаются на середине той таблицы полезных веществ, о которой я говорил. На западе всю эту огромную дугу уралид можно закрасить зеленой краской — здесь преобладает медь; далее за Балхашем я закрашиваю наш пояс синей краской — здесь идут свинец, цинк, серебро. Наконец, еще далее к востоку примешиваются красные линии, это — еще мало размытые самые поверхностные зоны, это то, что мы называем молодыми альпийскими или кавказскими складками; они перебрасываются через Каспийское море, создают основные черты геохимии Южного Туркестана, кое-где появляются в виде отдельных частей, в горах Тянь-Шаня и Алтая, но в полном развитии появляются в Восточном Забайкалье; они несут с собой сурьму, теллур, ртуть, мышьяк, золото, фтористый кальций, целый ряд редких химических соединений, которые отвечают правым частям нашей таблицы.

Так геохимический прогноз позволяет наметить определенные характерные черты Сибири, хотя восточная часть ее остается для нас еще загадочной. Мы не знаем, какие пояса окружают с востока и севера громадный Ангарский щит, но вероятная характеристика химических элементов нам ясна. Нам ясно, как располагаются вокруг Сибирской платформы отдельные металлы, где мы должны искать, например, олово и где мы его никогда не найдем, и на огромной карте древнего щита и омывающих его каменных волн древних цепей, окружавших его в различные эпохи, мы видим остатки морей, заливавших его. Они намечают как бы вторую главу геохимической истории Сибири, отдельным пятном выявляя большие угольные бассейны: Кузбасс, Минусу и т. д.

Так, путем применения современных законов геохимии мы можем разгадать основные геохимические черты Сибири, можем наметить основные области, в которых будут встречаться те или иные полезные ископаемые; сейчас, когда во многие районы брошены наши геохимические партии, мы имеем руководящую мысль, которая позволяет нам искать эти полезные ископаемые на основании точного геохимического анализа. Мы проводим эти идеи в наших партиях на Урале, в Кузбассе; мы пытаемся на Южном Урале в трех местах пересечь Уральские цепи для того, чтобы уточнить отдельные пояса руд, из которых Урал складывается, и пытаемся найти отдельные части уральид, лежащих у Магнитогорска, построить такую геохимическую схему, которая давала бы нам возможность точно знать место, где что можно искать.

И все-таки в этой огромной работе есть свое огромное «но». Когда в течение нескольких минут на трехмоторном самолете поднимаешься над землей на высоту тысячи метров и перед тобой проходит вся грандиозная картина Южного и Среднего Урала, когда пересекаешь Уральский хребет и приближаешься к Москве, тогда начинаешь понимать, как бесконечно слабы наши геохимические знания, как бесконечно малы наши достижения, как трудна работа партии геологов, брошенных на эти громадные поверхности лесов, озер, расстилающихся вокруг нас на необъятном просторе Союза. Тогда начинаешь понимать всю трудность познания и отыскания тех полезных ископаемых, которые скрыты на этом громадном пространстве, покрытом болотами, озерами, лесами, еще резче начинаешь понимать то громадное значение, которое должен иметь прогноз, теоретическая мысль, которая одна позволяет под этой поверхностью отыскать лежащие там богатства, проникнуть под ее покров какими-то другими глазами, чем глаз простого геолога, глазами новых научных методов — методов геофизики и молодой геохимии. Только на основании достижений этих новых научных дисциплин можно проникнуть под эту поверхность, под эти пашни, которые простираются перед нами.

В 1927 г. я опубликовал географическое описание своего полета из Берлина в Москву. Я охарактеризовал значение этого нового метода для понимания целого ряда вопросов землепользования. Мне уже тогда бросились в глаза те мелкие полосы, которые разделяли всю землю вокруг нас на мельчайшие лоскутки ковра, сотканного из тысячи отдельных самостоятельных хозяйств. Теперь картина резко изменилась: под ногами расстилалась карта огромных черных и зеленых пятен полей совхозов, которые появляются, как огромные оазисы в сотни тысяч гектаров, среди старых лоскутов, а среди них, около старых деревень, отдельными клиньями врезаются вчересполосицу колхозные поля. А в связи с этим намечаются новые принципы дорожного строительства, новые типы построек, новое расположение центров промышленности. С самолета особенно наглядно виден мощный рост социалистического строительства, и это убеждает нас еще раз в том, как беспомощны оказались бы мы, если бы не применяли методов широкого массового подхода к решению всех грандиозных хозяйственных задач, требующих не менее грандиозных масштабов и темпов работы.

Я определенно верю, что лишь широкий научный прогноз позволит нам достигнуть разрешения больших сырьевых проблем нашей страны, но только путем глубочайшей пропаганды этих идей исследования, путем привлечения интереса широких масс, так, чтобы каждый рабочий, колхозник, краевед, комсомолец, турист проникся идеей поисков полезных ископаемых, чтобы укрепление сырьевой базы стало общим делом всего нашего строительства.

ХИМИЯ КОСМОСА

—

ХИМИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ ЗЕМЛИ И КОСМОСА¹

ВВЕДЕНИЕ

Настоящий очерк в первой своей части является одной из глав той новой научной дисциплины, которая в настоящее время выросла из недр старой минералогии и получила наименование *г е о х и м и и*, т. е. науки о химических элементах земной коры и Земли в ее целом. Главное развитие и основные успехи в области этой науки были достигнуты в России, где академик В. И. Вернадский выдвинул совершенно независимое направление геохимического изучения земной коры, а также в Северной Америке (Кларк, Вашингтон и др.). Связь геохимии с астрофизикой до сих пор почти не существовала и, к сожалению, в большинстве случаев ограничивалась лишь областью космогонических идей общего характера. Широкое и планомерное изучение химии вселенной несомненно выдвинет необходимость выделения *к о с м о х и м и и*, а рамки геохимии раздвинет, включив в ее изучение и химию центральных частей Земли. Однако до этих результатов еще далеко, и пока приходится ограничиваться формальной сводкой, даваемой в настоящем очерке, и лишь в конце попытаться наметить вехи к объяснению наблюдаемых нами явлений.

Среди отдельных проблем геохимии вопрос о количественном распространении отдельных химических элементов уже давно занимал внимание. После работ Кларка и Фогта, развивших идеи Доберейнера и Эли де Бомона, вопрос о среднем составе земной оболочки и о распространении отдельных элементарных тел встал на почву точных аналитических данных, и сейчас, после более чем тридцатилетней работы в этом направлении, многое оказалось уже твердо установленным.

Получилась любопытная картина природного явления, выхваченная из мироздания, освещающая только один уголок космических явлений, определяемый пределами доступной нашему химическому анализу земной коры.

Попытки объяснить химический состав земной коры не могли быть удачными, пока мы оставались в рамках этого уголка мироздания и не хотели искать объяснений вне геологической истории и вне реально достижимого человеком пространства.

Надо было для решения вопроса выйти за пределы земной коры и признать нашу земную оболочку лишь частью космоса, тесно связанной с ним в своей истории и в своих физических и химических судьбах.

Эти попытки должны были неизбежно привести к рассмотрению вопросов или космогонического характера — и на этот путь встал еще в 1904 г. французский геолог де Лоне — или же подойти путем срав-

¹ Печатается по изданию Научного химико-технического издательства, Пг., 1923.

нения химии Земли с химией мироздания, с теми главами астрофизики, которые занимаются изучением распространения химических элементов на космических телах, — этот второй путь был осторожно избран Бауром и отчасти освещался Аррениусом, шедшим по пути Гельмгольца.

Проблема расширялась и усложнялась особенно благодаря целой группе исследований, которая всю совокупность элементов природы пыталась путем теоретических построений связать в единую цепь, тесно приуроченную к различным стадиям развития звездных миров: это были заманчивые, но главным образом чисто спекулятивные схемы Локайера, Крукса, Мозова.

Но пока шли эти попытки теоретическим путем разобраться в природе элементарных тел и законах их распространения, успехи радиоактивности, новые завоевания Эйнштейна в области физики, открытия молодого индийского ученого Саха и эксперименты Резерфорда вливали в понятие о веществе и законах его превращения совершенно новое содержание, и неудивительно, что сначала астроному Эддингтону, а потом отчасти Лорингу, но, главным образом, Нернсту, Аррениусу и Перрену, на основе этих завоеваний, удалось создать новую концепцию мира в новом понимании происходящих в нем химических явлений.

Химия космоса получила новое освещение, и в этих новых блестящих лучах и маленькая наша проблема о составе земной коры получила новое толкование и поставила новые задачи.

Именно этой проблемой я буду заниматься в настоящем очерке; последовательно, шаг за шагом, я хочу сначала дать краткий очерк фактических сведений о распространении отдельных элементов в разных частях мироздания. Исходя из различия методов и различия в подходах к изучению явлений, мы установим четыре, совершенно неравноценные, но для нас резко отличные области: земную кору, центральные части Земли, метеорные обломки и космические тела (кометы, планеты, Солнце, туманности и звезды). Для каждой из групп мы попытаемся дать характеристику тех элементов, которые в них известны, и наметить порядок их относительного значения.

Это составит первую и главную задачу настоящего очерка — сводка фактического материала и его сопоставление.

Во второй части я перейду к изложению многочисленных попыток объяснить состав земной коры и космических тел, причем в исторической последовательности рассматривая, как постепенно видоизменялись наши взгляды и как упорно некоторые идеи удерживались в научном обиходе, несмотря на бездоказательность их положений. И здесь руководящая роль принадлежит закону Менделеева, атомной модели Бора и опытным данным по ионизации элементов Саха.

Третья и заключительная часть должна дать новое освещение сопоставленным фактам и попытаться слить их в единой картине. Она основана целиком на идеях современной физики. Новая концепция мира, вытекающая из новых идей, является неизбежным следствием современных завоеваний естественно-исторической мысли. Проблемы, широко поставленные Эйнштейном, Эддингтоном и Нернстом в картине мироздания, не могут не найти себе отражения в химических вопросах земной коры.

Пусть, однако, в самом введении будет отмечена основная идея этой последней главы: проблема химического состава космоса и в свете новых идей остается проблемой; на пути ее разрешению могут быть поставлены только веки, а вопросы только сформулированы и намечены, но не разрешены.

Но одна основная идея сейчас резко вырисовывается на фоне всей

сложной работы по познанию мира: это поразительное единообразие в распределении элементов в мироздании, единство состава, единство и постоянство относительной роли отдельных элементарных тел в разнообразных условиях космической обстановки. Эта идея нарастает по мере ее проникновения в химию мироздания; она идет на смену красивым цепям эволюции атомов, она снова отодвигает вопрос о зарождении или распаде химических тел космоса из области точных наблюдений в область только смелых догадок. И именно в этот момент торжествует в опытах Рёзерфорда разрушение атомов и их ядра, а в астрохимии эксперименты Саха разбивают идеи многообразия элементов звезд, выявляя огромную прочность ядра атома в сложной космической эволюции звездных миров.

Но если теперь мы приходим впервые к более правильному толкованию наших наблюдений, то все же еще очень далеки от их рационального объяснения¹.

Март 1923 года

I. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ЗЕМНОЙ КОРЫ

A. Качественный состав

«Геохимия изучает историю химических элементов в земной коре в отличие от минералогии, изучающей природные химические соединения, молекулы — минералы».

Вернадский В., 1923

§ 1. Задача изучения химического состава Земли требовала прежде всего определения границ нашей планеты, доступных нашему исследованию. Современная геохимия с достаточной определенностью выяснила, что за пределами 15—20 км глубины мы лишены возможности непосредственно судить о химическом составе, и поэтому она ограничила поле своих исследований теми 20 километрами, для которых в наших руках имеются вещественные объекты природных химических процессов.

Таким образом, наша атмосфера, воды земной поверхности, определяющие гидросферу, и твердая земная кора до глубины в 15—20 км — такова та первая часть космоса, которую мы будем в дальнейшем называть просто земной корой².

§ 2. Из земной коры черпает минералог и химик объекты своих исследований, и на ней построена и современная неорганическая химия, и сама геохимия, и весь сложный мир идей о радиоактивности.

Сейчас мы знаем, что земная кора построена из 88 элементов (вернее говоря, т и п о в элементах), тогда как теоретически мы ожидали бы встретить в ней 92 элементарных тела или порядковых номеров, как это сейчас

¹ Частично мои взгляды, собранные в этой книге, были изложены в следующих работах и статьях: Геохимия России, Пг., 1922, 1; Причина распространенности некоторых химических элементов. Природа, 1922, № 6, 102; Об одной законности распределения химических элементов в земной коре. Доклады Росс. Акад. Наук. 1923, январь-июнь, 23—26; Химия мироздания. Пг., Изд. «Время», 1923. См. также: Количественный состав земной коры в процентах числа атомов. Изв. Акад. Наук, 1912, IV, № 4, 367.

² Точное определение земной коры и ее физических особенностей см. В. И. Вернадский. История минералов земной коры. Пг., 1923. I, 25 (Научное хим.-техн. издат.). Величина земного радиуса 6377—6356 км. Глубочайшая скважина в Силезии 2239,72 м, что отвечает только 1/2847 или 1/2833 земного радиуса.

принято говорить; из них № 43 и 75 являются аналогами марганца, № 85 указывает на элемент галлоидного типа, № 87 — щелочной тяжелый металл, вероятно радиоактивный, как и предыдущий¹.

До 1923 г. считалось неизвестных 5 элементов: в 1923 г. № 72 был открыт Хевеши и Костером в цирконах и циркониевых минералах Норвегии. Элемент гафний (Hf) оказался аналогом группы циркония, занял место в периодической таблице перед танталом и заставил все редкие земли от № 57 по № 71 поместиться в одной клетке под Y и Sc. Любопытно то, что из 5 неизвестных это был единственный четный элемент, и он первым оказался открытым.

Таковы первые факты, которые нам дает изучение окружающей нас природы: земная кора состоит из 88 типов химических элементов.

§ 3. Новейшие работы Содди, Рёзерфорда и Астона показывают дальнейшее осложнение вопроса. С одной стороны, открывается целая большая область элементов, лишь условно укладываемых в таблицу Менделеева и наделенных особыми свойствами превращения в новые виды атома путем излучения части заключенной в них энергии — материи. В настоящее время оказываются наделенными такими свойствами 42 различных химических атома. Эти элементы, называемые радиоактивными, образуют несколько рядов, частично при процессе распада выделяют через α -лучи атомы газа гелия, а в конечном итоге превращаются в более устойчивые тела, близкие по атомным весам к свинцу.

Привожу главные ряды:

A — UI, UX₁, UX₂, UII — UY, Pa, Act., Radioact., Act. X, Act. Em, Act. A, Act. B, Act. C, Act. C^I, Act. C^{II}, Act. D (попадающий в тип свинца) — 16 видов².

B — начинающийся от UII — Io, Ra, RaEm³, RaA, RaB, RaC, RaC^I, RaC^{II}, RaD, RaE, RaF (= Po), RaG (попадающий в тип свинца) — 12 видов.

C — Th., Mesoth. I, Mesoth. II, Radioth., ThorX, ThorEm, ThorA, ThorB, ThC, ThC^I, ThC^{II}, ThD (попадающий в группу свинца) — 12 видов.

D — особое положение занимают K и Rb — 2 типа.

Количественно все элементы рядов ABC связаны между собой особыми законами, из которых опытным путем выводятся времена (половины) существования отдельных элементарных тел. Таким образом, эти элементы вместе с ураном и торием распределены в земной коре в различных количествах, причем, как будет указано ниже, неодинаковых в различных частях коры.

Таким образом, мы намечаем вторую группу явлений, характерных для земной коры: существование в ней не менее 42 видов атомов, лишь частично отвечающих элементам менделеевской таблицы, обладающих способностью превращения по строго определенным законам, определяющим: порядок процесса распада, количество распадающихся в единицу времени атомов и продолжительность жизни (половины жизни) каждого элементарного тела.

§ 4. Уже из предыдущего мы видели, что 88 химических элементов, известных в земной коре, намечают только типы элементов, вернее го-

¹ Книга эта написана в 1922 г. В настоящее же время они известны и соответствен-но называются технецием, рением, астатином, францием. — *Ред.*

² В этом ряде еще заподозрены UZI и UZII.

³ RaEm в настоящее время обозначается Rn. — *Ред.*

вора, клеточки менделеевской системы, место в которых, как сейчас оказывается, может быть занято несколькими видами атомов различных атомных весов. Таким образом, тип элемента оказался определенным не атомным весом, а той клеточкой, которую он занимает в таблице, т. е. его атомным порядковым числом с отвечающим ему определенным рентгеновским спектром.

Все виды элементов, относящиеся к одной клетке, носят название изотопов.

Таким образом, сейчас оказывается, что в земной коре мы знаем 88 типов химических элементов, тогда как число видов их гораздо больше.

По опытам Астона мы сейчас знаем изотопы нижеследующих элементов (причем в скобках поставлено число открытых изотопов): Li (2), B (2), Ne (2 или 3), Mg (3), Si (2), Cl (2), Ar (2), K (2), Ca (2), Fe (2, из коих один очень слабый), Ni (2), Zn (4 или 5), Se (6), Br (2), Kr (6), Rb (2), Sn (8), Sb (2 или 3), Xe (5—7), Hg (6).

Кроме того, из группы радиоактивных элементов¹: Tl (3 + 1), Pb (7 + 1), Bi (4 + 2), Po (7), RaEm (3), Ra (4), Ac (2), Th (6), Pa (2), U (2).

Повидимому, не дают изотопов: H, He, Be, C, N, O, F, Na, P, S, As, J, Cs.

Для остальных элементов у нас нет пока точных данных².

Таким образом, оказывается, что земная кора состоит из большого количества видов атомов-изотопов, число которых должно превышать 200. Одни из них принадлежат к малоустойчивым формам материи, другие, наоборот, являются крайне устойчивыми и не радиоактивны. Наконец, особую группу элементов представляют те порядковые номера, которые не образуют изотопов.

Мы приходим к выводу: земная кора состоит из четырех типов элементов: первая группа по своему характеру вполне отвечает элементам менделеевской системы — это преимущественно более легкие, простые (не смешанные) атомы низких порядковых чисел и атомных весов, весьма распространенные в земной коре, и, повидимому, элементы, преимущественно строящие органическую жизнь.

Вторую группу элементов (по преимуществу заключенную между порядковыми числами 12—60) представляют нормальные элементы, образующие ряд изотопов, встречающиеся всегда в природе в виде смесей строго определенного состава, но не обладающие видимой способностью к разложению.

Третью большую группу представляют наиболее тяжелые элементы, обладающие большой способностью к радиоактивному распаду, неустойчивые, разлагающиеся атомы земной коры.

Между третьей и второй группами заключена еще четвертая группа (между числами 57—71), называемая группой редких земель: все это настоящие элементы с различными, хотя и очень сходными химическими свойствами, повидимому, тесно связанные между собой по строению атома, не обладающие радиоактивностью.

¹ С плюсом поставлены изотопы нерадиоактивные, определяющие тип элемента данной клетки.

² Вопрос еще не получил полного разрешения, и число изотопов по мере усложнения методики увеличивается. Весьма вероятно, что имеется ряд изотопов, приписанных к элементам в ничтожных количествах. Новейшие теоретические соображения, особенно С. А. Щукарева, выдвигают весьма большое число изотопов.

§ 5. Установив таким образом наличие в земной коре около 200 изотопов с различными атомными весами, мы подходим к очень важному вопросу: что же представляют из себя 88 встречаемых в природе химических элементов и каковы их соотношения с теорией изотопов?

Рассмотрим теперь те основные ячейки, в которых имеется несколько изотопов. Их три типа, причем четвертым мы будем считать те из них, которые не дают изотопов. В одних заключаются только радиоактивные элементы, отдельные члены распада, например, в клетке № 90 содержится сам материнский элемент торий и продукты его распада, никаких устойчивых элементов или конечных продуктов распада нет, — таковы:

92 U 91 Pa 90 Th 89 Ac 88 Ra 86 RaEm 84 Po.

Вторую группу составляют такие клеточки менделеевской таблицы, в которой имеются как радиоактивные элементы, так и устойчивые нерадиоактивные элементы и устойчивые конечные стадии распада. Например, порядковое число 82, к которому относятся и обычный свинец и радиосвинец (RaG).

Таковы три типа, с порядковыми номерами:

83 — радиоактивные элементы промежуточные и нерадиоактивный Bi.

82 — радиоактивные элементы промежуточные, конечные продукты распада (устойчивые) и нерадиоактивный Pb.

81 — радиоактивные элементы промежуточные и нерадиоактивный Tl.

Третью группу представляют те порядковые числа, к которым относится несколько различных изотопов нерадиоактивных элементов, иначе говоря, где привычные нам элементы Cl, Si и т. д. являются смесью нескольких изотопов. Это, в сущности, большинство элементарных тел.

Наконец, последнюю четвертую группу составляют элементы, занимающие совершенно самостоятельное положение, не образуя изотопов. Мы перечислили их выше, отметив пока 13 таких элементарных тел (§ 4).

Установив таким образом указанные четыре группы, перейдем к нашей проблеме, а именно, к рассмотрению того, в каком отношении находятся эти четыре группы к земной коре и какова их относительная роль.

Группа I. 7 порядковых чисел (84, 86, 88, 89, 90, 91, 92) характеризуются сочетанием исключительно радиоактивных элементов. Взаимное отношение количеств этих изотопов определяется точно законами радиоактивного равновесия. Методами химического анализа материнские тела (U, Th) или более или менее устойчивые промежуточные (Ra) могут быть выделены, и их атомный вес аналитически определен.

В этой группе и ее распределении в природе мы оперируем с точными цифрами постольку, поскольку исходим из определенного в природе количества U и Th. Для всех остальных видов элементов, связанных с ураном и торием, формулы радиоактивного равновесия дают очень точные цифры¹.

Группа II. Гораздо сложнее вторая группа: в ней в одной клетке находятся и радиоактивные, и нерадиоактивные изотопы. Однако опытным путем они могут быть выделены самостоятельно, и каждый из них может быть изучен порознь. Атомные веса таких элементов различны и сейчас уже определены с достаточной точностью.

¹ Надо иметь в виду, что UI и UII не отделены друг от друга, но количество второго настолько незначительно, что атомный вес практически отвечает основному UI.

Так, обыкновенный свинец — 207, 20 — 207, 22 (из сернистых руд).
PbG (радиосвинец) — 206, 04 — 206, 12 (главным образом,
из брёггерита).
ThD (ториосвинец) — 207, 90 (природа ториевого свинца еще
внушает сомнения).

Для висмута и таллия мы не имеем таких отличий. Относительное распространение указанных трех видов свинца не изучено и неизвестно, но напрашивается мысль, что обыкновенный свинец есть смесь ThD и PbG в строго определенных пропорциях.

Многочисленные аналитические работы показали, что вопрос этот, благодаря роли группы актиния, несколько сложнее, но в общем в минералах с торием атомный вес свинца приближается к 208, а в уранах к 206.

Во всяком случае в этой группе различия в атомных весах найдены в самой земной коре, и поэтому в будущем аналитик обязательно должен будет указывать, какой свинец им найден в минерале.

Группа III обнимает большинство природных элементов, но как раз по отношению к ней мы встречаемся с особыми затруднениями. Оказывается, что, изучая атомный вес какого-либо природного элемента, например Cl, и получая для него 35,46, мы в сущности получаем условное число, дающее нам константу какой-то сложной смеси из 35, 37 (и, может быть, 39). Разделить эти смеси изотопов мы можем, только применяя особенно тонкие методы.

В общем сейчас на основании экспериментального материала намечаются несколько путей для отделения изотопов: 1) фракционированная перегонка, 2) диффузия через пористые перегородки, 3) разделение при помощи радиевых индикаторов.

Первые два способа должны частично осуществляться и в земной коре, где особенно второй метод, в сущности, используется природой в огромном масштабе при фильтрации растворов по капиллярам и ультракапиллярам. Первый мог бы наблюдаться на ртути в месторождениях, где мы имеем несомненные явления возгонки (например, Монте-Амиата).

Весьма интересно, что в условиях земной коры мы все же до сих пор не находили этого разделения изотопов, несмотря на наличие ряда весьма тонких природных процессов фильтрации, дистилляции и диффузии¹.

Специальная лаборатория в Гарвардском университете была занята изучением атомного веса элементов, полученных из различных стран и различных месторождений. До сих пор все результаты отрицательны (кроме одного сделанного Кюри определения хлора, извлеченного из соли в Центральной Африке). Даже хлор, полученный из солей земной поверхности и апатитов (фосфатов), по данным Гледича и Самдала, оказался отвечающим общепринятому весу.

В этом направлении изучены: Cu, Cl, Na, Ca, Fe, Ni, Ag, Au, B, Hg.

Любопытно, что даже атомные веса Fe и Ni в земных минералах и метеоритах оказываются тождественными².

¹ В настоящее время частичное разделение изотопов в природных продуктах усложнено. — *Ред.*

² Во всяком случае, даже если мы должны будем признать, что при первичном своем зарождении (т. е. до начала геологических процессов) мы уже в готовом виде имели закономерные или постоянные смеси изотопов, то все же при дальнейших геологических и геохимических явлениях эти смеси могли бы обнаружить известное различие в составе. Поэтому, несмотря на кажущееся отрицательное решение этого вопроса, я считал бы целесообразным продолжать изучение атомных весов различных минеральных тел, связанных с различными условиями генезиса.

Интересна и другая сторона в этом вопросе: если известно более трех изотопов, то относительное содержание в смеси каждого из них является неопределенным.

Мы как будто бы подходим к выводу: ряд изотопов образует в земной коре закономерные смеси в определенных и неизменяемых соотношениях, и если этот вывод будет распространен и на метеориты, то в пределах земной коры и обломков метеоров мы не будем иметь и следов таких химических процессов, кои вели бы к разъединению отдельных изотопов между собой. Этим изотопы третьей группы в геохимическом отношении отличаются от изотопов первой и второй групп.

Группа IV не включает в себе изотопов, и так как поэтому эти элементы не приходится считать смесями, их атомные веса выражаются целыми числами (производными от $\text{He} = 4$ и $\text{H} = 1,008$)¹.

Так:

H	He	Be	C	N	O	
1,008	4,0	9,02	12,0	14,01	16,0	
F	Na	P	S	As	J	Cs
19.0	23.0	31.04	32.06	74.96	126.92	132.81

Более значительно отклонялся от нашего закона только Be, для которого проверка атомного веса (9,1) дала в 1922 г. предсказанную поправку (9,02).

§ 6. Подведем итоги сказанному: земная кора состоит из 88 типов элементов и около 200 видов. Одни из них устойчивы и в пределах наших опытов неизменны, другие, наоборот, постоянно превращаются; одни виды существуют самостоятельно и, как таковые, в природе могут быть открыты и выделены, другие, наоборот, известны нам только в смесях, но весьма определенного состава (смеси изотопов одного и того же атомного числа); третьи, наконец, существуют в закономерных смесях, но могут быть разделены методами физико-химического анализа (смесь элементов радиоактивного распада).

§ 7. Перейдем теперь к вопросу о распространении отдельных групп элементов в земной коре.

Прежде всего отметим характер наших знаний по отношению к тем четырем большим группам, которые нами выше намечены (§ 5).

Первую группу составляют U и Th и продукты их распада. Благодаря очень многочисленным работам по распространению этих радиоактивных элементов, мы имеем в достаточной степени ясную картину их распределения в разных частях земной оболочки и в разных горных породах и минералах. Во всяком случае для изверженных пород среднее содержание в процентах определяется около $7,0 \cdot 10^{-4}$ U и $1,5 \cdot 10^{-3}$ Th.

Таким образом, для первой группы мы обладаем весьма точными данными.

Вторую группу, составленную из изотопов Bi, Pb, Tl, мы знаем лишь условно в земной коре. Нам известны лишь грубые общие суммарные цифры содержания этих изотопов, и до сих пор еще не проведено определение их распространения по изотопам. Нет, однако, никакого сомнения, что выяснение распространения отдельных изотопов именно в этой группе вполне возможно и требует лишь детальных химических анализов с определением атомного веса тел.

Для третьей и четвертой групп мы знаем распространение элементов только по типам, т. е. по порядковым числам, и отдельные изотопы совершенно ускользают от нашего внимания, хотя их количество для случаев с двумя изотопами может быть вычислено из атомного веса по праву смешения.

Таким образом, при учете распространения элементов в земной коре

¹ С соответственными поправками на изменение (потерю) массы в общем поле.

мы только для небольшой части можем говорить об отдельных изотопах, а в остальной массе учитываем лишь распространение данного порядкового номера или типа менделеевской системы.

Б. Количественный состав

§ 8. Пока мы рассмотрели первую часть нашей задачи: какие типы и виды элементов нам известны в окружающей нас природе. Теперь вернемся опять к земной коре и посмотрим, как в ней распределены отдельные элементы. В этом вопросе мы встретимся прежде всего с тремя основными проблемами: во-первых, сколько каждого элемента в среднем входит в изучаемую нами земную кору, во-вторых, как эти элементы распределены в пространстве в разных оболочках Земли и, в-третьих, какие сочетания элементов при этом наблюдаются.

Проблема среднего состава земной коры сейчас решена довольно полно. С 1889 г., благодаря удачной идее геохимика Кларка, началась работа в этом направлении, и сейчас за 30-летний период работы, благодаря трудам русской школы академика В. И. Вернадского, норвежского геолога Фогта, самого Кларка, геохимика и петрографа Вашингтона и других, средний состав земной коры во всех ее оболочках в первом приближении решен¹.

Привожу сначала подсчеты для трех главных оболочек: атмосферы, гидросферы и литосферы (табл. 1—3).

Таблица 1

Состав атмосферы
(по весу)

N	75,47470
O	23,19153
A	1,29985
Kr	0,02800
Xe	0,00500
Ne	0,00086
He	0,00006

Сумма 100,000

Настоящий состав может быть принят только для нижних слоев атмосферы. С высотой состав сильно меняется, поэтому приведенная таблица не является средней.

Таблица 2

Состав океана
(по весу)

O	85,79
H	10,67
Cl	2,07
Na	1,11
Mg	0,11
S	0,09
Ca	0,05
K	0,04
C	0,003
Br	0,002

Сумма 99,995

В таблицу включено лишь 10 элементов из 31, известных нам в составе морских вод. См. В. И. Вернадский. Живое вещество в химии моря. Лг., 1923 (Научное хим.-тех. издат.). Остаточные до 100 0,005% должны быть отнесены на долю остальных 21 элемента и в первую очередь азота, кремния и железа.

¹ Идея расчета не по весовым, а по объемным отношениям впервые была выдвинута мною в 1912 г., позднее в работах Ниггли и Гаркина эта форма пересчетов оказалась наиболее правильной и вошла в обиход научной мысли.

Таблица 3

Средний состав литосферы
(по весу)

	По Кларку ¹ , 1920					По Вашингтону ² , 1920
	магматические породы 95%	сланцы 4%	песчаники 0,75%	известняки 0,25%	среднее %	магматические породы (=состав гранодиорита)
SiO ₂	59,83	58,10	78,33	5,19	59,77	59,09
Al ₂ O ₃	15,02	15,40	4,77	0,81	14,89	15,35
Fe ₂ O ₃	2,62	4,02	1,07	0,54	2,69	3,08
FeO	3,43	2,45	0,30	—	3,39	3,80
MgO	3,74	2,44	1,16	7,89	3,74	3,49
CaO	4,83	3,11	5,50	42,57	4,86	5,08
Na ₂ O	3,37	1,30	0,45	0,05	3,25	3,84
K ₂ O	3,05	3,24	1,31	0,33	2,98	3,13
H ₂ O	1,90	5,00	1,63	0,77	2,02	1,14
TiO ₂	0,79	0,65	0,25	0,06	0,77	1,05
ZrO ₂	0,023	—	—	—	0,02	0,039
CO ₂	0,49	2,63	5,03	41,54	0,70	0,102
P ₂ O ₅	0,29	0,17	0,08	0,04	0,28	0,30
S	0,10	—	—	0,09	0,10	0,53
SO ₃	—	0,64	0,07	0,05	0,03	—
Cl	0,063	—	—	0,02	0,06	0,056
F	0,10	—	—	—	0,09	0,078
BaO	0,10	0,05	0,05	—	0,09	0,055
SrO	0,043	—	—	—	0,04	0,022
MnO	0,10	—	—	0,5	0,09	0,125
NiO	0,026	—	—	—	0,025	0,025
Cr ₂ O ₃	0,048	—	—	—	0,05	0,056
V ₂ O ₅	0,026	—	—	—	0,025	0,032
Li ₂ O	0,011	—	—	—	0,01	0,007
C	—	0,80	—	—	0,03	—
Сумма	100	—	—	—	—	—

В этой таблице, повидимому, самым точным является последний столбец, полученный Вашингтоном путем просмотра 8602 анализов горных пород, из которых были приняты во внимание лишь 5179 вполне достоверных анализов. Весьма интересные поправки вносит в эту таблицу Дюма (M. D u n a s. Bull. Soc. min. France, 1922. XLV, № 6, 129), устанавливающий на основании уравнений соотношения между глинистыми породами, песчаниками и известняками: 92 ± 4 ; 5 ± 1 ; 3 ± 1 .

Данные Вашингтона (табл. 4 и 5) основаны на ряде специальных анализов химиков Американского геологического комитета.

Очень любопытные замечания по поводу его таблицы делает Кук (H. C. C o o k, Nature, 1922, CX, 253), реферируя статью Кларка и Вашингтона, объединивших свои результаты. При этом последний столбец остался без больших изменений, кроме следующих: хлор понижен с 0,055 до 0,048; очень сильно понижена фтор — с 0,077 до 0,030; вставлены редкие земли (Ce, Y₂O₃ — 0,020), CuO — 0,01, Zn — 0,04 и

¹ F. Clarke. Data on Geochemistry. Bull. U. S. Geol. Survey, 1920, № 695.

² H. Washington. Chemistry of the Earth's crust. J. Frankl. Inst., 1920, 757—813.

Таблица 4

Средний состав магматических пород
(по весу)

	По Клар- ку, 1920	По Вашинг- тону, 1920
O	47,29	46,43
Si	28,02	27,77
Al	7,96	8,14
Fe	4,56	5,12
Mg	2,29	2,09
Ca	3,47	3,63
Na	2,50	2,85
K	2,47	2,60
H	0,16	0,127
Ti	0,46	0,629
*Zr	0,017	0,028
*C	0,13	0,027
P	0,13	0,130
S	0,10	0,052
*Cl	0,063	0,055
*F	0,10	0,077
Ba	0,093	0,048
Sr	0,034	0,018
Mn	0,078	0,096
*Ni	0,020	0,019
*Cr	0,034	0,037
*Y	0,017	0,021
		(=2,1·10 ⁻²)
Li	0,004	0,003
		(=3·10 ⁻³)
	100	—

Таблица 5

Вашингтон далее продолжает
табл. 4 (по весу)
(для магматических пород)

Cu	2·10 ⁻³
Цериевые земли	1·10 ⁻³
Be	x·10 ⁻³
Co	x·10 ⁻³
B	x·10 ⁻⁴
Zn	x·10 ⁻⁴
Pb	x·10 ⁻⁴
As	x·10 ⁻⁴
Cd	x·10 ⁻⁵
Sn	x·10 ⁻⁵
Hg	x·10 ⁻⁵
Sb	x·10 ⁻⁵
Mo	x·10 ⁻⁵
Ag	x·10 ⁻⁶
W	x·10 ⁻⁶
Bi	x·10 ⁻⁶
Se	x·10 ⁻⁷
Au	x·10 ⁻⁷
Br	x·10 ⁻⁷
Te	x·10 ⁻⁸
Pt	x·10 ⁻⁸

Pb—0,002 (см. В. Н. В е р и а д с к и й. История минералов земной коры. Пг., 1923, I, 48).

Кук, разбирая получение средних цифр, подчеркивает, что в своих расчетах Вашингтон и Кларк исходили из распространения гранитов в глубину до 8 км, а дальше принимали базальты со средним содержанием SiO₂ — 48%. Кук подчеркивает, что под океанами совсем нет гранитной зоны, а, повидимому, непосредственно начинается базальтовая постель, ввиду чего средняя порода должна быть гораздо менее кислой и содержать не свыше 50—55% SiO₂. Такой состав уже не отвечает больше гранодиориту, а типу габбро (Ср. Ф. Ю. Левинсон-Лессинг Min. Mag., 1911, VIII, 248—257, 289—297).

В таблице Кларка (табл. 4) звездочкой отмечены те элементы, числа которых он считал слишком высокими; однако мы видим, что в общем они немного отличаются от цифр Вашингтона (кроме только С). В общем с таблицей Вашингтона согласие большое. Кларк на основании новых анализов дает еще цифры: Cu — 0,01; Zn — 0,004, Pb — 0,002. Эти цифры значительно больше, чем у Вашингтона, в 10 раз, но они, повидимому, весьма вероятны и должны быть приняты.

На основании имеющихся данных о составе атмосферы, гидросферы и разных оболочек литосферы можно подойти к определению среднего состава всей земной коры (табл. 6).

Таблица 6

**Средний состав всей земной коры
(трех оболочек)**

№ п/п	Название элемента	Знак	Атом- ный номер	По весу			По числу атомов	
				по Кларку, 1920	по Вернад- скому, 1908 ¹	по Ферс- ману, 1922	по Ферс- ману, 1912	по Ферс- ману, 1922
		1	2	3	4	5 ¹	6	7
1	Кислород	O	8	50,02	49,7	—	53,81	53,81
2	Кремний ³	Si	14	25,80	26,0	—	15,85	15,85
3	Алюминий	Al	13	7,30	7,45	—	4,76	4,76
4	Железо	Fe	26	4,18	4,20	—	1,30	1,30
5	Кальций	Ca	20	3,22	3,25	—	1,44	1,44
6	Натрий	Na	11	2,36	2,40	—	1,80	1,80
7	Калий	K	19	2,28	2,35	—	1,04	1,04
8	Магний	Mg	12	2,08	2,35	—	1,67	1,67
9	Водород	H	1	0,95	1,0	—	17,18	17,18
10	Углерод	C	6	0,18	0,4	0,35	0,58	0,50
11	Титан	Ti	22	0,43	0,5	—	0,18	0,18
12	Хлор	Cl	17	0,20	0,2	—	0,10	0,10
13	Фосфор	P	15	0,11	0,1	—	0,056	0,056
14	Сера	S	16	0,11	0,1	—	0,054	0,054
15	Фтор	F	9	0,10	0,04	0,08	0,036	0,072
16	Барий	Ba	56	0,08	0,04	—	0,0054	0,0054
17	Марганец	Mn	25	0,08	0,09	—	0,028	0,028
18	Азот	N	7	0,03	0,04	—	0,049	0,049
19	Стронций	Sr	38	0,02	0,01	0,02	0,0019	0,0035
20	Литий	Li	3	—	0,01	0,005	0,025	0,012
21	Бор	B	5	—	0,01	0,001	0,017	0,002
22	Цирконий	Zr	40	—	0,03	—	0,0057	0,0057
23	Ванадий	V	23	—	0,01	0,02	0,0034	0,0068
24	Хром	Cr	24	—	0,01	0,02	0,0033	0,0066
25	Никель	Ni	28	—	0,01	0,02	0,0029	0,0058
26	Бром	Br	35	—	0,01	— ⁴	0,0021	0,0020 ⁴
	Остальные эле- менты	—	—	0,47				

¹ Помещены лишь отклонения от столбца 4.

² В. И. Вернадский. Опыт описательной минералогии. СПб., 1908.

³ Сюда необходимо прибавить и гафний на основании следующих соображений. Гафний встречается в циркониевых минералах, образуя 5—10% циркония. Даже если для осторожности принять только 1% от циркония, то цифру содержания последнего — 0,03 надо уменьшить в 100 раз: $1 \cdot 10^{-4}$, иначе говоря $x \cdot 10^{-4}$ по весу. Принимая высокий атомный вес гафния, мы получаем $x \cdot 10^{-5}$ по объему.

⁴ Дополнить: $\begin{cases} \text{по весу:} & \text{по объему:} \\ 0,005 & \text{Be} - 0,009 \\ 0,005 & \text{Cu} - 0,02 \end{cases}$

Весь столбец 7 мной вычислен из столбца 4; те цифры, которые получены мной на основании новых данных и отличаются от старых, помещены в столбце 5.

Основания следующие:

C — содержание понижено в связи с выяснившимся понижением содержания CO_2 в свежих породах.

Ba — оставлено старым, несмотря на удвоение у Кларка. Вашингтон считает меньшую цифру правильной.

Sr — повышено, согласно мнению Кларка и Вашингтона.

F — вдвое повышено, согласно мнению Вашингтона.

Li — согласно и Кларку и Вашингтону, понижено вдвое.

B — согласно Вашингтону, должно быть понижено в 100 раз. Условно считаю, на основании ряда соображений, возможным понизить лишь в 10 раз.

V, Cr, Ni — последние работы американской школы совершенно определенно заставляют повысить вдвое содержание этих элементов.

Кроме того, в мой пересчет включены Be и Cu.

Be — сохранено в старом виде: весовое 0,005 и объемное 0,0095.

Cu — беру наиболее вероятное число, промежуточное между цифрами Кларка и Вашингтона: весовое 0,005 и объемное 0,02.

Вообще в табл. 6 дается сводка последних наших сведений о составе земной коры.

В ней особенное значение я приписываю столбцам 6 и 7, представляющим проценты числа атомов: эти цифры получены путем деления соответственных столбцов весовых процентов (т. е. для 6-го столбца — 4 и для 7-го столбца — 5) на атомные веса. В некоторых отношениях эти цифры указывают и на объемные соотношения в количествах отдельных элементов.

Жирным шрифтом выделены порядковые номера выше 28.

Таблица 7

Средний состав всей земной коры по декадам
(по весу)

Процент содержания		Сумма процентов по весу, пересчитанная на 100%
Больше 10	I. O, Si	75,43
1	II. Al, Fe, Ca, Na, K, Mg, H	22,93
0,1	III. Ti, C, Cl, P, S	1,24
0,01	IV. Mn, F, N, Ba, Zr, V, Cr, Ni, Sr, Br	0,37
10^{-2}	V. Li, Be, Cu, Co, Zn, Pb, B, Ce и ред. земли (Y, La и др.), Th	0,028
10^{-4}	VI. As, Sn, Ar, U, J, Hf	0,0018
10^{-5}	VII. Cd, Hg, Sb, Mo, Nb	0,00021
10^{-6}	VIII. Ag, W, Bi, Ta, Rb	0,000022
10^{-7}	IX. Se, Au, Te, Tl, Cs, In	0,0000025
10^{-8}	X. He, Ne, Ga, Ge, Kr, Ru, Rh, Pd, Xe, Po, Em, ...	
и ниже	Ra, Ac, Pa	Меньше 0,0000010

Таблица составлена по 4 и 5 столбцам табл. 6 и по табл. 5. Частично мной сделаны некоторые изменения. По сравнению с цифрами Вашингтона некоторые цифры, относящиеся к элементам низших декад, повышены. Приняты во внимание и последние подсчеты В. И. Вернадского (История минералов земной коры. Пг., 1923, I).

Жирным шрифтом выделены элементы четных порядковых чисел.

Таблица 8

Средний состав всей земной коры по числу атомов

	Число элементов	Количество атомов, %
I. O, H, Si	3	86,84
II. Al, Na, Mg, Ca, Fe, K	6	12,01
III. C, Ti, Cl	3	0,78
IV. F, P, S, N, Mn, Cu, Li	7	0,291
V. Be, Cr, V, Ni, Zr, Ba, Sr, B, Br	9	0,0468
Вероятная VI—Ar. Co, Zn, As, Se, Sn, J, Pb . . .	28	Всего свыше 99,96

Выделены только первые пять декад, так как относительно остальных у нас нет достаточно положительных данных. Таблица представляет лишь переработку столбца 7 табл. 6.

Как и в табл. 7, жирным шрифтом выделены элементы четных порядковых чисел.

Таблица 9

Изображение табл. 8 по порядковым числам (28 элементов)
(числа положительного заряда ядра)

I. 8. 1. 14
II. 13. 11. 12. 20. 26. 19
III. 6. 22. 17
IV. 9. 15. 16. 7. 25. 29. 3
V. 4. 24. 23. 28. 40. 56. 38. 5. 35

Жирно напечатаны элементы чисел выше 28.

Для сравнения привожу следующую вероятную декаду:

VI. 18. 27. 30. 33. 58. 50. 53. 82.

Таблица 10

Изображение табл. 8 по изотопическим числам¹
(числа нейтральных электронов в ядре)

I. 0. —. 0. 1 (2).
II. 1. 1. 0. 1. 2. 0. 4. 1. 3.
III. 0. 4. 1. 3.
IV. 1. 1. 0. 0. 5. 5. 0. 4.
V. 1. 4. 5. 2. 4. 10. 22. 12. 1. 10.

Жирно напечатаны изотопические числа выше 6.

Для сравнения привожу следующую декаду:

VI. 0. 4. 5. 5. 9. 24. 19. 21. 44. 45. 46.

Вышеприведенные таблицы дают основной фактический материал для суждения о распространенности отдельных элементов в земной коре.

§ 9. На основании собранного фактического материала последовательно можно перейти к формулировке некоторых выводов, непосредственно намечающихся при наблюдении полученных результатов. В настоящем я сведу их без какой бы то ни было попытки пока дать им толкование, к каковому я перейду позднее, в главах XI и XII.

1. Химические элементы входят в состав земной коры в количествах весьма различных, причем амплитуда этих колебаний превышает 10^9 , т. е. миллиард раз.

¹ Изотопическим числом называется: $P - 2M$, т. е. разность между атомным весом и удвоенным порядковым числом (число Мозли). Изотопические числа до 28-го элемента выражаются небольшими величинами, далее начинают быстро расти.

Значение изотопического числа для характеристики элементов отмечалось очень многими учеными

2. Преобладающее значение в земной коре имеют только немногие элементы из 88 известных, причем можно подсчитать (по числу атомов, см. табл. 6, столбец 7), что

первые 3 составляют	86,84%
» 9 »	98,85%
» 12 »	93,63%
» 19 »	99,921%
» 28 »	свыше 99,967%

3. Преобладающее значение в земной коре имеют элементы легкие, с низкими атомными весами и малыми порядковыми числами. В табл. 9 даны порядковые числа первых 28; мы видим, что в их числе имеется только пять элементов с порядковым числом выше 28, а именно: 29 — Cu, 35 — Br, 38 — Sr, 40 — Zr, 56 — Ba, и отсутствуют только элементы: 2 — He, 18 — Ar, 21 — Sc, 27 — Co. Два из этих элементов (Ar и Co) уже занимают первое место в следующей декаде.

4. Согласно работам Гаркина, элемент определяется не только атомным весом (P) или порядковым номером (M), но еще изотопическим числом изотопа (n). Табл. 10 показывает преобладание тех изотопов, числа коих наименее отклоняются от 0, и, значит, именно тех элементов, для которых атомный вес получается ближе всего удваиванием атомного числа. На эту сторону вопроса в свое время обратил внимание сам Гаркинс. Уже в пятой декаде наблюдается большое отклонение от этой схемы, причем сразу скачком, с середины ее, идет резкое изменение свойств.

5. Любопытно преобладание в земной коре элементов четных порядковых чисел и четных атомных весов. В табл. 7 и 8 четные элементы набраны жирно по порядковым номерам.

Если сравнивать атомные числа, то и в них заметно преобладание четных; если известно несколько изотопов, то преобладает обычно четный, что видно из среднего природного атомного веса.

Если мы произведем расчисление по табл. 8, то на четные упадет 74,84%, а на нечетные 25,12, т. е. 3 : 1. При расчислении по табл. 7 (цифры столбцов 4 и 5 табл. 6) получается соотношение 86,31 : 13,68, т. е. немного более, чем 6 : 1.

6. Более знаменательным является неравномерное распространение в земной коре элементов, построенных по разным типам. Так, если взять первые 28 элементов (табл. 7 и 8), то мы получим следующие любопытные данные:

Таблица 11

Количество четных элементов	По весу 86,36	По объему 74,86
Количество элементов $4q$	86,31	74,81 (74,81)
» » $4q + 1$	0,01	0,01 (0,00)
» » $4q + 2$	0,05	0,05 (0,05)
» » $4q + 3$	12,68	7,91 (7,89)
Отдельно стоит водород	1,00	17,18 (17,18)

Из этого мы видим большое преобладание элементов двух типов: особенно $4q$ и в меньшей степени $4q + 3$.

Еще интереснее картина получается, если мы точно разберем первые 28 элементов с их изотопами (по табл. 8)¹.

Таблица 12

$4q + 0$	O, (Si), (Mg), Ca, Fe, C, Ti, S, Cr, (Ni) . . .	$< 74,810$
$4q + 1$	(Si), Be, Ba, (Br), Mg, (Cl), (K)	$> 0,014$
$4q + 2$	(Si), (Mg) N, (Ni), ((Li)), ((B)), (Fe)	$> 0,054$
$4q + 3$	Al, Na, (K), (Cl), F, P, Mn, Cu, (Li), V, Zr, Sr, (B), (Br)	7,908
$0 + 1$	Только H	17,180

В этой таблице помещены и изотопы в скобках, причем набран жирно тот изотоп, который преобладает в смеси. При подсчетах только он и принимался во внимание².

Если мы независимо от распространения будем рассматривать эту таблицу, положив в ее основу первые 28 элементов менделеевской таблицы, то это не внесет сколько-нибудь определенных изменений в подсчеты:

1. В первом ряду надо будет прибавить еще He, Ar, Ne.

2. Во втором будут исключены Be, Ba, (Br) и добавлен скандий.

Цифры в этом случае несколько понизятся.

3. Третья группа останется без изменений.

4. В группу должен быть включен бериллий и исключены Cu, Zr, Sr, (Br).

Цифры, принятые для первых 28 элементов по менделеевской таблице, а не по их значению в земной коре, помещены мною в табл. 11 в скобках. Мы видим поразительное совпадение этих цифр, показывающее, что первые 28 элементов в действительности определяют собою весь характер состава земной коры.

При этом перечислении мы можем брать лишь главные изотопы и должны пренебрегать теми, кои в табл. 12 поставлены в скобки, так как не знаем в ряде случаев точного количественного соотношения изотопов одного и того же элемента. В частности, это пренебрежение некоторыми изотопами наиболее существенно отражается на перечислении Mg и Ni, часть коих должна быть отнесена преимущественно к группе $4q + 2$. Это вызывает понижение всех чисел первого и четвертого ряда и повышение чисел третьего ряда и немного второго, причем такое изменение более чувствительно для последних двух столбцов (по Демпстеру соотношение изотопов Mg: 24—75%, 25—12,5%, 26—12,5%).

На основании этой таблицы мы делаем вывод:

В земной коре $7/_{10}$ числа всех элементов принадлежат к типу $4q + 0$; второе место занимает водород, к которому относится несколько менее $2/_{10}$ всех атомов коры; третье место принадлежит (менее $1/_{10}$) атомам типа $4q + 3$, тогда как на оба типа $4q + 1$ и $4q + 2$ приходится только около $7/_{10000}$ долей общего числа атомов.

Преобладание типа $4q$, а потом типа $4q + 3$ сказывается не только в этих количественных подсчетах, но и в особых свойствах тех групп элементов, которые являются смесями нескольких изотопов. В них всегда средний атомный вес смеси элемента, как мы его наблюдаем в природе, ближе к типу $4q$ или $4q + 3$, чем к другим типам, что показывает на преобладание именно этих двух типов³.

Наконец, особый интерес представляет список элементов типа $4q$: он нам необычайно напоминает элементы, из которых состоят метеориты (см. ниже на стр. 276).

7. Очень характерно преобладание элементов, не образующих изотопов, т. е. чистых. Из первых 28, насколько нам известно, только Si, Mg, K, Cl, Li, Ni, Br и, может быть, Fe состоят из изотопов.

¹ Подробнее эти расчеты см.: А. Е. Ферсман. Об одной законности распределения химических элементов в земной коре. Доклады РАН, 1923.

² Гаркинс в своих расчетах поступал иначе, основываясь на весьма еще спорных подсчетах количественного распространения отдельных изотопов одного и того же типа.

³ Те же подсчеты по отдельным оболочкам земной коры см. дальше, в главе III

На элементы чистые приходится около 80% общего числа атомов.

8. Весьма характерно присутствие в списке наиболее распространенных элементов, главнейших элементов живой материи: O, H, Na, Mg, Ca, Fe, K, C, Cl, P, S, N, F, причем, за исключением только Mg, K, Cl и, может быть, Fe, все они принадлежат к элементам чистым, т. е. без известных нам изотопов.

9. При сравнении с менделеевской таблицей наблюдается преобладание четных вертикальных групп, что можно было вывести из пункта 5. Подавляющее число атомов принадлежит, несомненно, к четным рядам таблицы.

10. Как это вытекает из пункта 3, почти все распространенные элементы относятся к верхним четырем рядам менделеевской таблицы, сразу обрываясь на Ni или Cu, т. е. на 28-м порядковом числе. За этим числом начинается как бы совершенно новая область химических элементов, резким скачком отделенная от вышележащих четырех рядов.

11. Радиоактивные элементы занимают ничтожно малое место в природе, равно как другие более тяжелые химические элементы, значение коих в общем убывает с увеличением атомного веса и порядкового числа.

Резюме и рюем: В земной коре преобладают легкие элементы четных порядковых чисел, почти без исключения составляющие первые два больших ряда менделеевской системы, по преимуществу построенные по типу $4q$, реже по типу $4q + 3$, принадлежащие к четным группам менделеевской системы и в общем чаще чистые, не образующие изотопов и преимущественно нерадиоактивные. Метод количественного подсчета валового состава земной коры оказался необычайно важным для разрешения ряда геохимических проблем: числа, выражающие означенный состав, должны отныне именоваться **к л а р к о в с к и м и ч и с л а м и** с подразделением их на кларковские весовые и объемные числа или буквенно **Kp** и **Kv**.

II. ЗАКОНЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ В ЗЕМНОЙ КОРЕ

§ 10. В этой главе мы попытаемся дать обзор ряда вопросов, связанных с распространением элементов в земной коре, причем последовательно коснемся нижеследующих вопросов:

А. Совместное нахождение отдельных элементов.

Б. Совместное нахождение групп элементов (ассоциаций) и связь с определенными петрографическими типами.

В. Связь элементов с отдельными зонами земной оболочки, с отдельными геологическими факторами, с отдельными моментами геологической истории.

Хотя и в этой главе, как и в предыдущей, мы будем останавливать наше внимание только на фактической стороне вопроса, тем не менее мы не можем не коснуться причин тех закономерностей, которые обуславливают те или иные явления. Вопросу о тех явлениях и тех силах, которые вызывают перемещение элементов и этим нарушают современное *status quo*, будет посвящена специальная глава.

Совместное нахождение отдельных элементов

Несомненно, что в основу наших представлений о совместном нахождении элементов в природе необходимо поставить точный эмпирический материал по распространению каждого элемента в

отдельности и по выяснению тех спутников, с которыми этот элемент обычно встречается в земной коре.

В этом направлении был уже давно накоплен обильный материал наблюдений, и, начиная с опытных данных фрейбургских рудокопов и Агриколы и кончая современными успехами горного дела, намечен целый ряд комбинаций элементов, вместе встречающихся в геохимических процессах. Эти закономерности совместного нахождения некоторых элементов уже вошли в обиход как самой науки, так и проспекторской геологической деятельности, и такие сочетания, как Te и Au или Rb и Zn , Ag , являются настолько обычными, что их считают совершенно закономерным процессом, забывая, что этому сочетанию мы до сих пор не можем дать рационального объяснения.

Причины, вызывающие совместное нахождение отдельных элементов, весьма многочисленны и далеко не исчерпываются только химической близостью самих элементарных тел.

В общем основными причинами, обуславливающими закономерные сочетания элементов, надо признать:

1) Близость химических свойств элементов, обуславливающую образование одинаковых продуктов при геохимических реакциях земной коры. Такова, например, близость свойств редких земель не только в лаборатории, но и в природе, редко отделяющей эти элементы друг от друга. Таковы Nb и Ta , иногда Zr и Ti , Be и Al , Ni и Co , Zn и Cd , Cu и Ag , Fe и Mn и т. д.

2) Второй важнейшей причиной, тесно связанной с первой, является способность данной группы элементов к изоморфному замещению: совместное нахождение в природе элементов одного и того же ряда Ретгера было во всей широте впервые подчеркнуто В. И. Вернадским; при близости ретгеровских рядов к большинству вертикальных групп менделеевской таблицы мы наталкиваемся в природе на весьма частое совместное нахождение элементов одной и той же группы, например, K , Rb и Cs или Zn , Cd , или As , Sb и Bi , или Zr и Hf и т. д.

3) Следующей причиной, согласно Фогту, приходится считать резкое различие в химических свойствах, обуславливающее образование прочных химических соединений, образовавшихся с большим выделением тепла. Такова, например, связь S и Ba в BaSO_4 , K и O в K_2O и т. д. К этой же группе сочетаний Фогт относит Ti и Fe , V и Fe , V и Ti , Sn и W , Zn и Cu , Cu и Mn , Ba и Mn , Au и Te и т. д.

4) Далее, причиной совместного нахождения элементов является генетическая связь некоторых из них, объединенных общностью происхождения при радиоактивном распаде. Таково совместное нахождение He , EmRa , U и радиосвинца, выраженное в определенной количественной зависимости этих элементов друг от друга, согласно уравнению радиоактивного равновесия. Хотя распадом группы урана и тория захватывается весьма большое количество элементарных видов, тем не менее при распаде преобладает образование четных элементов, что объясняется, с одной стороны, выделением α -частицы, т. е. понижением на 2 порядковых числа, с другой, тем, что при выделении α -лучей два таких излучения нередко действуют одно после другого, благодаря чему снова разница равняется 2.

5) Равным образом в зоне биосферы совместное нахождение ряда элементов объясняется их ролью в органическом веществе и их накоплением в связи с жизнедеятельностью растительных или животных организмов. Такова обычная связь C , Fe , S , P в торфяниках, Ca с C и O в раковинах моллюсков, P , Ca и F в костях и т. д.

6) Наконец, кроме всех этих случаев, мы имеем еще длинный ряд эмпирически найденных закономерностей, которые не укладываются в вышеприведенные рамки и до сих пор остаются не объясненными. Таково, например, обычное сочетание Ag, Zn, Pb или же Ba и Mn, Th и U. К этой же группе явлений относится очень постоянное и закономерное сочетание в газовых струях Ag, Kr, Xe и Ne, что Муро и Лепан относили к поглощению их породами из первичной атмосферы¹.

§ 11. Из приведенных выше данных мы видим, что причины, обуславливающие распределение отдельных элементов в разных зонах земной коры, весьма разнообразны и не укладываются в рамки каких-либо очевидных и простых химических закономерностей.

Резюмируя, мы должны признать, что две большие группы причин обуславливают совместное нахождение элементов:

а) Их взаимные генетические отношения, которые мы лишь условно и неясно наблюдаем в отдельных группах и которые более ярко выражаются в элементах радиоактивных.

б) Химические соотношения свойств, которые совместно со всем комплексом физических признаков и геохимических особенностей обуславливают перегруппировку элементов из того первичного состояния, в котором они находились под влиянием первого положения и в котором они ныне находятся. Прекрасным примером соотношений между этими двумя факторами могут служить благородные газы, которые, благодаря своей химической инертности, не могли подчиниться второй группе причин и остались благодаря этому всюду в близких количественных соотношениях.

Совместное нахождение групп элементов

§ 12. Гораздо интереснее складывается вопрос о распределении в земной коре целых групп химических элементов так, как он вырисовывается в современной геохимии.

Суммируя сведения относительно распространения отдельных элементов, мы приходим к установлению нескольких больших групп, которые я буду называть типическими геохимическими ассоциациями.

Эти ассоциации были намечены еще в мемуаре Эли де Бомона (1847 г.), но затем были осложнены огромным накопившимся в результате наблюдений материалом и только в самые последние годы вновь были совершенно самостоятельно выявлены трудами Фогта и де Лоне.

Эти ассоциации, на основании всего имеющегося у нас материала, отвечают четырем главным типам геохимических процессов, а именно: процессам биохимического характера, процессам магматического — кислого и основного характера и, наконец, процессам жильных эманаций (с серой). С геологической точки зрения эти ассоциации, как это будет разобрано ниже, в схеме отвечают: первая — зоне биосферы, вторая — магматической зоне Sal, третья — такой же зоне Sima, причем часть ее элементов уже совершенно определенно говорит о зоне Nife. Все эти зоны пересекаются жилами с четвертой ассоциацией (см. табл. 13).

Несомненно, по отношению к целому ряду элементов возможны некоторые сомнения. Так, положение Ba и Sr совместно с другими элементами магмы выражено не очень определенно, но как будто в кислых породах Ba больше, чем Sr; не вполне ясно и положение Mn, все же встречающегося в основных породах в несколько больших количествах, чем в кислых.

¹ Moureaux et Lepape. C. R. Acad. Sci. Paris, 1914, 153.

Таблица 13

Типические ассоциации элементов¹

I. Поверхностные: H, C, N, O, благородные газы (Ne—Xe)	5 элем.
II. Кислых (салических) магм Элементы породообразующие (по преимуществу)	{ H, He, Li, Be, B, O, F, Na, Al, (P), Si, (Cl), K, (Ti), (Mn), Rb, Y, Zr, Nb, Mo, Sn, Cs, TR, Ha, Ta, W, (Au), Ra, Rn, Th, U 25 »²
III. а) Основных (средних — феррических) магм	{ C, O, Na, Mg, Al, Si, P, S, Cl, Ca, Mn, Br*, J*, Ba, Sr 15 »
б) Ультраосновных	{ Ti, V, Cr, Fe, Co, Ni, Ru—Pd, Os—Pt 8 »
IV. Жильные Металлические (по преимуществу)	{ S, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Se, Mo, Ag, Cd, In, Sn, Sb, Te, Au, Hg, Tl, Pb, Bi 22 »

¹ Четыре типа ассоциаций совершенно независимы от тех или иных гипотез, располагающих эти ассоциации пространственно на Земле.

² Знаком TR я условно обозначаю всю группу редких земель (№ 57—71).

Такой неопределенностью объясняется принадлежность ряда элементов к нескольким группам, причем очень разительную является двойственная природа Sn, идущая с двумя резко отличными геохимическими процессами, и отчасти Ti, разбивающегося между ультраосновными породами тихоокеанского типа и средними щелочными сиенитами атлантического.

Наконец, можно еще отметить постоянную и закономерную связь Zr с только что указанными щелочными сиенитами или же довольно обычную связь соединений Cu, As, Bi, Au с магмами определенно кислого типа.

Как ни многочисленны могут быть замечания по поводу частностей приведенной таблицы, но несомненно, что в первом приближении она намечает основные черты распределения элементов в земной коре.

Вопрос о кислых и основных породах будет обсужден дальше, в связи с составом разных оболочек земной коры. Хотя деление элементов на четыре группы довольно резко сказывается в валовых подсчетах, тем не менее оно очень неясно для ряда плохо изученных с геохимической точки зрения элементов. Так, В. И. Вернадский считает благородные газы широко распространенными в земной коре, а Br и J затрудняется связывать с основными магмами.

Установив приведенные выше четыре большие группы ассоциаций, мы уже выходим за пределы чисто химических или физико-химических закономерностей; перед нами уже определенное геохимическое явление, основой которого лежат в законах распределения элементов не только в одной земной коре, но и во всем мироздании.

§ 13. Второй вопрос, который сейчас напрашивается и непосредственно вытекает из предыдущего, это связь химических элементов с определенными горными породами и определенными типами пород. Уже табл. 3 показывает нам в первом приближении состав кристаллических пород и разных типов осадочных. Мы зашли бы слишком далеко, если бы попытались далее расшифровать эти цифры и подробнее осветить этот вопрос, составляющий основу современной геохимии. Разнородные химические процессы в разных областях земной коры перегруппировывают соединения, то рассеивая химические элементы в одних местах, то концентрируя их в других (см. главу XI).

Гораздо важнее для нас связь определенных элементов с разными типами магматических пород. С одной стороны, намечается совершенно определенная связь с кислотностью пород, как это отмечено в § 12; здесь в общей схеме приуроченность определенных элементов к разным группам пород несомненна и имеет глубоко закономерный характер. Гораздо интереснее и сложнее вопрос о связи химических элементов с теми двумя большими группами магм, которые Бекке и Прайор выделили в две большие области: пород тихоокеанской и атлантической магм.

Еще Бекке указывал на то, что в атлантических породах преобладают определенные элементы, но при этом он ограничивался только элементами породообразующих минералов. Между тем мы хорошо знаем, что отличие этих магм идет глубже и что к атлантической особенно приурочено увеличение содержания некоторых элементов, а именно: P, Cl, Zr, Ti, TR, Th. Накоплением этих элементов обуславливается своеобразие минеральных ассоциаций в большинстве крупных атлантических массивов (Гренландия, Ю. Норвегия, Кольский полуостров и т. д.).

Связь редких и тяжелых элементов с различными петрографическими типами до сих пор еще недостаточно освещена, хотя обещает ряд интереснейших закономерностей¹.

§ 14. Наконец, третий вопрос приводит нас вообще к соотношению между химическими элементами и различными геологическими процессами.

Распределение химических элементов в отдельных областях является результатом химических и физических процессов, идущих в земной коре на разных ее глубинах, и поэтому зависит непосредственно от тех геологических явлений, которые наблюдались в данной области в течение всей ее геологической истории. Ввиду этого в земной коре могут быть намечены отдельные самостоятельные районы, обнимающие области распространения каких-либо крупных геологических факторов и объединяющие совокупность физико-химических процессов, как результат первых.

Таковыми областями можно намечать, например, Альпийскую складчатость, Фенноскандинавский щит, Уральский хребет и т. д. Каждая из этих областей земной поверхности характеризуется комплексом химических элементов, играющих в ней роль и обладающих большей или меньшей в ней распространенностью. Совокупность химических элементов, встречающихся в таких геологических обособленных областях земной коры, я называю естественной геохимической ассоциацией; сравнение же таких естественных ассоциаций с типическими и установление сходства или различия между ними и составляет одну из задач геохимического исследования земной коры.

Изучая таким образом геохимические ассоциации элементов, собственные определенным районам России, я убедился, что такая ассоциация в значительной степени охарактеризовывает каждый данный район, являясь конечным выражением — результатом геохимических и физических процессов, которые шли и идут в данной области.

Эти области как бы расширяют старые понятия Спарра о металлогенических провинциях и вместе с тем связывают их с металлогеническими эпохами Линдгрена.

§ 15. Подведем и т о г и сказанному о распределении групп элементов в земной коре:

1. В земной коре мы наблюдаем закономерное сочетание не только отдельных элементов, но и целых групп.

¹ Ф. Ю. Левинсон-Лессинг. Известия Политехнического ин-та, Пг., 1915, XXIII, 459.

2. Основные группировки определяются четырьмя главными группами: поверхностных, кислых, основных и металлических элементов, в основе чего лежит разнообразие термодинамических условий земной коры.

3. Определенные сочетания элементов образуют геохимические ассоциации: мелкие различия в них обуславливают отклонения местных естественных ассоциаций каких-либо районов от типических.

4. Объединяя в себе совокупность всех элементов данного участка земной коры, геохимические ассоциации включают и петрографические провинции (comagmatic regions) Вашингтона и металлогенические провинции Спарра.

5. Образование определенной геохимической ассоциации является результатом миграции элемента или законов его первичного накопления, и потому каждая ассоциация должна быть рассматриваема, как сложный результат явлений космических, геофизических и геологических.

6. Миграция элементов определяет изменение состава ассоциаций во времени, чем определяется существование определенных элементогенетических эпох.

7. Изменение геохимических ассоциаций с глубиной является одним из важнейших процессов нашей планеты, позволяющим глубже проникнуть в природу распределения элементов на Земле.

III. ЗАКОНЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ НА РАЗНЫХ ГЛУБИНАХ

§ 16. Теперь мы можем перейти к рассмотрению основных вопросов связи элементов с теми или иными частями земной коры. И в этой главе, как и в предыдущих, мы будем весьма кратки, резюмируя лишь основные достижения современной геохимии и не останавливаясь на деталях или на объяснении самого фактического материала.

Наблюдается ли какое-либо закономерное изменение среднего состава земной коры с глубиной?

На этот вопрос, совершенно очевидно, приходится ответить положительно: уже существование основных трех оболочек, которые В. И. Вернадский называет фазовыми, наводит на эту мысль: атмосфера, гидросфера и литосфера.

В первом приближении мы можем наметить следующую схему преобладания элементов в разных зонах земной коры:

Таблица 14

Верхние части атмосферы	H, He, геокороний (?)
Гидросфера	H, O, Na, Cl, отчасти S.
Литосфера	
Поверхностные зоны . . .	O, H, Si, Al, C—зона Sal.
Средние » . . .	O, Si, Al, C, Ca, Mg, K, Na—зона Sima.
Глубинные » . . .	(O), Si, Fe, Cr, Ni, Cu—зона Nife.

Эти данные весьма интересно сравнить с табл. 8 или 7, в которых элементы распределены в порядке уменьшения их значения.

Первый элемент в них — кислород, один из важнейших элементов земной поверхности, входящий в состав воздуха и обуславливающий жизнь на Земле (атмосферу).

Первый и второй, вместе взятые, дают воду, т. е. основное вещество второй зоны — гидросферы.

Первые четыре элемента вместе представляют глину, т. е. один из обычных продуктов поверхностных зон разрушения (зоны выветривания — гипергенеза).

Первые десять элементов дают нам представление о всей зоне катоморфизма и цементации, т. е. о наиболее внешних зонах литосферы.

Иначе говоря, в самых первых элементах нашей таблицы отражается вертикальная зональность геохимических процессов Земли, и по мере присоединения все новых и новых элементов последовательно с самой крайней зоны Земли — атмосферы — мы опускаемся в более глубокие зоны: сначала в гидросферу, потом в отдельные оболочки литосферы.

Основные черты изменения состава с глубиной могут быть сведены к следующему.

В пределах доступной нам земной коры мы наблюдаем накопления более легких элементов во внешних оболочках и увеличение удельного веса их — в более внутренних. Это повышение значения более тяжелых элементов с глубиной захватывает лишь первые 28—30 элементов, причем эта закономерность для более тяжелых элементов с атомными весами выше 60 не наблюдается.

С глубиной мы наблюдаем уменьшение содержания O и Si и увеличение — Fe, Cr, Ni и Mg.

Только что намеченные нами закономерности охватывают лишь главнейшие элементы таблиц 7 и 8. Имеются ли какие-либо данные по этому вопросу и для других элементов? Как только что было указано, в общем для тяжелых элементов мы не наблюдаем закономерности увеличения содержания их с глубиной. Наоборот, как это будет отмечено ниже, большая часть элементов нижней части менделеевской таблицы оказывается связанной с такими процессами, глубинное происхождение коих мы должны совершенно определенно отвергать. Так, например, такие элементы, как Nb, Ta, Zr, Mo, W, Th или U (порядковые номера 41, 73, 40, 42, 74, 90, 92), определенно связаны с кислыми магмами, положение которых в идеальном разрезе земной коры, несомненно, должно быть отнесено к более наружным частям силикатной магматической коры Земли.

Это особенно поучительно по отношению к радиоактивным элементам, которые с глубиной определенно уменьшаются, как это можно видеть из среднего содержания радия в породах разного типа: так, в ультраосновных глубинных породах количество радия в 6 раз меньше, чем в кислых (гранитах).

§ 17. Пока мы только качественно характеризовали изменение земной коры с глубиной. Перейдем теперь к более точным подсчетам (табл. 15 и 16), которые возможны в настоящее время. И в данном случае все тот же метод определения среднего состава земной коры, выдвинутый Кларком, приводит к выдающимся результатам.

В нашем анализе цифрового материала мы будем исходить из точных цифровых данных о среднем составе трех типов пород: гранитов, базальтов (габбро) и перидотитов. Эти три типа, несомненно, в общих чертах характеризуют основные оболочки — Sal, Sima, Nife, и если в средний состав пород не входят многочисленные жильные элементы, свойственные этим зонам, то все же сами породы в достаточно яркой степени характеризуют количественное изменение магматических пород с глубиной

Таблица 15

Средний состав кристаллических
пород
(в весовых процентах)

	Граниты	Базальты	Перидотиты
SiO ₂	69,92	49,06	44,39
TiO ₂	0,39	1,36	0,88
Al ₂ O ₃	14,78	15,70	5,14
Fe ₂ O ₃	1,62	5,38	3,88
FeO	1,67	6,37	6,70
MnO	0,13	0,31	0,19
MgO	0,97	6,17	29,17
CaO	2,15 ¹	8,95	6,31
Na ₂ O	3,28	3,11	0,64
K ₂ O	4,07	1,52	0,76
H ₂ O	0,78	1,62	1,80
P ₂ O ₅	0,24	0,45	0,14
Ср. уд. вес	2,66	2,93	3,18

Таблица 16

Средний состав кристаллических
пород
(по числу атомов)

	Граниты	Перидотиты
O	62,03	57,35
H	1,77	4,12
Si	23,76	15,19
Al	5,93	2,08
Na	2,17	0,43
Mg	0,49	14,94
Ca	0,75	2,32
Fe	0,89	2,93
K	1,77	0,33
Ti	0,10	0,23
P	0,07	0,04
Mn	0,04	0,06
Ba	0,01	—
Sr	Меньше 0,01 (0,004)	—

¹ В том числе BaO — 0,06 и SrO — 0,02.

Таблица 16 перечислена мной на основании табл. 15, причем для резкости взяты лишь первый и третий столбцы.

Из табл. 16 мы видим, что порядок элементов с глубиной меняется, а именно:

Г р а н и т ы:

O, Si, Al, Na, H, K, Fe, Co, Mg, Ti, P, Mn, Ba, Sr.

П е р и д о т и т ы:

O, Si, Mg, H, Fe, Ca, Al, Na, K, Ti, Mn, P.

Иначе говоря, кверху, к наружной оболочке, увеличивается содержание элементов:

O, Si, Al, Na, K, P, Ba, Sr,

уменьшается:

Mg, Ca, Fe, Ti.

Эти подсчеты вполне согласуются с теми общими замечаниями, которые мы привели выше.

Перейдем теперь далее, к более углубленному анализу взаимоотношений между поверхностными и глубинными породами с точки зрения строения атома.

Для рассмотрения этих закономерностей ограничимся первыми 28 порядковыми номерами, т. е. наиболее легкими элементами, кончая

Ni. Мы уже видели, что в сущности из них, составляющих первые четыре ряда менделеевской таблицы, состоят земная кора и метеориты, ибо на остальные элементы приходится только несколько сотых по весу (или по числу атомов) коры. Поэтому мы остановимся только на анализе этих первых 28 элементов, образующих доступное нашему исследованию вещество.

Эти элементы с их изотопами можно разбить на четыре группы, исходя из общепринятого выражения их атомных весов в виде общей формулы $4q + a$, где a больше 0 и меньше 4, а под q подразумеваются порядковые числа от 1 до 15.

Это распределение дано в табл. 17.

Таблица 17

Таблица первых 28 химических элементов

$4q$	$4q + 1$	$4q + 2$	$\begin{smallmatrix} (4q - 1) \\ 4q + 3 \end{smallmatrix}$	Примечание
He	H	((Li))	Li	В скобках поставлены изотопы, имеющие меньшее значение, в двойных — изотопы, или не вполне доказанные, или совершенно не играющие роли при образовании сложного элемента
C			Be	
O			B	
Ne		((B))		
Mg	(Mg)	N	F	
Si	(Si)	(Ne)	Na	
S	(Cl)	(Mg)	Al	
Ar	(K)	(Si)	P	
Ca			Cl	
Ti	Sc		K	
Cr			V	
Fe		((Fe))	Mn	
Ni		Ni	Co	

Исходя из этого распределения элементов по группам, можно перечислить распространение отдельных групп в разных оболочках земной коры, а для сравнения и в метеоритах (табл. 18).

Таблица 18

Распространение отдельных групп элементов (по типу ядра)
(в % числа атомов)

	Средний состав земной коры	Средний состав гранитов	Средний состав перидотитов	Средний состав метеоритов
$4q + 0$	74,81	88,02	92,96	96,39
$4q + 1$	0,00	0,01	—	?
$4q + 2$	0,05	0	0,02 (?)	1,23
$4q + 3$	7,89	9,98	2,94	2,35
1 (H)	17,18	1,77 (?)	4,12 (?)	?

Рассмотрение этой таблицы приводит нас к любопытному выводу: что поверхностная оболочка земной коры отличается от более глубоких зон значительным распространением типа $4q + 3$ за счет типа $4q + 0$.

Если мы вместе с П. Н. Чирвинским и другими примем наиболее вероятное предположение, что центральные части земной коры по составу близки к составу метеоритов¹, то мы должны будем сказать, что в общем от поверхности к центру идет увеличение содержания элементов наиболее устойчивого ряда $4q + 0$ и обратно — убывает менее устойчивая группа $4q + 3$.

§ 18. Эта зависимость делается еще более очевидной, если мы от количественных подсчетов перейдем к качественному анализу табл. 17.

В ней бросаются в глаза первый и последний столбцы. Их интересно сравнить со списками элементов, характерных для кислых, с одной стороны, и основных магм, с другой, так, как они намечены в работах де Лоне и Фогта (см. выше § 12).

Привожу для сравнения две таблицы для этих двух групп пород, причем группу ультраосновных пород земной коры можно параллелизовать с составом метеоритов (см. табл. 19).

Таблица 19

Гранитные магмы				Ультраосновные магмы			
Наиболее важны в гранит- ных магмах	$4q + 3$	$n = 1$ или 5	Распад от α -ча- стицы	Наиболее важны в основных породах	$4q$	$n = 0$ или 4	Распад от α -ча- стицы
Li	Li	Li			He	He	
Be	Be	Be			(Li) (B)	(Li) (B)	
B	B	B	B	C	C	C N	
F O	F	F	F	(O)	O Ne	O Ne	
Na (Mg)	Na	Na (Mg)	Na	Mg	Mg	Mg	
Al Si	Al	Al (Si)	Al	Si, P	Si	Si	
(P)	P	P	P	S	S	S	—
					Ar	(Ar)	
(Cl)	Cl	Cl	N	Ca	Ca	Ca	
K	K	K		Ti	Ti	Ti	
Ti	V	V (?)		V			
(Mn)	Mn	Mn		Cr	Cr	Cr	
	Co	Co		Mn			
				Fe	Fe	Fe	
				Co			
				Ni	(Ni)	(Ni)	

Несомненно, что есть ряд отклонений от параллелизации рядов; так, в ультраосновных P играет большую роль, но не отвечает типу $4q$; наоборот, Co и V попадают в группу кислых пород, что совершенно не отвечает природным соотношениям. Но в общем схема выдерживается для первых 28 элементов с исключительной резкостью.

¹ К этому вопросу мы перейдем в следующей главе.

В третий столбец мной помещены элементы с соответственным изотопическим числом, а в четвертом — отмечены те элементы, кои распадаются под влиянием α -частиц в условиях опыта Резерфорда. В скобки поставлены элементы, играющие меньшую роль.

Не входя в детальное рассмотрение и объяснение этих таблиц, я только подчеркну несомненный, резко выраженный параллелизм в обеих таблицах между элементами вертикальных столбцов, а именно:

В ультраосновных (глубинных) магмах (и метеоритах) в общем преобладают элементы, построенные по типу $4q$, очень устойчивые, с изотопическим числом, равным нулю или числу кратному 4, не распадающиеся от действия α -лучей в условиях опытов Резерфорда.

Таким образом, более глубокие и, может быть, глубинные части земной коры характеризуются большей устойчивостью входящих в них химических элементов, к каковому выводу мы пришли и при подсчете количественных соотношений (см. табл. 18).

В противоположность ультраосновным породам, кислые породы, связанные с более поверхностными оболочками земной коры, содержат в своем составе в значительном количестве элементы менее устойчивые, построенные по типу $4q + 3$ (частью $4q + 2$), иногда способные распадаться при действии α -лучей.

Если взять по порядку список элементов типа $4q + 3$, то получается полная аналогия с теми элементарными телами, которые характерны для гранитных пегматитов, на основе, однако, Si и O.

Эта картина обогащения наружной силикатной коры менее устойчивыми элементами, по взглядам Гаркина, или более склонными к рассеиванию, по идеям В. И. Вернадского, еще может быть дополнена тем, что и неустойчивые атомы конца менделеевской таблицы, т. е. радиоактивные, по преимуществу связаны с породами кислыми.

Объяснение этих закономерностей не может быть сейчас дано: оно заключается в более глубоких соотношениях между природою атомов и их распределением в природе.

§ 10. Таким образом, на основании полученных выше данных мы можем нарисовать следующую схему распределения элементов в земной коре, принимая, с одной стороны, во внимание отличие тихоокеанских и атлантических магм, с другой стороны, различие в химическом составе кислых и основных магм. В этой схеме группы элементов относятся к классификации элементов на стр. 264, по большим четырем полям.

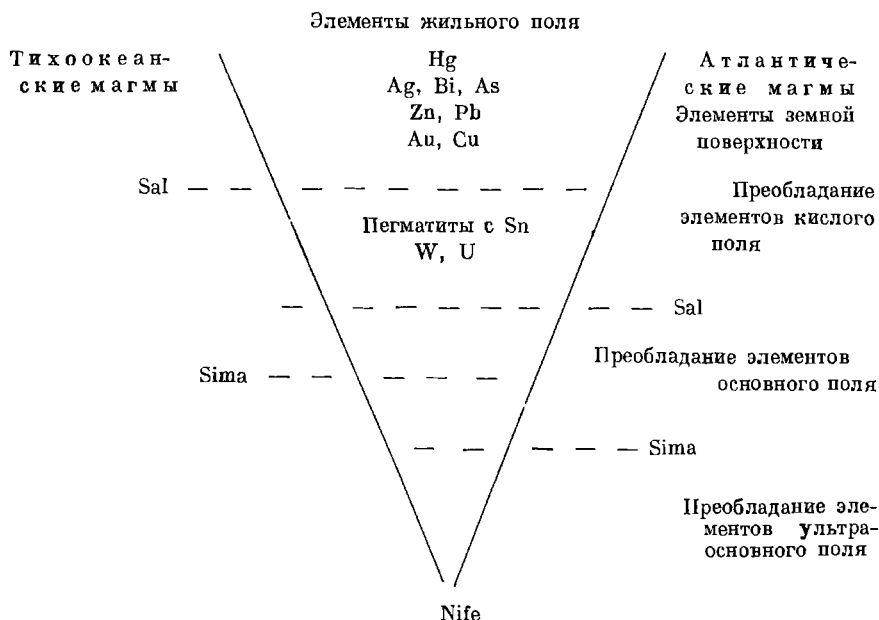
Во времени эта схема намечает изменения закономерного характера и притом в нескольких направлениях: в первые геологические эпохи преобладали тихоокеанские магмы и в значительной степени магмы Sal; в виде древних гранитов и гранитогайсов они нам хорошо известны. Из жильных элементов, как можно думать, благодаря эрозии верхних частей древних образований, сохранились только более глубокие части, чем и объясняется обилие в них элементов гранитно-пегматитового типа, золота и меди.

По мере хода геологической истории процессы перемещались слева направо: в новейшее время магмы атлантики стали преобладать (более глубокие), в других местах эрозия обнажила более глубокие зоны Nife ранее застывших массивов, а жильные процессы третичной эпохи принесли с собой металлы вышележащих зон жильного поля с Zn, Pb и т. д.

Такова та схема, которая, согласно с наблюдениями, в основных чертах объясняет главные черты геологических особенностей земной коры. Другие подходы к решению этого вопроса см. ниже.

Таблица 20

Схематический разрез через земную кору



§ 20. Резюмирую вкратце основные черты распределения элементов на разных глубинах:

1. Наблюдается совершенно определенное и закономерное изменение состава земной коры с глубиной.

2. С геохимической точки зрения мы в ней различаем три оболочки по характеру агрегатного состояния: атмосферу с преобладанием газов — кислорода и азота, гидросферу с преобладанием кислорода и водорода и твердую земную кору — литосферу.

3. Литосфера делится в самом первом схематическом подходе на три зоны: Sal, Sima, Nife; представителем первой могут явиться граниты, переходные формы к Nife образуют перидотиты.

4. С углублением идет увеличение содержания элементов: Mg, Ca, Fe и Ti.

5. Наружные оболочки, по сравнению с более глубокими, отличаются присутствием элементов, ядро которых построено по типу $4q + 3$, хотя и в них вообще преобладают элементы типа $4q$.

6. С точки зрения современных теорий строения атома и гипотез Гаркинса, преобладание в земной коре элементов типа $4q$ показывает преимущественное распространение элементов устойчивых, долговечных, неразрушаемых.

7. Так называемые щелочные магмы атлантического типа связаны с несколько большими глубинами, чем им соответствующие щелочноземельные

IV. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ЦЕНТРАЛЬНОГО ЯДРА ЗЕМЛИ

§ 21. Попрежнему наши знания о внутреннем строении ядра Земли остаются без достаточного освещения, и в то время как успехи нашего познания химии вселенной за последние годы сделали гигантские шаги вперед, знание химии ядра почти не продвинулось.

Сейчас нам известно, что удельный вес всей Земли между 5,5—5,9 и что в среднем он равняется 5,53, тогда как удельный вес покрова около 2,8. Мы знаем сейчас, что центральные части по своим механическим свойствам должны отвечать твердым металлам и что внутреннее ядро по своим свойствам тождественно с телами твердыми (Джонстон). Мы знаем, что землетрясения на глубине $\frac{1}{5}$ радиуса встречают перемену в свойстве оболочек; это поддерживает мнение геофизиков, что вслед за внешней корой с удельным весом около 2,8—3 следует средний слой удельного веса 7,2 и далее — центральное ядро с удельным весом 9,1.

Мы совершенно не знаем температуры центральных частей.

Магнитные свойства Земли, не отвечающие свойствам пород земной поверхности, высокий удельный вес и невозможность допустить в глубинах сжатие твердого вещества до таких удельных весов заставляют нас у с л о в н о принимать для земного ядра следующее:

1. Ядро составлено из более тяжелых металлов, в частности, вероятно, из железа и никеля.

2. Изменение состава земной коры с глубиной тоже приводит к вероятному преобладанию в глубинах Fe, Mg, Ni.

3. Все имеющиеся данные говорят против допущения в глубинах особой роли самых тяжелых металлов менделеевской системы.

4. По отношению к радиоактивным элементам все данные говорят определенно о понижении их содержания с глубиной, а сравнение с метеоритами заставляет признать наиболее вероятным в глубинах полное или почти полное отсутствие радиоактивных элементов.

5. В глубинах как будто бы преобладают элементы типа устойчивого 4q, т. е. наиболее устойчивые, не распадающиеся типы вещества.

6. Вероятно большое сходство в составе центрального ядра Земли и железных метеоритов.

7. На основании изучения сейсмических волн некоторые исследователи признают наиболее вероятным существование трех зон:

Наружная (=Sal, Sima)	до 1200 км со скоростями продольных волн, быстро растущими до 7—12 км/сек.
Средняя (отчасти Nife)	до 2900 км с довольно постоянными скоростями 12—13 км/сек.
Ядро	до центра со скоростями, быстро падающими и вновь достигающими 8—11 км/сек.

8. Изучение сейсмических волн не дает пока ясной картины физического состояния центральных частей Земли, но несомненно намечается несколько точек, отвечающих быстрому изменению упругих свойств, а именно (от поверхности): 120 км, 1200 км (менее отчетливый скачок), 2900 км (очень резкий).

Таковы те главнейшие выводы, которые мы с большой осторожностью можем сделать по отношению к центральным частям нашей планеты. Эти выводы еще не позволяют слить в единую картину состав земной коры и центральных частей; к ним мы вернемся при общей концепции строения всего земного шара в специальной главе после рассмотрения природы и характера метеоритов, которые проливают свет, правда только путем аналогий, на химию центральных частей нашей планеты.

V. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ МЕТЕОРИТОВ

§ 22. Переходим теперь к изучению состава метеоритов, космическое происхождение которых несомненно, хотя и не удастся до сих пор более определенно связать их с определенным типом космических тел (см. § 41).

Метеориты довольно резко распадаются на две группы: каменные и железные. Состав этих двух групп резко различен и позволяет их рассматривать отдельно¹. Хотя в коллекциях обычно преобладают железные метеориты, но ошибочно считалось, что они, если и не преобладают, то не уступают числу падений каменных. Однако такое мнение ошибочно и объясняется тем, что железные метеориты легко обнаруживаются, собираются часто независимо от падения и т. д. Меррилл в 1919 г. на основании детального изучения выяснил, что из имеющихся в собраниях железных метеоритов известно лишь 5% падений, мезосидеритов 16%, а каменных 87%. Поэтому, учитывая средний состав в с х метеоритов, необходимо брать отношение каменных к металлическим никак не более, чем 80 к 20.

В метеоритах, несмотря на все поиски, не найдены As, Sb, Au, F, Sn, W, U, Zp, Ba, Sr, Zr; в следах обнаружены Pt, Pd, Ir, Ru, V.

Присутствие в них свинца сначала отвергалось, но потом было доказано с несомненностью; точно так же позднее было доказано присутствие радия, причем по последним данным в каменных метеоритах содержание радия равняется в среднем $\frac{1}{4}$ земного, а в железных — почти равно нулю.

Любопытны некоторые правильности в составе метеоритов; так, например, по данным Крукса, хром всегда присутствует в каменных метеоритах и, наоборот, почти всегда отсутствует в железных. При внимательных анализах медь обнаруживается во всех железных метеоритах.

Очень любопытен состав большинства хондритов, повторяющих такое содержание: Nife — 9, троилита — 6, оливина — 44, бронзита — 30, олигоклаза — 10, хромита и остальных — 1%.

Столбец А (табл. 24) получен Фаррингтоном, принявшим количество (весовое) железных метеоритов в 2,57 раза больше каменных; поэтому в его подсчет окончательного состава вошел столбец табл. 22 с коэффициентом несколько большим, чем 2,5, что значительно повысило содержание Fe и Ni.

Согласно вышесказанному и данным целого ряда авторов, я сочетал таблицы 22 и 23, причем принял железные метеориты с коэффициентом 0,25.

Отсюда мы получаем следующий порядок содержания элементов в метеоритах (по весу):

По Вальо: Fe, O, Si, Mg, Al, Ca, Ni, Na, S, K, Co, P, C, H.

(1911)² 90%: ... кажд. по 1%...

По Фаррингтону: Fe, O, Ni, Si, Mg, S, Ca, Co, Al, Na, P, Cr, K, C, Mn.
(1911)

По Ферсману: Fe, O, Si, Mg, Ni, S, Al, Ca, Na, Mn, Cr, Co, K, P, (C, Cu).
(1922)

Если мы перечислим цифры столбца Б табл. 24 на число атомов, как это было мной принято при выражении состава земной коры, то получим цифры, приведенные в табл. 25.

¹ Существуют еще промежуточные типы — мезосидериты (палласиты), в которых имеется масса металла с включенными в нее большими кристаллическими зернами силикатов. В. М. Гольдшмидт указывает, что такое неразделение двух фаз, очень разнородных, можно объяснить лишь ничтожной величиной силы тяготения в условиях застывания массы металла, благодаря чему капли силиката не могли быть механически обособлены от металла под влиянием силы тяжести. Под вопросом стоит большая группа стекловатых метеоритов — тектитов.

² W. W a h l. Zs. anorg. Chem., 1911, CXIX, 52—96.

Таблица 21

Средний состав каменных метеоритов

	I	II	III
	Меррилл		Фаррингтон
	1915	1920 ¹	1911 ²
SiO ₂	38,68	38,98	39,12
TiO ₂	0,18	—	0,02
SnO ₂	—	—	0,02
ZrO ₂	—	—	—
Al ₂ O ₃	2,88	2,75	2,62
Fe ₂ O ₃	—	—	0,38
Cr ₂ O ₃	0,47	0,84 (хромит)	0,41
V ₂ O ₅	Следы	—	—
Fe	11,98	11,61	11,46
Ni	1,15	} 1,32	1,15
Co	0,07		0,05
FeO	14,58	16,54	16,13
NiO	0,48	—	0,21
CoO	0,06	—	—
CaO	2,42	1,77	2,31
BaO	—	—	—
MgO	22,67	23,03	22,42
MnO	0,29	0,56	0,18
SrO	—	—	—
Na ₂ O	0,87	0,95	0,81
K ₂ O	0,21	0,33	0,20
Li ₂ O	Следы	—	—
H ₂ O	0,75	—	0,20
P ₂ O ₅	0,26	—	0,03
P	—	0,11	0,04
S	1,80	1,85	1,98
Cu	0,014	—	—
C	0,15	—	0,06
Cl	0,08	—	—
F	?	—	—
CO ₂	?	—	—
SO ₃	—	—	—
Mn, Cu, Sn и др.	—	—	0,02
Сумма	100,04	100,64	99,82

¹ По Кларку (F. Clarke. Data on Geochemistry. 4 edit., Washington, 1920, p. 41).

² O. Farrington. Analyses of stone meteorites. Field Mus. Nat. Hist. Geol. ser. III, 1911, № 9.

Таблица 22

Состав железных метеоритов, по Фаррингтону (1911) и П. Н. Чирвинскому (1919)¹

	1919	1911
Fe	90,57	90,85
Ni	8,71	8,52
Co	0,69	0,59
P	0,22	0,17
S	0,16	0,04
C	0,11	0,03
Cu	0,06	0,02
Cr	0,06	0,01
Сумма . .	100,58	100,23

Таблица 23

Средний состав каменных метеоритов (перечислен столб. II табл. 21)

O	35,95
Fe	24,67
Si	18,27
Mg	13,89
S	1,85
Al	1,46
Ni, Co	1,32
Ca	1,26
Na	0,70
Mn	0,43
Cr	0,36
K	0,27
P	0,11
Сумма	100,54

¹ П. Н. Чирвинский. К вопросу о законах образования химических элементов вселенной. Изв. Донск. Политехн. ин-та, 1919, VII, 94.

Таблица 24

Средний состав всех метеоритов (по весу)

	А	Б
	по Фаррингтону	по Ферсману
	1911	1922
Fe	72,06	37,90
O	10,10	28,78
Ni	6,50	2,66
Si	5,20	14,61
Mg	3,80	11,11
S	0,49	1,49
Ca	0,46	1,00
Co	0,44	0,21
Al	0,39	1,16
Na	0,17	0,56
P	0,14	0,12
Cr	0,09	0,29
K	0,04	0,21
C	0,04	0,01
Mn	0,03	0,34
Остальные элементы	0,05	0,01(Cu)
	100,00	100,46

Таблица 25

Состав метеоритов по числу атомов

(по столбцу Б табл. 24)

O	49,15 (53,16)*	Na	0,66
Fe	18,54 (12,79)	Mn	0,17
Si	14,11 (15,35)	K	0,15
Mg	12,48 (13,15)	Cr	0,15
S	1,26 (1,46)	P	0,10
Ni	1,23	Co	0,10
Al	1,17	C	0,02
Ca	0,68	Сумма	99,97

* В скобках поставлены цифры подсчетов Гаркинса (Harkins, Phil. Mag., 1921, 305). Наибольшее расхождение в железе. Принимая цифры Гаркинса, мы получаем валовое среднее метеоритов, еще более близкое к земному, чем у меня.

Из приведенных данных мы устанавливаем порядок по объему (числу атомов):

O, Fe, Si, Mg, S, Ni, Al, Ca, Na, Mn, K, Cr, P, Co, C.

Этот порядок сравнительно мало отличается от порядка, принятого нами на стр. 274.

Если мы разобьем элементы по декадам, то получим (табл. 26 и 27):

Таблица 26

	По весу
I. Fe, O, Si, Mg	92,40
II. Ni, S, Al, Ca	6,31
III. Na, Mn, Cr, K, Co, P	1,73
IV. C, Cu и др.	0,02

Таблица 27

	По числу атомов
I. O, Fe, Si, Mg	94,28
II. S, Ni, Al	3,66
III. Ca, Na, Mn, K, Cr, P, Co	2,01
IV. C и др.	? (около 0,05)

§ 23. Подведем некоторые итоги относительно состава метеоритов:

1. Метеориты состоят из небольшого числа элементов в относительно больших количествах.

2. Наибольшее значение (по числу атомов) имеют первые 7 элементов (O, Fe, Si, Mg, S, Ni, Al), на которые приходится 97,94%.

3. В метеоритах главное значение принадлежит элементам средних атомных весов (между 16 и 59), порядковых чисел между 8 и 28, с малыми изотопическими числами.

4. Крупная аналогия с составом земной коры заключается в том, что в той и другой области распространенность элементов резко обрывается на 28—29 номере и далее следуют уже элементы весьма малого значения.

Таблица 28

(По числу атомов)

		Атомный вес A	Порядковое число M(озлп)	Изотопиче- ское число n	Выражение
O	I	16	8	0	$4q$
Fe		55,86	26	4	$4q$ (н из.)
Si		28,3	14	0, 1	$4q, (4q+1)$
Mg		24,32	12	0, 1, 2	$4q, (4q+1), (4q+2)$
S	II	32,0	16	0	$4q$
Ni		58,68	28	2, 4	$4q+2, 4q$
Al		27,1	13	1	$4q+3$
Ca		40,07	20	0	$4q$
Na	III	23,0	11	1	$4q+3$
Mn		54,93	25	5	$4q+3$
K		39,10	19	1	$4q+3, (4q+1)$
Cr		52	24	4	$4q$
P		31,04	15	1	$4q+3$
Co		58,97	27	5	$4q+3$

5. В противоположность наружной части земной коры, отсутствуют элементы более легкие, так что наименьший атомный вес в первых 14 элементах принадлежит кислороду — 16.

6. Состав метеоритов весьма однороден по типу, и в нем представлена группа элементов главным образом 3—4 малого ряда менделеевской таблицы.

7. Значительное сходство наблюдается между средним составом метеоритов и средним составом более глубинных пород (основных).

8. Весьма характерным для метеоритов является преобладание в них элементов типа $4q$, подчиненную роль играет тип $4q+3$.

9. Метеориты, в общем, как по характеру своих элементов, так и по типу строения атомов, совершенно тождественны с элементами наиболее глубоких зон земной коры и, по всей вероятности, еще ближе отвечают составу центральных частей нашей планеты.

10. В противоположность идеям Пиккеринга и некоторых других, резко отделявших каменные метеориты от металлических по их происхождению, Прайор доказал общность магматического происхождения п тех и других.

11. Несмотря на полную невыясненность космического происхождения метеоритов, возможна или связь их с астероидами, или же, что более вероятно, с кометами.

12. Условия кристаллизации мезосидеритов и палласитов заставляют думать, что они образовались на телах в условиях весьма слабого мирового тяготения.

13. В метеоритах не обнаружено никаких элементов, не свойственных Земле.

VI. ПРИЧИНЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ЗЕМНОЙ КОРЕ

Теория космохимического и физико-химического характера

§ 24. Совершенно понятно, что одновременно с выяснением вопроса о составе земной коры и одновременно с изучением метеоритов некоторые ученые делали попытки объяснить существующий химический порядок распределения элементов на нашей планете, часто выходя далеко за границы фактического материала и, к сожалению, теряясь в дебрях научной фантазии, космогонии и натурфилософии.

После того как в 1817 г. Доберейнер наметил преобладание в земной коре элементов с малыми атомными весами, первое более стройное изложение основных проблем химического состава Земли мы встречаем в мемуаре Эли де Бомона¹. Уже здесь намечалась в неясной форме идея объяснения состава, связанная с представлением об электрических токах, вызывающих перераспределение элементов в глубинах.

Значительно позднее, только в конце XIX века, получил большое развитие ряд идей о превращении элементов и их постепенной эволюции на космических телах. Эти идеи носили частью чисто спекулятивный характер, но, выдвинутые такими авторитетами, как Н. Морозов, Крукс, Локайер, они нашли себе позднее поддержку в явлениях радиоактивного распада и ныне возрождаются уже на основе фактических завоеваний современной физики.

Когда с 1889 г. началось новое течение в вопросах химии земной коры и Кларк положил начало точному количественному подсчету, одновременно с этим им же была высказана идея, что различное распространение отдельных элементов должно быть связано с вопросом об их первичном генезисе; однако, сам он скоро оставил в стороне вопросы объяснения найденных им цифровых данных и посвятил свои работы улучшению и уточнению средних чисел распространенности отдельных элементов.

Новое течение было выдвинуто де Лоне, который в ряде работ положил начало новым идеям распространения элементов, этим идеям подчинил свои взгляды на металлогенез земной коры и дал настолько стройное и полное изложение своих идей, несколько космогонического характера, что на много лет явился властителем дум и руководителем целой школы геологов и геохимиков. Оставаясь в рамках кант-лапласовской теории, де Лоне связал распространение элементов и распределение их на разных расстояниях от центра охлаждающейся туманности, обратных величине удельных весов, благодаря чему в наружных частях земной коры получились оболочки из более легких элементов, тогда как с глубиной намечалось преобладание более тяжелых.

Эта идея оставалась до 1916 г. единственной хорошей рабочей гипотезой, и на ее фоне была проделана огромная работа изучения рудных месторождений и выявления ряда геохимических закономерностей.

Между тем исподволь намечались и другие пути объяснения количественного состава земной коры в связи с вопросами чисто химического характера. Еще в 1884 г. была подмечена Кариелли некоторая связь между элементами в земной коре и их положением в четных или нечетных рядах менделеевской таблицы. К этим вопросам вернулись позднее Оддо, Уэдделс и автор настоящей статьи А. Ферман. Все эти вопросы вновь

¹ Elie de Beaumont. Note sur les émanations volcaniques. Bull. Soc. géol. France, 1847, IV, 1249—1334.

приближались к старой идее о связи распространенности элементов не только с их положением в менделеевской таблице, но и со строением самих атомов, типом их структур и их генетической связи. Те проблемы интеграции и дезинтеграции материи, которые в обобщениях Крукса и Локайера казались лишь интуитивными догадками, превратились в реальные картины совершенно определенной связи.

Таким образом, на основании сказанного, мы ниже остановимся на следующих двух основных путях исторической мысли:

- 1) идеях космогонического распределения атомов элементов,
- 2) идеях генетического распределения элементов.

В дальнейшем я намерен совершенно объективно изложить взгляды разных ученых на эти вопросы, приводя и встречаемые ими затруднения и несогласия. Свою идею я изложу более детально в одной из следующих глав, причем определенно считаю нужным с самого начала высказать свою точку зрения.

Современное распределение элементов в пространстве мироздания выводится сочетанием трех природных факторов:

- 1) явлений образования и преобразования элементов во времени;
- 2) явлений распределения уже готовых атомов элементов в пространстве под влиянием космических причин (тяготение, световое давление, излучение и др.);
- 3) явлений физико-химического и химического перераспределения групп атомов и молекул.

Наблюдаемое нами распределение не является стационарным: оно изменяется во времени под влиянием тех же трех основных групп мировых факторов.

Из сказанного явствует, что только закономерное сочетание трех причин — атомистической, космической и физико-химической может объяснить строение как нашей Земли, так и всего мироздания.

Первая причина связана со строением ядра — это интраатомная причина; космическая — связана с физическими свойствами самого атома, а химическая — с его химическими электронами и с группировкою атомов в «молекулы» и кристаллы.

Таким образом, вся совокупность частей атома влияет на его распределение¹.

Я отдельно изложу идеи распределения элементов в земной коре на основании данных астрофизических и физико-химических так, как они вырисовываются при современном обзоре различных теорий и идей по этому вопросу, а затем посвящу отдельную главу обзору связи между распределением химических элементов, характером их атомов и менделеевской таблицей.

К первым прежде всего относятся идеи де Лоне, Гольдшмидта и Прайора, к краткому изложению которых я и перехожу.

§ 25. Идеи де Лоне². Идея связи распределения элементов с первичным их распределением во время формирования космического тела не могла не прийти в голову при самой первой концепции строения видимого мира. Поэтому неудивительно, что еще Демокрит говорил, что

¹ Закономерности перераспределения элементов в космосе подробнее описаны мной в главе XI.

² L. de Launay. Rev. gén. sci., 1902, 30 Avril; 1904, 30 Avril. L. De Launay. C. R. Acad. Sci., Paris, 1904, CXXXVIII (Mars). L. De Launay. La science géologique. Paris, 1905, 627—665. L. De Launay. Les gîtes minéraux et métallifères. Paris, 1913, 1, 12—54.

«при образовании Земли тяжелые атомы (по его мнению и самые большие) должны были собраться в середине, а легкие снаружи, где они входят в общение» с наружным пустым пространством. Эта идея лежала и в основе концепции Канта — Лапласа, в которой концентрирование элементов в туманностях как раз подчинялось этому принципу, связанному с действием ньютоновских сил. Постепенно росла и кристаллизовалась эта идея во французской школе геологов и вылилась в цельную и стройную систему на пороге XX века у де Лоне.

Его основное положение гласило так: «в еще раскаленной Земле до образования твердой коры химические элементы отделились от центра на расстояния, обратно пропорциональные атомному весу (позднее он вносит поправку — удельному весу), как если бы диссоциированные атомы, вне всяких соединений и при весьма высоких температурах, были подчинены исключительно действию мирового тяготения и центробежной силы».

Последовательно разбирая под этим углом зрения состав земной коры и идя от наружных оболочек к более глубоким зонам земной коры, он намечает отдельные глубинные зоны преобладания элементов соответственно следующим семи группам:

- I. Первичная атмосфера: Н.
- II. Атмосфера: О, N, (A, Ne).
- III. Кремневая кора: Si, Al, Na, K, (Li, Be), Mg, Ca, (Ba, Sr).
- IV. Минерализаторы: Cl, S, P, (B, F), C.
- V. Основные выделения глубин: Fe, Mn, Ni, Co, Cr, Ti, V.
- VI. Жилы, связанные с пятым типом: Cu.
- VII. Рудные жилы: Zn и Pb, Sb и Ag, Hg, Bi, W, Au, U и Ra.

Сравнивая эту последовательность с атомными весами, де Лоне находит несомненную параллелизацию в означенных рядах и повышение атомного веса с глубиной. Подробно отмечая все отклонения от означенного закона, он объясняет их вторичным, чисто геохимическим переносом.

Эта идея у него сочетается с общими космогоническими соображениями. По де Лоне, атомы элементов образовались еще до их конденсации в планетарную туманность, в огненно-жидкую космическую фазу они распределились по своему удельному весу и, оставив раскаленную массу в центре с тяжелыми элементами, образовали наружную кору-окалину, образованную окислением газами шлаковых накоплений поверхности ядра. С этого момента началась геологическая история перегруппировки элементов и их дальнейшее перенакопление и рассеяние силами чисто химического характера.

Таковы основные черты этой теории, необычайно изящной и частично отвечающей наблюдаемым фактам.

Вышеприведенная группировка, с одной стороны, следует действительному увеличению содержания элементов с глубиной, а с другой, несомненно, по своему порядку напоминает таблицу распространенности элементов в земной коре Кларка и Фогта. При этом группа III намечает, вместе с четвертой, группы гранитных, кислых пород, образующих зону Sal, сами минерализаторы группы IV нередко характеризуют ювенильные воды и вулканические эманации этих же пород; группа V явно характеризует Nife, тогда как более редкие тяжелые металлы, связанные с жильными месторождениями, относятся к группе VII.

Еще большее сходство между таблицей де Лоне и данными Кларка и Фогта получается, если мы примем во внимание мои пересчеты 1912 г.

на число атомов: при этом более легкие элементы занимают более высокое положение в таблице, более тяжелые — более низкое, благодаря чему таблица еще более напоминает порядок атомных весов или, вернее, удельных весов.

Сам де Лоне отмечал слабые места своего сопоставления, причем, однако, подчеркивал, что эруптивные и гидротермальные процессы вынесли в поверхностные зоны земной коры часть глубинных элементов, чем нарушили правильность первичных соотношений. Поэтому в некоторых случаях элементы зон не вполне отвечают элементам соответственных групп де Лоне и многие из них, как Ва или Fe, должны быть понижены при таком сопоставлении.

Таковую не теоретическую, а отвечающую природным условиям таблицу рисует де Лоне в следующем виде, причем частично, для стройности, принужден сделать ряд совершенно неприемлемых и очень фантастических допущений:

Высшие слои атмосферы	H, He
Атмосфера	O, N
Металлоиды, «облегчающие выделения металлов»	F, Cl, B, J, S, Se, Te, C, V
	+ кислород P, V
	+ сера Bi, Mo, As, Sb
Силикатная кора	Si, Ti, Zr, Sn, Nb, Ta, U, W
	K, Na, Li, Cs, Pb, Ca, Ba, Sr, Mg,
	Be, редкие земли, Al, Cr, Fe, Mn
Металлы промежуточные	Ni, Co
Сернистые металлы	Cu, Zn, Cd, Pb, Ag, Hg
Первичные металлы (самородные)	Pt, Au

Нет никакого сомнения, что при всей своей заманчивости эта теория лишь частично освещает закономерности состава земной коры и вместе с тем носит частью очень гипотетический характер. В своей «Геохимии России» (1922) я более детально разбираю как положительные, так и отрицательные стороны этой гипотезы и отмечаю, что приурочивание к поверхности элементов малых атомных весов (или вернее, малых удельных весов) ограничивается лишь первыми 28 элементами менделеевской таблицы. В пределах первых двух больших периодов таблицы Менделеева в грубых чертах схемы де Лоне мы действительно видим последовательность более легких элементов в зоне Sal (Na, Al, H, Li, Be), более тяжелых в зоне Sima (Al, Si, Mg, Ca, Ti) и, наконец, еще более тяжелых в зоне Nife (Cr, V, Ti, Fe, Co, Ni). Но на этом схема обрывается: дальше следуют элементы, в которых никакой зависимости в духе этого закона нет и, даже наоборот, — далее следуют элементы именно более поверхностных зон Sal и более поверхностных жильных эманаций с тяжелыми металлами. Целый ряд более тяжелых элементов, как то: Zr, Mo, W, U, Th, TR, Hf, связанных в своей геологической истории с зоной Sal, абсолютно противоречит основному закону концентрирования элементов от центра к периферии в порядке понижения их атомных или удельных весов. Этим наносится определенный удар широкому толкованию той схемы распределения элементов, которая устанавливается фактами для первых двух больших рядов таблицы, резко отличных в своей геохимической истории от всех остальных.

Дальнейшее возражение против этой теории в ее широком толковании вытекает из изучения распространения радиоактивных элементов, содержание которых с глубиной несомненно падает и которые, таким

образом, несмотря на свои высокие атомные веса, связаны с зоной Sal.

Таким образом, на основании анализа этой гипотезы я прихожу к нижеследующим выводам:

1. В общем теория де Лоне правильно устанавливает связь между распределением элементов и их удельными весами, согласно закону мирового тяготения.

2. Основные черты трех главных оболочек, Sal, Sima, Nife, несомненно, характеризуются элементами в порядке повышения удельных весов.

3. Однако общие соображения де Лоне применимы лишь к первым четырем горизонтальным рядам менделеевской таблицы, т. е. к первым 28 элементам.

4. Более широкое толкование идей де Лоне за пределами этой части менделеевской таблицы не оправдывается фактами и наблюдениями.

§ 26. И д е и В. М. Г о л ь д ш м и д т а¹. В дальнейшем идеи де Лоне стали видоизменяться, и разными авторами на их основе были даны новые построения.

Новая и вместе с тем весьма любопытная концепция о строении земного шара была выдвинута В. М. Гольдшмидтом, известным геологом из Христиании, который рассматривает Землю, как единое физико-химическое тело, прежде всего в своей природе подчиненное закону всемирного тяготения. Отсюда неизбежно не только первичное распределение материи в земном шаре согласно законам удельного веса, но и позднейшее постоянное перемещение элементов из оболочки в оболочку, причем более тяжелые элементы постоянно стремятся книзу — в глубину, а более легкие — кверху. В этом отношении его взгляды напоминают идеи некоторых приверженцев планетезимальной теории, допускавших перенесение в глубины приносимого на поверхность метеоритами железа.

Признавая первичную землю за многофазовую систему, Гольдшмидт устанавливает следующие зоны в земной коре.

В глубинах до 2900 км (от поверхности) центральное ядро из никелистого железа с удельным весом около 8. Далее следует зона сульфидов и окислов тяжелых металлов до глубины 1200 км (от поверхности) с удельным весом 5—6. Верхняя граница этой зоны определяется результатами отражения сейсмических волн. Эта область по составу должна несколько напоминать состав метеоритов, быть богатой сульфидами, преимущественно железа, с большим содержанием кислородных соединений Fe, Cr, Ti (нечто вроде троилитовых масс в метеоритах). Еще выше идет третья зона, которую автор называет эклогитовой и которая является, в сущности, прототипом базальтовой постели Дели. Она тянется до 120 км от поверхности, обладает удельным весом в 3,6—4, находится под большим давлением, и с ней автор связывает, например, происхождение алмаза в кимберлитовых воронках Южной Африки. Наконец, самая поверхностная пленка — силикатная, с удельным весом в 2,8, тянется до глубины 120 км.

Эти идеи автор сравнивает с металлургическим процессом при обработке сернистых руд, где получаются именно три основные фазы: шлак, металл и сульфид — «штейн». Сообразно с этим тяжелые металлы, как например платина, должны быть накоплены в глубоких частях Земли.

¹ V. M. Goldschmidt. Der Stoffwechsel der Erde. Zs. Elekt. u. anorg. Chemie, 1922, XXVIII, 411; см. перевод Э. М. Бонштедта. — Природа, 1923, № 1—3. V. M. Goldschmidt. Über die Massenvertheilung im Erdinnern, vergl. mit der Struktur gewisser Meteorite. Naturwissensch., 1922, 918—920.

Привожу схему В. М. Гольдшмидта:

Наружная кора	0—120 км	Уд. вес 2,8	Силикатная кора (=Sal, Sima)
Промежуточная зона	120—1200 км	Уд. вес 3,6—4	Эклогитовая зона (отчасти Nife)
Глубинная зона	1200—2900 км	Уд. вес 5—6	Сульфидо-окисная зона
Центральное ядро	2900 до центра	Уд. вес 8	Металлическое ядро (Ni, Fe, Co, Cr)

Таким образом, из анализа этой теории мы можем вывести:

1. Идеи Гольдшмидта близко примыкают к идеям де Лоне, но выдвигают существование особой глубинной сернистой зоны.

2. Деление на оболочки отвечает тем границам упругости, кои намечаются современной теорией распространения сейсмических волн.

3. Существование специальной сернистой зоны не оправдывается ни фактами изучения геохимии Земли, ни анализом метеоритов, сходство с которыми и Гольдшмидт кладет в основу своей теории.

§ 27. Теория Прайора¹. Весьма любопытная и вместе с тем очень доказательная теория была выдвинута Прайором в 1916 г. Он подробно изучил состав каменных метеоритов и, расширяя идеи Норденшильда и Валя, обратил внимание на необычайное химическое сходство этих метеоритов, если только принять в них различную степень окисления. При этом он установил общее правило: чем меньше в хондрите никелистого железа, тем богаче последнее никелем и тем больше железа содержится в магнезиальных силикатах. Из этого он сделал весьма логичный вывод, что все каменные метеориты произошли из одного источника, из одной и той же магмы, путем различного ее окисления. При недостаточном количестве кислорода в каменном метеорите остается еще большое количество самородного металла железа, бедного никелем, даже CaS; силикаты при этом бедны железом. При более значительном окислении железо входит в состав силикатов, оставшаяся в самородном виде часть обогащается никелем, не входящим в силикаты, появляется оливин, бронзит, а строение обогащается хондрами, т. е. сферическими радиально-лучистыми шариками, являющимися показателем быстрого процесса расстекловывания. Довольно справедливо мнение некоторых, сравнивающих образование хондр с вулканическими туфами.

Эти явления Прайор переносит и на строение внутренних частей Земли. Он представляет себе ее происхождение из единой магмы, близкой по составу к каменным метеоритам и путем последовательного окисления образующей ее оболочки, которые мы в настоящее время видим на Земле. Самой глубокой зоной он считает недоступные нам скопления, богатые никелистым железом, далее оболочку более окисленную, в которой начинают преобладать оливин и бронзит. В этой оболочке мы должны встречать лишь очень богатое никелем самородное железо, что и подтверждается его находками в Новой Зеландии или в Канаде среди оливиновых и змеевиковых пород. Наконец, еще выше, по его мнению, должна находиться оболочка еще более окисленная — базальтовая, которую американские петрологи, с Дели во главе, считают основой магматических пород земной коры.

§ 28. Общая сводка геохимических теорий. Исходя из приведенных выше трех теорий и из идей, развитых мной

¹ G. T. Prior. On the genetic relationship and classification of meteorites. Min. Mag., 1916, XVIII, 40.

в главе III, я считаю возможным прийти к следующим важнейшим взглядам на распределение химических элементов в Земле, поскольку оно вытекает из геологических и геофизических данных:

1. В распределении химических элементов на нашей планете несомненно проявляются силы по преимуществу мирового тяготения, накопившие более тяжелые элементы в глубинах и более легкие — на поверхности.

2. Это общее положение одинаково приемлемо как при принятии космогонических теорий Канта — Лапласа, так и планетезимальной теории Чемберлена — Салисбюри, с тем отличием, что в первом случае распределение элементов первично и осуществляется при самой конденсации газообразной туманности, а во втором — оно возникает вторично, путем перегруппировки под влиянием силы тяжести в позднейшие стадии космической и геологической истории.

3. Центральные части земной коры и метеориты по своим основным чертам химического состава и по элементам должны быть тождественными или сходными.

4. Абсолютное количество атомов отдельных элементов на Земле в настоящее время не одинаково и в ней преобладают элементы от 1 до 28, т. е. первых четырех рядов менделеевской таблицы.

5. Для первых 28 элементов совершенно определенно намечаются формы и зоны их распределения на Земле.

6. Элементы более тяжелые играют малую роль в геохимии и распадаются на две большие группы: металлогенические и петрогенические. Из них первые могут быть связаны с большими глубинами, вторые, наоборот, — с поверхностными зонами кислых пород (см. об этом § 31 и 32).

7. Помимо сил мирового тяготения на распределение элементов в Земле должны влиять и иные силы астрофизического, физико-химического и интраатомного порядка, о чем будет речь ниже (глава XI).

ВИ. СВЯЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ С ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ И СТРОЕНИЕМ АТОМА

§ 29. Одновременно с геохимическим изучением распространения элементов на Земле намечались попытки дать и объяснения этому явлению с точки зрения теории строения атома или эволюции элементов.

В этом направлении мы можем совершенно определенно отметить три основных течения. Первое намечало чисто формальную связь распределения с менделеевской системой и зависимость тех или иных геохимических проблем от таблицы Менделеева. Второе течение, возникшее лишь в самые последние годы, намечало связь распределения элементов со строением атома. Наконец, третье основывалось на попытках построить общую картину происхождения элементов, связывая их в генетическую цепь рядом чисто спекулятивных, иногда весьма интересных, идей.

Последний путь, как не опирающийся непосредственно на факты, я пока оставляю без внимания и остановлюсь лишь на первых двух.

А. Распределение элементов и периодическая система

§ 30. Связь с менделеевской таблицей намечалась лишь постепенно, одновременно с расширением наших понятий о природе атомов и элементов.

Еще Кларк в 1890 г. подметил ряд закономерностей в количественном составе земной коры, причем, отмечая несомненную связь распространенности

с атомными весами и на редкость элементов более тяжелых, чем железо, указал, правда в весьма осторожной форме, на возможность зависимости этого явления от генетического ряда образования атомов, но не пытался тогда связывать свои подсчеты с менделеевской системой. Только в 1902 г. Акроид в весьма любопытной заметке обратил внимание на некоторые закономерности в распределении элементов, особенно если их рассматривать по отдельным вертикальным группам менделеевской таблицы, и расчислил все элементы на абсолютное число атомов (аналогично принятому мною в 1912 г. методу). Основываясь на идеях Крукса и Локайера, оп, с одной стороны, связывает распространение элементов с их формированием из первичного протила, с другой, — отмечает, что самые легкие атомы как раз отсутствуют или значительно уступают атомам с более высокими атомными весами, благодаря чему в каждой группе менделеевской таблицы распространенность элемента не вполне отвечает повышению атомных весов. Объяснение недостатка более легких элементов он связывает с тем, что они должны преобладать на других, более легких космических телах (и планетах). Он думает, что формирование тяжелых атомов, преобладавшее раньше, позднее сменялось возникновением более легких элементов.

Подмеченная Акроидом связь с вертикальными группами была более определенно выявлена Уэдделсом, который в 1914 г. отметил, что в каждой вертикальной группе менделеевской таблицы распространенность элемента сначала повышается с увеличением атомного веса, а затем быстро падает.

Еще гораздо раньше в 1884 г., Карнелли¹ подметил ряд любопытных закономерностей между распространением элементов и их положением в менделеевской таблице. В сущности он впервые подметил те соотношения, которые у меня и у Вашингтона (см. ниже) вылились в форму совершенного разделения элементов на несколько групп. Карнелли обратил внимание на особенности четных и нечетных малых периодов (см. дальше таблицу элементов 30, по Ферсману, 1922) и установил, что элементы нечетных рядов, по большей части, легко восстанавливаются, встречаются в самородном виде или образуют устойчивые соединения с Сили другими металлоидами тоже нечетного ряда. Наоборот, элементы четных периодов в самородном состоянии встречаются очень редко и обычно образуют устойчивые окислы.

Постепенно из этих работ вытекало стремление более глубоко связать таблицу Менделеева с проблемами геохимического характера. На помощь на этом пути пришли, с одной стороны, те работы (Вернадского и др.), в которых делались попытки связать распространение с рядом своеобразных черт строения ядра, с другой — работы чисто геохимического характера, в которых намечались закономерности, выявляемые путем наблюдений. К последним принадлежит прежде всего работы Вашингтона и мои, и на них я останавливаю свое внимание, тогда как в вопросах интраатомистического характера перейду позднее, в следующих параграфах.

§ 31. Работы Вашингтона². В 1920 г. Вашингтон дал новую классификацию элементов в связи с менделеевской таблицей. По его мнению, все элементы делятся на две группы, из коих одна обнимает более легкие, наиболее распространенные элементы, образующие горные породы, а вторая состоит из более редких тяжелых металлов, по преимуществу образующих рудные скопления. В то время как верхние ряды менделеев-

¹ T. Carnelli. Ber. Dtsch. chem. Ges., 1884, XVII, 2287--2291.

² H. Washington. The chemistry of the Earth's crust. J. Frankl. Inst., 1920, 190, 781--786. P. Niggli. Das Magma und seine Produkte. Naturwissensch., 1921, IX, 463.

ской таблицы сплошь состоят из элементов первой группы — петрогенических, элементы второй группы — металлогенические — целиком составляют нижние ряды таблицы. Посередине есть область, где эти элементы взаимно смешиваются, но все же настолько закономерно, что если их отделить друг от друга жирной линией, то мы получим картину, вполне симметричную, приводимую ниже в табл. 29. Вашингтон склонен видеть в этом делении весьма существенный природный процесс: петрогенические элементы встречаются обычно в первичных минералах, образующих окислы, силикаты, флюориды и хлориды, никогда или очень редко образуют сульфиды, селениды, теллуриды, арсениды, антимониды, бромиды или иодиды. За исключением железа и никеля, они никогда не встречаются в самородном виде. Металлогенические элементы, с другой стороны, обычно в качестве природных первичных тел образуют как раз те формы соединений, которые выше отмечены как не существующие для петрогенических элементов. Они очень часто встречаются в виде самородных тел; по мнению Вашингтона, и вполне справедливому, эти положения выдерживаются не вполне точно, но в общем намечают определенную природную закономерность.

Привожу таблицу Вашингтона с некоторыми изменениями, согласно новым данным. Ввиду того, что в настоящее время выяснилось, что все редкие земли должны быть помещены в одну клетку под иттрием, тогда как клетка перед вольфрамом должна быть занята новым элементом — гафнием, аналогом циркония, два ряда старых систем сокращаются и получается более стройная картина, изображенная в таблице. Сохраняя положение жирной линии по Вашингтону, мы оставляем Ta и W среди металлогенических элементов, тогда как по геохимической природе было бы правильнее их отнести к верхней группе, благодаря чему получилась бы еще большая симметрия. Предлагаемое изменение мною отмечено в таблице пунктиром.

Ниггли продолжает и углубляет теорию Вашингтона, причем пытается дать объяснение двойственной природе элементов; он отмечает, что элементы металлогенического ряда построены по более конденсированной системе, благодаря чему и должны накапливаться на больших глубинах.

Конечно, идеи Вашингтона вполне правильны, но им можно дать и иную внешнюю форму и иное толкование.

Совершенно независимо от Вашингтона мной была дана схема геохимической таблицы на фоне закона Менделеева, и эта схема, только в другом, внешнем построении, намечает ту же закономерность. К моим работам, упомянутым во введении к «Геохимии России», я и перейду в дальнейшем.

§ 32. Работы А. Е. Ферсмана¹. Мои идеи были изложены в «Геохимии России», причем представления, из которых я исходил, оказались весьма близкими к идеям Вашингтона. Чтобы яснее выразить эти закономерности, необходимо более определенно связать их с менделеевской таблицей. Для этой цели я помещаю ниже таблицу Менделеева приблизительно в том виде, как она была дана ее автором в одном из первых мемуаров о периодических свойствах элементов, т. е. где соединены четные и нечетные ряды в длинные периоды.

В основу таблицы я беру последние известные мне данные о природе элементов и их взаимных отношениях. В моей таблице в горизонтальном ряду 1—2 расположены элементы порядковых номеров 1—10; в рядах 3—4 порядковые номера 11—28; в рядах 5—6 порядковые номера 29—46; в рядах 7—8 порядковые номера 47—78, причем на долю редких земель

¹ А. Е. Ферсман. Геохимия России. Пг., 1922, I, стр. 52 и след. В таблицу вставлен Hf (Hafnium), а все редкие земли помещены в одну клетку под Y. Совершенно особняком я выделяю всю пудевую группу.

Таблица 29

Таблица Менделеева с делением на элементы металлогенические и петрогенические

(по Вашингтону, с небольшими исправлениями)

	0	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
1	—	H	—	—	—	—	—	—	—
2	He	Li	Be	B	C	N	O	F	—
3	Ne	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	—
4	Ar	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe Co Ni
5		Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	—
6	Kr	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	?	Ru Rh Pd
7		Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	—
8	Xe	Cs	Ba	TR	Hf	Ta	W	?	Os Ir Pt
9		Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	?	—
10	Rn	?	Ra	Ac	Th	Pa	U	—	—

приходятся номера 57—71; наконец, на долю радиоактивных элементов приходятся номера 81—92, оканчивающиеся ураном. Неизвестными остаются четыре элемента с порядковыми номерами 43, 75, 85, 87.

Значительное число элементарных ячеек включает в себя серию изотопов.

В таком виде эта таблица дается мною на стр. 289, причем в ней элементы безразличного характера не отмечены ничем, элементы кислых магм набраны жирно, а в клетках элементов основных пород поставлена наверху черта, причем двойная линия включает элементы ультраосновных магм.

Анализ полученного в таблице распределения элементов весьма характерен и позволяет наметить ряд закономерностей, которые до сих пор не подмечались при изучении этих явлений.

Вся таблица разбита мною жирными линиями на три больших поля, которые я условно называю полями: об ы ч н ы м (верхнее), ж и л ь н ы м (нижнее левое) и к и с л ы м (нижнее правое).

Каждое из этих наименований основывается на следующих соображениях:

Об ы ч н о е п о л е, кончающееся никелем, кобальтом и железом, характеризуется тремя типами элементов, начинаясь с элементов кислого

Таблица 30

Таблица Менделеева с геохимическими данными по Ферману (1922 г.)

Ряды	I	II	III	IV	V	VI	VII	0	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	Ряды
1	H	—	—	—	—	—	—	He	Li	Be	B	C	N	O	F	Ne	2
3	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	Ar	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe, Co, Ni	4
5	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	?	Ru, Rh, Pd	6
7	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	Cs	Ba	TR	Hf	Ta	W	?	Os, Ir, Pt	8
9	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	?	Rn	?	Ra	Ac	Th	Pa	U	—	—	10

Примечание. Верхнее поле из 4 малых рядов — поле обычное. Левое нижнее поле — поле металлическое; правое нижнее — поле кислое (кислых пород). Элементы кислых пород набраны жирно. Элементы основных магм имеют наверху клетки одну черту, ультраосновных — две.

типа совместно с биохимическими, после Na переходит к элементам по преимуществу зоны Sima, а начиная с Ti — к элементам переходных областей зоны Sima и Nife.

В это поле входят почти исключительно очень распространенные элементы, и если исключить благородные газы и скандий, то только для Co среднее содержание будет ниже $3 \cdot 10^{-3}$. Наоборот, среди элементов, не принадлежащих к этому полю, мы находим только Br, Sr и Ba, которые несколько сближаются количественно с содержанием кобальта; все остальные встречаются в количествах, во много раз меньших.

Этим положением вполне оправдывается наименование этого поля обычным.

Очень любопытным является то, что подавляющее большинство элементов типа средних и основных пород принадлежит как раз к обычному полю, и, таким образом, как общее правило может быть принято, что элементы зоны Sima с переходом к Nife (а не Sal) отвечают ближе всего картине распространенности элементов в земной коре.

Два нижних поля резко противоположны друг другу, состоя одинаково из элементов, принимающих малую роль в геохимических процессах Земли; они отличаются тем, что левое состоит из металлов резко выраженного электроположительного характера, образующих устойчивые соединения с серой, а правое — из металлов кислотного характера, не образующих соединений с серой (или образующих, но редко) и устойчивых в форме кислородных соединений. Теплоты соединений являются максимальными для первых с серой, для вторых — с кислородом.

Только сравнительно немногие элементы в каждом из этих полей нарушают эти типичные свойства, что особенно характерно для VII и VIII групп. В общем, однако, исключений не много.

Л е в о е п о л е отвечает тем химическим элементам, которые мы знаем в земной коре в виде сернистых соединений, обычно приуроченных к жильным процессам, дислокациям, выделениям сернистых фумарол и т. д. Связь этих элементов с определенным типом магм не может быть намечена; скорее они носят безразличный характер, хотя одни из них, например, Au, As, Bi, Sn, Cu, более обычны для кислых пород, другие, как Ag, Pb, Zn, — для пород средней кислотности. В общем, однако, несмотря на большую растворимость сернистых соединений в магмах основного типа, мы должны скорее связывать всю эту группу химических элементов с кислыми или средними породами, чем с глубинно-основными.

Не менее замкнутую группу составляют элементы п р а в о г о к и с л о г о п о л я. За немногими исключениями, перед нами типичные элементы кислых щелочноземельных гранитных магм. Подчеркнутые элементы всей правой половины нашей таблицы дают нам типичную картину гранитных пегматитов, и это поле еще более характерно обнимает элементы одного и того же парагенетического ряда.

Таким образом, при рассмотрении менделеевской таблицы мы устанавливаем известную закономерность распределения в ней четырех (или пяти, если выделить ультраосновную) групп элементов, т. е. тех типических геохимических ассоциаций, которые мы установили на основании суммирования отдельных наблюдений и анализа минеральных ассоциаций в породах различной кислотности.

Если посмотреть глубже на природу моих трех полей, то нетрудно будет видеть огромное сходство, а в некоторых частях и тождество с идеями Вашингтона, и лишь форма их оказалась различной.

Почти вполне совпадает мое металлическое поле с группой металлогенических элементов Вашингтона; различие лишь в Ta и W, которые я отношу не к металлической группе, что у меня несомненно правильное, чем у Вашингтона, так как у него два элемента, постоянно встречающиеся вместе, оказались разделенными (Ta и Nb, отчасти W и Mo). Вся группа петрогенических элементов совершенно отвечает моим полям: обыкновенному и кислому вместе; разница заключается лишь в том, что всю эту группу элементов я подразделяю на элементы, связанные с кислыми магмами и с основными; последние целиком легли в поле обычное.

§ 33. Исходя из этих данных, мы можем установить связь между распределением элементов и периодической системой Менделеева согласно следующим основным пунктам:

1. Таблица Менделеева дает выражение ряду закономерностей в распределении элементов в земной коре и, вероятно, на всей Земле и в метеоритах.

2. Преобладающая роль на Земле и в метеоритах принадлежит только первым двум большим периодам таблицы, составляющим как бы поля наиболее распространенных, наиболее обычных элементарных тел.

3. В общем среднее распространение элементов в каждой вертикальной группе сначала быстро растет, потом, достигнув максимума в третьем или четвертом малом периоде, быстро спадает.

4. Элементы после 28 номера могут быть с геохимической точки зрения разбиты на два поля.

5. Поле из металлических элементов включает в себе почти все тяжелые металлы, носит определенно характер электроположительный и, занимая в менделеевской таблице строго определенное место, вполне отвечает особой группе — «металлогенической» в идеях Вашингтона.

6. Поле тяжелых электроотрицательных элементов занимает в менделеевской таблице вполне замкнутое место и характерно для кислых пород.

7. Если поле кислое характерно для более поверхностных зон, особенно Sal, то положение металлического поля менее определено в земных оболочках лишь с некоторою вероятностью может быть отнесено к сульфидной оболочке Гольдшмидта.

8. Поле обычное самой последовательностью элементов от № 1 до 28 как бы намечает постепенное увеличение содержания элемента с глубиной, начиная с атмосферы и кончая группой средних и основных пород с металлическим ядром из Fe и Ni.

9. Последние элементы обычного поля определяют типичный валовой состав метеоритов.

10. Помимо выше перечисленных закономерностей, связывающих геохимическое распределение элементов на Земле и в метеоритах с менделеевской таблицей, есть еще ряд других, основывающих ту же связь на сравнительном изучении строения атомов (чему посвящается следующий раздел).

Б. Распределение элементов и строение атома

§ 34. Несомненно, что одни из самых интересных обобщений геохимии последнего времени связаны с попытками увязать распределение элементов с современными взглядами на строение материи. Это был в сущности тот же путь, который наметили Крукс и Локайер в идеях эволюции вещества, но сейчас этот путь основан на точном эксперименте и точных математических выкладках.

Крупный шаг вперед в более глубоком познании закономерностей распространения элементов представила работа профессора химии в Палермо Оддо, которая, хотя и не дала никакого объяснения подмеченным закономерностям, тем не менее еще до первых обобщений Гаркинса (1916—1921 гг.) установила ряд особенностей кларковских чисел. Уже давно было известно, что атомные числа являются кратными 4 или вообще близки к ним, о чем мы имеем целый ряд чисто формальных соображений. Обычно в литературе отмечалось, что элементы по атомным весам преимущественно представляют тип $4q$ или $4q - 1$ (или $4q + 3$, что то же самое). Основываясь на этих давно отмеченных данных, Оддо указал на значительную распространенность среди кларковских чисел земной коры атомов, кратных 4, причем отметил, что не подчиняющиеся этому довольно распространенные атомы Na, Ba, Mn, N и F составляют в сумме всего около 2,54% и отклоняются от цифры $4q$ на число, большее единицы. Если принять минимум отклонения от цифры 4 в 0,32, то сумма весов таких отклоняющихся в земной коре элементов составит лишь 13,54%, причем 86,5% придется на элементы типа $4q$. В заключение этих соображений Оддо говорит: «Эти соотношения можно принять за случайное совпадение, — или же следовало бы рассматривать и нерадиоактивные элементы как самостоятельные продукты конденсации атомов гелия?»¹

Эти совершенно справедливые идеи, как мы увидим дальше, повлекли за собой целый ряд очень любопытных соображений Гаркинса (1915—1921 гг.)

Еще ближе стал подходить к нашей проблеме Курт Шмидт, автор небольшой книжки о периодической системе элементов, посвященной

¹ См. мои подсчеты этих чисел на стр. 269.

Менделееву, и автор весьма любопытной, хотя иногда и немного любительской статьи в *Zeitschrift für anorganische Chemie*¹.

Основная идея Шмидта заключается в формировании тяжелых элементов из первичного вещества, причем он прямо отмечает, ссылаясь на работы Кларка, что для выяснения теории развития (интеграции) химических элементов весьма большое значение представляют цифры относительной распространенности химических элементов в природе, так как «только последние могут дать надежный критерий для суждения о продолжительности жизни элементов и открыть нам законы течения процесса интеграции».

Уже из этих слов мы видим, что, в противоположность другим идеям, Шмидт рассматривает природу как нормальный процесс интеграции, формирования тяжелых элементов из более легких, причем, по его мнению, этот процесс только идет и наблюдаемый состав земной коры определяет еще молодую стадию формирования элементов; имеющийся в природе водород — это остаток, еще не успевший конденсироваться в более сложные системы; радиоактивные вещества — это старые, ранее образовавшиеся атомы, спешно успевшие разложиться. Как далеко будет идти этот процесс? — спрашивает Шмидт, не находя ответа.

В своем космическом мировоззрении он стоит довольно одиноко; для Кларка, судя по его осторожным фразам, мир находится в состоянии равновесия; для Пернста главная часть природных процессов связана с распадом, т. е. излучением, но и Пернст становится определенно на точку зрения мирового равновесия, стационарного состояния современного космоса.

Идеи Пернста, сведенные в 1921 г. в его книге о мироздании, только частично касаются нашей темы. Для него одинаково возможны случайные столкновения атомов, сопровождающиеся зарождением тяжелых элементов (может быть выше, чем число урана $M=92$); для него, однако, изучаемый мир есть мир излучения не энергии, а массы, мир постепенного распада материи с ее превращением в энергию излучения. В железных и каменных метеоритах он видит формы накопления более устойчивых атомов, причем в столь распространенном в мироздании железе он видит «элемент с исключительно большой продолжительностью жизни, как бы своего рода точку отдыха в истории радиоактивного распада элементов».

Я не буду пока далее останавливаться на многочисленной литературе чисто физического характера, в которой то тут, то там проскальзывают идеи связи строения атома с вопросами геохимии и космохимии: таковы подчеркивание членов, построенных по типу $4q$ (т. е. с атомными весами, кратными 4) и с очень ярким разделением четных и нечетных рядов менделеевской таблицы; объяснение, почему большей устойчивостью должны отличаться элементы с четным порядковым числом; работы над естественной группировкой элементов в менделеевской таблице и ряд других.

§ 35. Все эти идеи, одновременно всплывавшие в разных местах у разрозненных войной научных деятелей, возникшие и у меня в моих самостоятельных работах конца 1921 г., получили наиболее яркое выражение в ряде работ профессора физической химии в Чикаго Гаркинса (1915—1921 гг.), который осветил вопрос о связи строения ядра с вопросами геохимии и астрохимии: надо, однако, отметить, что многие из построений Гаркинса искусственны и излишне усложняют зависимости, которые в основе были верно подмечены им.

¹ C. Schmidt. Periodisches System und Genesis der Elemente. Zs. anorg. Chem., 1918, CIII, 79. C. Schmidt. Das Periodische System der chemischen Elemente, Leipzig, 1917 (особенно стр. 114).

Попытаюсь свести его представления к нескольким главнейшим пунктам, причем должен отметить, что основной ход его рассуждения таков:

«Относительное распространение видов элементов с низкими атомными весами может быть истолковано, как показатель (относительный) их относительной устойчивости», — так гласит его первое положение. Второе положение, вытекающее из всех его работ, может быть выражено так: «характер строения атома элемента предопределяет его устойчивость и тем самым связан с количественным распространением элемента в мироздании», характер же атома, в общем, определяется его атомным весом (P), его порядковым числом (M = число Мозли) и, в-третьих, особенным числом, которое является не чем иным, как числом нейтральных элементов в ядре ($N = P - M$). К сожалению, и эти простые понятия Гаркинс нередко усложняет рядом перечислений и перегруппировок, ничего большего по существу не дающих, причем для части своих рассуждений он берет настоящее изотопическое число $n = P - 2M$. Лучшим выражением количественного распространения элементов в мироздании вряд ли может служить, по мнению Гаркинса, наша земная кора, а только космические тела — метеориты. Поэтому он всецело обращает внимание на распространение элементов в метеоритах и, основываясь на работах Фаррингтона, дает ряд подсчетов, очень близких к тем, которые выше мной приведены в таблицах 18, 25—28. В своих работах (1924) он принимает для Земли цифры Кларка, для метеоритов вычисляет их из данных Фаррингтона, считая, что на 10 железных приходится 350 каменных. Все расчеты, аналогично моим работам, он ведет в атомных числах (объемных отношениях).

Привожу ниже три основные его таблицы (табл. 31, 32, 33).

Таблица 31

Количество пяти наиболее распространенных в метеоритах элементов

Элементы	Количество (в %)	M	P	N	N/P
O	53,46	8	16	8	0,5
Mg ²⁴	9,86	12	24	12	0,5
Si ²⁸	13,82	14	28	14	0,5
S	1,46	16	32	16	0,5
Fe ⁵⁶	12,28	26	56	30	0,536
Сумма	90,58				

Эти таблицы Гаркинс сопровождает целым рядом мелких весьма любопытных замечаний. Прежде всего он совершенно определенно высказывается за то, что никель (№ 28) кончает собой ряд распространенных элементов метеоритов; каждый четный элемент содержится в большем количестве, чем пара соседних нечетных; в качестве примера он приводит расчет для редких земель. Редкость неона, по его мнению, объясняется его легкостью, благодаря которой он уносится из земной атмосферы.

В заключение фактической части он делает следующие шесть выводов:

1. Атомы, в которых N (т. е. $P - M$, число отрицательных электронов в ядре) четное, распространеннее, чем те, в которых N нечетное, для метеоритов в 33 раза, для земной коры в 40 раз.

Таблица 32

**Классификация изотопов по четным и нечетным числам
(в метеоритах)**

	Количество (в атом. %)	
	в земной коре	в метеоритах
Класс I . . . <i>N</i> четное, <i>P</i> четное . . .	86,9	93,2
Класс II . . . <i>N</i> четное, <i>P</i> нечетное . . .	11,2	2,0
Класс III . . . <i>N</i> нечетное, <i>P</i> нечетное . . .	2,3	3,2
Класс IV . . . <i>N</i> нечетное, <i>P</i> четное . . .	0,0	0,0

Таблица 33

Содержание (по числу атомов) элементов в метеоритах с атомными весами, кратными 4

Элементы	4 <i>q</i>	3 <i>q</i>	4 <i>q</i> не 3 <i>q</i>	3 <i>q</i> не 4 <i>q</i>	4 <i>q</i> +3	4 <i>q</i> +2	4 <i>q</i> +1
Углерод	0,12	0,12	—	—	—	—	—
Кислород	53,16	—	53,16	—	—	—	—
Натрий	0,62	—	0,62	—	0,62	—	—
Магний	9,86	9,86	—	—	—	1,65	1,65
Алюминий	—	1,21	—	1,21	1,21	—	—
Кремний ²⁸	13,82	—	13,82	—	—	—	1,38
Фосфор	—	—	—	—	0,06	—	—
Сера	1,46	—	1,46	—	—	—	—
Калий	—	0,11	—	0,11	0,11	—	—
Кальций	0,97	—	0,97	—	—	—	—
Титан	0,005	0,005	—	—	—	—	—
Хром	0,13	—	0,13	—	—	—	—
Марганец	—	—	—	—	0,06	—	—
Железо ⁵⁶	12,30	—	12,30	—	—	—	—
Кобальт	—	—	—	—	0,04	—	—
			82,46	1,32	2,10	1,65	3,03

Под *q* подразумеваются любые числа; для сравнения Гаркинс поместил в эту же таблицу и подсчеты для элементов, кратных 3, и действительно в очень резкой форме выявил значение числа 4. Эту таблицу интересно сравнить с моей табл. 18; в общем они сходны, отличие заключается лишь в том, что Гаркинс принимает во внимание и менее важные изотопы.

2. Атомы, в которых *P* (*P* = атомный вес) четное, по отношению к нечетным распространение в метеоритах в 18 раз, в земной коре в $6\frac{1}{2}$ раз.

3. Атомы, в которых *M* (число Мозли = порядковый номер) четное, распространение в метеоритах в 50 раз и в земной коре в 8 раз.

4. Атомы с нечетным N и четным P содержатся в метеоритах — 0,0, в литосфере — 0,0 и во всей земной коре — 0,05.

5. В большинстве сильно распространенных атомов $\frac{M}{P} = 0,5$, а именно: 80% в метеоритах и 85% в земной коре.

6. Атомный вес 13 атомов из 14 в метеоритах и 85% в земной коре делится на 4.

Эти фактические данные Гаркинс сопровождает рядом теоретических рассуждений, стремясь доказать, что наиболее распространенными являются те атомы, кои наиболее устойчивы с точки зрения строения ядра элемента.

В основу устойчивых элементов он ставит гелиогруппы, т. е. группы из 4, чем и объясняется значение этого числа и в менделеевской таблице и в вопросах распространенности отдельных элементов. В противоположность этим атомам, другие, нечетные, содержат малоустойчивые электроны и поэтому сами неустойчивы или недолговечны.

Во всяком случае основная идея определена и ясна:

В природе наиболее распространены элементы устойчивые и долговечные¹.

§ 36. Идеи В. И. Вернадского². Как мы видели выше, резкое преобладание в земной коре атомов химических элементов с четными атомными числами объясняется сейчас их большей долговечностью. В. И. Вернадский приводит другое объяснение, не связанное с большей продолжительностью существования атомов с четными положительными зарядами ядра. Указания на такую возможность дает рассеяние элементов. На эту форму их нахождения не обращают достаточного внимания, хотя роль его в земной коре огромна. Под рассеянием элемента следует подразумевать те формы их нахождения, которые открываются спектроскопическим, радиохимическим, электрическим путем или явлениями люминесценции. Для объяснения такой формы нахождения элемента приходится допускать существование его в виде атомов, иногда обладающих зарядами; эти атомы не объединены в молекулы, по крайней мере в значительных количествах, и не связаны с атомами других элементов.

Проявление такой способности атомов должно быть очень резко выражено во всех тех явлениях космической и, в частности, планетной химии, где в долгие промежутки времени накапливаются медленные и ничтожные — взятые единично — процессы. Им, может быть, обуславливается и наблюдаемый состав земной коры и метеоритов с преобладанием элементов с четными атомными числами.

Группа химических элементов, для которой характерны явления рассеяния, вся нацело — 100% — составлена из элементов с нечетными атомными числами. Можно убедиться, что вообще свойство рассеивания характерно для элементов с нечетными атомными числами.

Нам известен сейчас 41 элемент с нечетными атомными числами. Из них явления рассеяния отмечены для: As, Ag, As, Au, B, Bi, Br, Cl, Cs,

¹ В своих рассуждениях Гаркинс не подмечает различия между элементами поверхности и глубин в земной коре.

Очень любопытна связь между элементом и кристаллическим его строением в самородном виде. Коль устанавливает несомненную связь с положением элемента в менделеевской таблице, а именно: четные элементы обычно обладают гексагональной решеткой, а нечетные — кубической.

² В. И. Вернадский. Химические элементы и механизм земной коры. Природа, 1922, XI, 3—5, 33—37.

Eu, F, Ga, H, Ho, In, J, K, La, Li, Lu, Mn, N, Na, Pa, Pr, Rb, Sc, Tb, Tl, Tu, V и Y, т. е. для 32 элементов или 78,05 % всех таких элементов.

Элементов с четными атомными числами нам известно 46; из них рассеяние констатировано для: Ar, C, Ce, Ct, Dy, Er, Gd, He, Kr, Nd, Ne, Rn, Pb, Po, Ra, Th, U, Xe, Zn, Yb, т. е. для 21 элемента или 45,65 % всех таких элементов.

Но рассеяние элементов вызывается разными источниками. Если мы выделим из этих списков элементы, для которых рассеивание вызывается или свойствами инертных газов, или радиоактивным распадом, или неизвестной нам причиной (для элементов редких земель), то окажется, что рассеяние наблюдается для 22 из 31 элемента с нечетными атомными числами (70,90 %) и для 2 из 27 элементов с четными атомными числами (7,4 %).

Едва ли эта разница может объясняться неполнотой нашего знания.

Оставляя пока в стороне возможную причину этого явления, отметим, что она в течение достаточного времени будет проявляться в составе природных сред — земной коры или метеоритов — так, что большая часть атомов с нечетным атомным числом (т. е. нечетным положительным зарядом ядра) уйдет в окружающее пространство.

Мы получим наблюдаемый состав природных тел даже при относительно одинаковой продолжительности существования атомов с четными и нечетными зарядами ядра.

§ 37. Еще один вопрос огромной важности стоит перед геохимиком, когда он изучает распространение химических элементов и их отдельных изотопов. Как отмечено было выше в § 5, многочисленные изотопы элементов нерадиоактивных встречаются в Земле и в метеоритах вместе, в строго определенных пропорциях. В противоположность им, радиоактивные изотопы встречаются порознь, и, например, свинец урановый и ториевый встречается в разных минералах, равно как обычный свинец, представляющий как бы строго определенную смесь этих двух свинцов.

Мы не можем пока объяснить это постоянство смесей и постоянство атомных весов их генетической связью, так как генетические ряды, известные нам, а именно радиоактивные, показывают, что каждый изотоп этого типа встречается самостоятельно и часто ничем не связан с другими. Явление постоянства совместного нахождения изотопов нам очень напоминает постоянство состава благородных газов в источниках и газовых струях, где, согласно работам Муро и Лепана, между аргоном, криптоном и ксеноном (но не гелием) наблюдается значительное постоянство соотношений. Названные авторы склонны в этом видеть результат еще первичного распределения материи, не нарушенного позднейшими процессами, благодаря инертности этих газов.

В случае распространения изотопов мы можем только отметить, что в них несомненно видны некоторые черты или внутреннего сходства строения атома или общего генезиса. Так, вообще, изотопы одного и того же элемента обычно отличаются друг от друга на 2, гораздо реже на 1, благодаря чему они оказываются четными или нечетными. Впрочем, есть исключения из этого правила.

Постоянство состава сложных элементов, конечно, показывает, что после момента образования атомов все те физико-химические процессы, которым эти атомы были подвержены, не могли их разъединить, и что, следовательно, ни в метеоритах, ни в нашей земной коре после момента их образования не было таких условий, которые бы отвечали различным судьбам атомов разного атомного или удельного веса. Значит, те условия, которые вызвали образование того или иного изотопа, находятся вне той обстановки,

которую переживают и метеориты, и земная кора на современных этапах своей истории.

Было бы неосторожным делать какие-либо дальнейшие выводы в этом направлении; лучше ограничиться указанным фактическим материалом.

§ 38. На основании приведенных выше данных мы приходим к ряду весьма важных выводов:

1. В земной коре, центральных частях Земли и в метеоритах преобладают элементы четные и делящиеся на 4.

2. Это свойство связано с особой устойчивостью ядра, построенного из гелиогрупп, и поэтому является показателем того, что на Земле и в метеоритах преобладают элементы наиболее устойчивые или наиболее долговечные.

3. Явления радиоактивности в деталях строения подтверждают связь между долговечностью, устойчивостью и четными числами атомных весов.

4. На Земле заметно некоторое увеличение числа менее устойчивых атомов в поверхностных частях земной коры, в противоположность глубинам, где, совершенно сходно с метеоритами, преобладают элементы, уже достигшие максимума равновесия и устойчивости.

5. Существование в поверхностных частях земной коры менее устойчивых элементов подтверждается еще преимущественным преобладанием в тех же частях радиоактивных, распадающихся элементов.

6. Постоянство смесей изотопов в сложных элементах говорит за то, что в настоящее время ни условия метеоритов, ни условия земной коры не отвечают тем, при которых возможно созидание и разьединение отдельных изотопов.

VIII. ХИМИЯ КОСМОСА. НАША СОЛНЕЧНАЯ СИСТЕМА: ЛУНА, ПЛАНЕТЫ, КОМЕТЫ

§ 39. Попытаемся теперь выйти за пределы нашей планеты и подвести итоги нашим знаниям химии космоса на сегодняшний день. Здесь мы встречаемся с необычайной трудностью решения химических проблем, и нами должна быть проявлена исключительная осторожность, чтобы намечаемые нами выводы отвечали наблюдаемым фактам. Изящные и блестящие по точности методы астрофизики только сейчас получают особое значение, когда спектральные линии космических тел начали точно сравнивать с результатами эксперимента. Исследования индийского ученого Саха показывают нам, насколько осторожными должны быть наши выводы при трактовке наблюдаемых нами явлений.

Под этим углом зрения необходимо рассмотрение этой и двух следующих глав.

Луна. Прежде всего мы должны сказать несколько слов о химии Луны. Луна представляет собой космическое тело с удельным весом 3,4 (несколько большим, чем средний удельный вес нашей земной коры) и с радиусом приблизительно в 4 раза меньшим, чем у Земли. Эти черты Луны обуславливают на Луне ньютоновские силы в 6 раз меньшие, чем на Земле. Луна лишена атмосферы и, очевидно, должна была быстро потерять свое внутреннее тепло. Отсутствие атмосферы, согласно интересным построениям Стони, объясняется малым тяготением, не преодолевающим максимальные скорости газовых молекул согласно кинетической теории газов; впрочем, этим путем объясняется отсутствие лишь самых легких газов.

Совокупность физических данных говорит за сходство Луны с породами Земли; никаких прямых методов определения химических элементов на

	Меркурий	Венера	Земли	(Луна)
Удельный вес	6,2	4,4	2,7—9,1 ср. 5,5	3,4
Радиус в км	2250	6120	6376	1741
Сила тяжести	0,43	0,80	1	0,17
Атмосфера	Почти нет	Атм.	Атм.	Нет
Температура {	Сильное на- гревание	Сильное на- гревание	Среднее на- гревание	Изменчивое нагревание

Луне не существует; но ряд косвенных данных позволяет путем аналогий сделать несколько выводов. По отношению сил падающего и отраженного луча можно сравнивать породы Луны с кварцевым порфиром. Угол поляризации лучей, по данным Ландерера, отвечает нашим витрофитам, т. е. кислым стекловатым породам, богатым щелочами, Al и Si.

Таким образом, хотя мы и не имеем никаких прямых данных о химическом составе Луны, но совокупность ряда признаков говорит за сходство ее состава с составом земной литосферы, с преобладанием элементов O, K, Na, Al, Si, может быть отчасти Ca и Mg.

Имеются весьма остроумные предположения о нахождении на Луне серы — S.

§ 40. П л а н е т ы. Несколько больше сведений мы имеем для планет, хотя и в этом случае астрофизические данные очень отрывочны и частью дают указания лишь косвенного характера.

Для того, чтобы судить об их химии, привожу сравнительную таблицу (табл. 34).

Вся совокупность данных о химическом составе планет заставляет думать, что он в общем тождествен с земным и что с химической точки зрения между планетами нет больших различий. Хотя прямых данных у нас в этом направлении не имеется, но все же ничто не говорит против этой основной идеи. Большая группа геологов связывает с астероидами и наши метеориты и переносит химический состав последних на малые планеты.

§ 41. К о м е т ы. Химический состав и природа комет только в последнее время начинают выясняться, причем сейчас уже более определенно вырисовываются принадлежность комет к нашей солнечной системе и их несомненная связь с потоками падающих звезд и метеоритами.

Эта связь их с телами, которые попадают на Землю в виде материальных объектов, для нас особенно важна.

Кометы, подобно планетам, являются телами нашей солнечной системы, двигающимися большей частью по сильно вытянутым эллипсам, причем не исключена первичная связь последних с астероидами.

Кометы состоят, очевидно, из космической пыли — твердых частиц, отчасти окруженных газовым слоем. При очень небольшой массе они обладают огромным объемом, что говорит о большой разреженности среды — большей, чем в гейслеровых трубках. В главной своей массе свечение (люминесценция) кометы, очевидно, вызывается электрическими разрядами в сильно разреженной среде, т. е. в условиях, аналогичных свечению

Таблица 34

Марс	Астероиды	Юпитер ¹	Сатурн	Уран	Нептун
3,93	?	1,5	0,7	1,2 (1,54)	1,1 (1,55)
3400	от 5 до 400	70000	60000	24500	25000
0,39	Максим. 0,045	2,65	1,18	0,91 (0,83)	0,88 (1,01)
Атм.	Частью твердая, частью газы	Атмосфера жидкая масса, соб- ственное свечение	Твердые кольца	Газообраз- ная	Газообраз- ная
—	—	—	—	—	—

¹ Уд. вес спутников Юпитера (Stroobant. Bull. Ac. sci. Belg., 1919)—4,1—3,4—2,0—1,2, т. е. падает с удалением спутника от планеты.

гейслеровых трубок; но имеется также свечение, вызванное нагреванием Солнцем, при приближении кометы к Солнцу; благодаря этому начинается выделение газов и их свечение в стороне, обращенной к Солнцу. Выделенные газообразные частицы и притянутая космическая пыль отбрасываются назад световым давлением Солнца, образуя хвосты. Несомненно, что часть вещества, а именно, наиболее легкие газы и мелкие пылинки навсегда оставляют комету и лишают ее части материи.

Астрофизическая картина комет весьма разнообразна, и, повидимому, мы имеем кометы весьма различного состава с большим или меньшим преобладанием твердых частиц. В спектрах газов мы находим большое количество соединений С, причем, повидимому, главным образом доминируют кислородные соединения углерода, а не углеводороды, как это думали раньше. В голове комет известен углерод и его соединения с Н, N, и О (т. е. CN, CO и CO₂).

По характеру хвоста в нем можно различать преобладание окиси углерода (CO), отчасти CN, CO₂, N и металлических паров Na и Mg. Линии Na по преимуществу связаны с начальными частями хвоста около ядра. Нахождение свободного H и Fe предположительно.

Как ни скудны наши сведения по астрофизике комет, но все же они намечают некоторые характерные черты, сближающие их с другими космическими телами.

§ 42. На основании сказанного, можно прийти к следующим наиболее вероятным положениям, касающимся космохимии комет:

1. Кометы являются космическими телами нашей солнечной системы и генетически, вероятно, могут быть поставлены в связь с астероидами.

2. Кометы в главной своей части состоят из твердой космической пыли и в меньшей степени из газообразных частиц и обладают низкой температурой.

3. Приближение кометы к Солнцу вызывает выделение из нее летучих элементов, сильное нагревание частей, близких к Солнцу, и отталкивание как газообразных молекул, так особенно космической пыли в виде хвоста.

4. Процесс сближения с Солнцем вызывает постепенную потерю кометой летучих и легкоплавающих элементов и вообще газов, обладающих боль-

шой кинетической скоростью частиц: в первую очередь H_2 и He, потом N_2 , CO, CO_2 , CN и, наконец, газов летучих металлов Na, Ca, Mg.

5. В конечном результате комета должна (при принятии постоянства природы атомов) превратиться в космическое тело, весьма близкое по своему составу к метеоритам.

6. Согласно п. 5 и на основании наблюдений над кометами и над звездными дождями весьма вероятно генетическая связь падающих на Землю метеоритов с кометами.

7. Совокупность данных заставляет думать, что кометы по своему химическому составу не отличаются от других космических тел, весьма богаты H, N, C, O, Na, Mg, Ca и, может быть, Fe и поэтому в своем составе колеблются между составом земной коры и каменными метеоритами.

8. Неполное соответствие спектров комет с главнейшими элементами (по валовому среднему) метеоритов и Земли объясняется физической природой процессов на кометах, вполне объясняющей главные их отличия.

IX. ХИМИЯ СОЛНЦА

§ 43. Химия Солнца вырисовывается на фоне многочисленных и весьма детальных астрофизических исследований, и поэтому о Солнце мы имеем весьма интересные сведения. Яркость и количество линий отдельных элементов служили вместе с тем показанием распространенности отдельных элементов, и только последние работы индийского ученого Саха внесли серьезный корректив в эти данные. Особый интерес представляет связь элементов с определенными глубинными зонами Солнца, что позволяет проводить некоторую аналогию с геохимическими зонами Земли.

В виду сложности проблем, связанных с изучением химии Солнца, я предполагаю коснуться этого вопроса в такой последовательности: в настоящем параграфе я намерен дать картину распространения отдельных элементов на Солнце, независимо от глубинных зон и от явлений ионизации, т. е. картину, вытекающую из более старых астрофизических данных; в следующем — кратко намету распределение этих элементов, по отдельным зонам с тем, чтобы потом подвергнуть эти данные пересмотру в свете современных идей ионизации атомов; наконец, в заключительной части я остановлюсь на общих выводах. Вопросу о тепловом режиме Солнца я посвящаю отдельный параграф (§ 63) в главе XII.

Комбинируя оба фактора, поставленные в основу признания распространенности элементов на Солнце, — резкость линий и число их совпадений, мы могли по старым представлениям прийти в первом приближении к следующей таблице элементов нашего светила:

Таблица 35

Элементы Солнца (в скобках поставлены порядковые номера)

I. Элементы с резкими линиями и с большим совпадением линий:

He, Ca, Fe, H, Na, Ni, Mg, Co, Si, Al, Ti, Cr, Mn, Sr, V, Ba, C, Sc, Y, Zr, Mo, La, Nb, Pd, Nd.

II. Элементы со слабыми линиями:

Cu, Zn, Cd, Ce, Be, Ge, Ag, Sn, Pb, Er, K, Ru (1920 г.), Rh, Ga, Eu, Rb (1922 г., только в пятнах), Li (только в пятнах), O.

III. Элементы сомнительные:

Ir (77), Os (76), Pt (78), Ta (73), Th (90), U (92), W (74).

Продолжение таблицы 35

IV. Элементы, вероятно, отсутствующие:

As (33), Bi (83), Cs (55), Au (79), Se (34), B (5), N (7), In (49), Hg (80), P (15), S (16), Ti (81) и Pt (59). Граммон еще прибавляет Se (34), Te (52).

V. Элементы под вопросом:

Cl, J, Br, F, Ra и редкие газы, кроме He.

К этой таблице необходимо сделать ряд следующих **п р и м е ч а н и й**: нахождение линий ряда металлоидов, повидимому, вызывается не отсутствием этих элементов, а характером их спектра, получаемого в условиях солнечных зон. Кислород, долго не находимый на Солнце, был открыт лишь недавно Аллегенской обсерваторией и позднее подтвержден Расселем. Граммон и Веронэ определенно подчеркивали, что физическое состояние металлоидов и некоторых тяжелых металлов на Солнце таково, что обуславливает отсутствие их видимого спектра. Еще более осторожно к этим данным подходит Саха, который, как мы ниже увидим, определенно высказывается за мысль, что отсутствие линий какого-либо элемента на Солнце еще не определяет отсутствия самого элемента.

§ 44. Если мы попытаемся связать элементы Солнца с определенными его зонами, то мы получим очень интересную картину, тоже, однако, получающую правильное толкование лишь в свете вышеприведенных новых идей Граммона и Саха, тем более, что мы сейчас знаем, что температура поверхностных оболочек Солнца (фотосферы) около $5000-6000^\circ$, а температура пятен почти на две тысячи градусов ниже. С этими температурами только и приходится считаться при анализе той физико-химической среды, которая нам дает спектры, ибо остальные, более глубокие зоны, вероятно, с весьма высокими температурами до 10^6 T абс., нам остаются неизвестными¹. Вообще температура оболочек повышается с глубиной.

Если строение Солнца сравнить с другими типами звезд, то, согласно указаниям А. А. Белопольского, отдельные части солнечных оболочек отвечают разным стадиям эволюции звезд: спектр наружной части хромосферы можно сблизить со спектром звезд типа В (см. ниже в § 50), а спектр фотосферы с типом G—K и, наконец, пятна — со спектром K—M. Такие соотношения весьма любопытны, так как они в известном отношении дают нам в этой последовательности в наружной части Солнца отдельные стадии космического процесса, и таким образом пятна обнаруживают более поздние стадии в противоположность наружным газовым оболочкам².

До тех пор пока Саха не дал своей теории ионизации, казалось совершенно непонятным то явление, что высота наблюдаемых линий не находится в зависимости от атомного веса, так как линии Ca, Fe или Ti оказываются в более отдаленных от центра частях, чем, например, линии столь легкого газа, как H. Сейчас весь этот вопрос получил совершенно иное объяснение.

§ 45. Саха обратил внимание на то, что природа линий в спектрах Солнца может быть выяснена лишь при сравнении их с теми спектрами, которые получаются при перегревании паров и газов при тех температурах, которые

¹ Одновременно с этими температурными условиями необходимо отметить и характер электромагнитных полей: поле самого Солнца лишь в 80 раз больше земного; зато для пятен оно превышает земное в 9000 раз.

² Это расположение в более центральных частях космических тел таких группировок, которые в общей схеме эволюции, как мы это увидим ниже, являются более поздними, уже сильно подвинувшимися стадиями, повидимому, обычно.

по возможности близки к температурам солнечных зон (3000—6000° абс.). Учитывая влияние высоких температур, Саха отметил, что при нагревании атомы ионизируются, т. е. теряют свои внешние электроны, и их спектр, перемещаясь в ультрафиолетовую часть, может совершенно выйти за пределы возможных наблюдений. Таким образом, совершенно ионизированный газ не даст при современных методах исследования никаких линий спектра и будет принят, как отсутствующий. Поэтому, чем труднее элемент ионизируется, тем более, при прочих равных условиях, он замечен для глаз наблюдателя.

Таблица 36

Таблица ионизации атомов на Солнце (Саха)

	Ионизация в вольтах	Ярность линий:	
		Солнца	пятен
Na	5,11	30	60
K	4,32	6	15
Rb	4,16	—	1
Cs	3,81	—	?
Mg	7,65	30	30
Ca	6,08	20	25
Sr	5,67	1	3
Ba	5,12	—	—

Мы видим из этих данных, что необыкновенная распространенность Mg и Ca в некоторых частях Солнца и в протуберанцах, более высокое выбрасывание кальция по сравнению с водородом могут быть объяснены не действительным преобладанием этих более тяжелых элементов, а лишь сохранением ими своих атомов неионизированными.

Таким образом, приходится критически подойти к анализу линий спектра Солнца, и с этой точки зрения можно сказать, что отсутствие каких-либо линий элементов на Солнце не может быть принято за доказательство отсутствия самих элементов по двум причинам: во-первых, потому что часть металлоидов при физических условиях солнечных оболочек не может дать светящегося спектра в присутствии паров металлов, а во-вторых, так как и для металлов, обладающих весьма большой способностью к ионизации, характерные видимые спектры будут отсутствовать. В общем ионизация увеличивается с повышением температуры и атомного веса элемента и с повышением давления.

Эти важные наблюдения заставляют нас отнестись с большой осторожностью к анализу присутствия или отсутствия каких-либо элементов на Солнце и вместе с тем показывают, что и яркость линий и количество совпадений еще не могут быть приняты за доказательство преимущественного распространения данного элемента, если не будут учтены вышеизложенные поправки на ионизацию и на взаимное ослабление линий при совместном нахождении металлоидов с металлами.

К вопросам ионизации элементов я еще вернусь при анализе химических элементов звезд (§51). Попытку такого анализа делает Рассел, устанавливая сходство состава Земли и Солнца и подчеркивая малое содержание в последнем Li и Sr.

Таблица 37

Элементы Солнца

ряды	I	II	III	IV	V	VI	VII	O	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	ряды
1	H	—	—	—	—	—	—	He	Li	Be		C		O			2
3	Na	Mg	Al	Si					K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe, Co, Ni	4
5	Cu	Zn	Ga	Ge					Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	?	Ru, Rh, Pd	6
7	Ag	Cd		Sn						Ba	TR		Ta	W	?	Os, Ir, Pt	8
9				Pb			?		?			Th		U	—	—	10

§ 46. Попробуем сейчас несколько проанализировать сообщенные выше данные. Для этого в таблице Менделеева (табл. 37) расположены элементы табл. 35, причем элементы первой группы, т. е. наиболее важные, даны жирным шрифтом; элементы со слабыми линиями — светлым; элементы сомнительные — мелким шрифтом.

Среди указанных в таблице элементов де Лоне пытается найти и некоторые количественные соотношения и рисует для газовой оболочки глубоких слоев хромосферы следующую схему количественного распространения элементов, которая, как ни мало обоснована и гипотетична, все же интересна:

	Fe	Mg	Ni	Ca	Al	Na	H	He	Mn, Cr, Ti, Sn и др.
%	65	8	6	3,5	1	0,5	0,5	0,5	около 15

Всего 100%

Вышеприведенная табл. 37 весьма важна, особенно если ее сравнить с таблицей распространения элементов в земной коре; в общем валовой состав земной и солнечной оболочек весьма сходен; бросается в глаза преобладание обычных элементов пород, начиная с гранитов и кончая перидотитами, причем налицо и характерные спутники и тех, и других: для гранитов — Zr, Nb, TR, Mo, Ta, для ультраосновных пород — V, Cr, Co, Ni и обе платиновые группы. Элементы левого металлического поля отходят на второй план. Заметно преобладание четных вертикальных групп системы; так, на четные приходится 30 элементов (включая He), на нечетные — 16. Очень сильно представлены группы, кратные 4—IV и VIII; из относящихся к ним 22 элементов на Солнце известно 17. Несомненно доминируют элементы более легкие: из 28 первых элементов не хватает только 8, но в том числе есть ряд металлоидов, отсутствие которых — вопрос, окончательно еще не разрешенный.

§ 47. На основании сказанного мы можем сделать следующие выводы относительно элементов поверхностных частей Солнца:

1. Солнце состоит из тех же элементарных тел, из которых составлены Земля и метеориты.

2. Спектральный анализ обнаруживает на Солнце присутствие по преимуществу элементов легких, именно 3-го и 4-го малого периодов, что вполне совпадает со средним составом и земной коры, и метеоритов.

3. Атомы элементов являются на Солнце сильно ионизированными, чем и объясняется ряд отличий спектров и отсутствие линий ряда элементов.

4. По отсутствию линий металлоидов и некоторых легко ионизирующихся элементов нельзя выводить заключения об отсутствии и самих элементов.

5. Легко ионизирующиеся элементы или элементы больших атомных весов могут быть открыты лишь в более холодных пятнах.

6. Отсутствие линий трудно ионизирующихся элементов может служить доказательством отсутствия данных элементов (например, Li, который открыт в слабых линиях только в пятнах).

7. В общем в поверхностных частях Солнца преобладают элементы поля обыкновенного и отчасти поля кислого, что отвечает взглядам Вашингтона и Аббота на сходство состава и химического строения Земли и Солнца и на распространенность на Солнце элементов петрогенических, как и в оболочке Земли.

8. Менее отчетливо, чем на Земле, проявляется на Солнце преобладание элементов с атомными весами, кратными 4; в грубых чертах это проявляется в значении для Солнца He, Ca, Mg, Fe, Ti, отчасти Ni. Однако систематически это положение проведено быть не может.

9. Все выше приведенные соображения касаются лишь наружных оболочек Солнца, тогда как о более центральных его частях мы ничего не знаем.

10. Так как Солнце является карликовой звездой спектрального типа G, то приведенные выше соображения, вероятно, могут быть приложены к большинству аналогичных желтовато-красных звезд нисходящей ветви (см. § 50).

Х. ХИМИЯ ТУМАННОСТЕЙ И ЗВЕЗД

А. Туманности

§ 48. Прежде всего наше внимание привлекают химические элементы туманностей. Если для Солнца, благодаря его прекрасной изученности, открыто поле для более точного учета химических элементов, то нельзя того же сказать относительно туманностей — огромной, сложной и, вероятно, неоднородной группы.

Разнообразие и сложность спектров туманностей стоит несомненно в связи с их сложной природой. Начиная с весьма холодных туманностей, свечение которых объясняется электрическими разрядами (люминесценция), мы имеем все стадии нагревания туманности вплоть до температур наружных частей в 13 000—15 000° С. В связи с этим между всеми газовыми и спиральными туманностями обнаруживаются постепенные переходы.

Трудно встретить больше противоречий, чем в области попыток найти для туманностей определенное место в звездной эволюции.

Наиболее вероятно, что часть туманностей обладает весьма низкой температурой и состоит из твердых или жидких частичек. По мнению Аррениуса, температура таких туманностей могла бы быть не выше 50° С абс., при этом в газообразном виде могли бы сохраниться только H, He и Neb¹; вообще при этих температурах газовая фаза, согласно мнению

¹ Небулий — гипотетический элемент того времени, не подтвержденный дальнейшими исследованиями. — *Ред.*

Планка, почти не существует; светящаяся благодаря люминесценции масса, путем конденсации, при неполном уравнивании ньютоновских сил силами светового давления, должна приходить в нагретое состояние и далее, очевидно, — в состояние звезд. Планетарные туманности как будто бы аналогичны по спектрам новым звездам и в этом случае могут рассматриваться как весьма продвинувшиеся стадии космического процесса или как новое зарождение космического процесса с весьма высокой температурой. В противоположность им — неправильные газовые туманности стоят как будто бы в начале эволюции и могут быть, повидимому, поставлены наравне с восходящей ветвью эволюции звезд (см. табл. 38).

Какие же выводы мы можем сделать из сказанного?

1. Спектр и природа туманностей еще не могут считаться выясненными, а их химический состав сколько-нибудь определенным.

2. При разнообразии температур различных видов туманностей и их физического состояния трудно нарисовать правильную генетическую картину, связав ее с определенными химическими элементами.

3. Нет особых оснований думать, что состав туманностей чем-либо существенным отличается от обычных элементов космоса, хотя в них, больше чем в каких-либо других космических телах, наблюдаются линии незнакомых на Земле элементов, в том числе небулия с атомным весом, вероятно, между водородом и гелием.

Б. Звезды

§ 49. Мы переходим к необычайно большой и важной группе космических тел — к тем трем-четырем миллиардам звездных миров, которые составляют основу нашего мироздания, в которых накоплена главная часть мировой материи, где таится еще не разгаданная картина истории космических процессов.

За последние десятилетия изучение звезд сделало огромные успехи, оно выросло в целую самостоятельную область астрономии, а исследования астрофизики дали возможность судить о величинах, расстояниях, массах, скоростях, температурах и внутренней природе звездных миров. Сейчас, особенно после работ Саха, термодинамическая обстановка поверхности звезд оказалась выясненной, и это дало возможность критически пересмотреть старые вопросы о химических элементах звезд и подвергнуть совершенно новому анализу длинные списки линий элементов, составленные при астрофизических исследованиях.

Между старой и новой концепциями химии звезд сейчас лежит огромная пропасть, и нет сомнения в том, что в свете новых идей старые схемы эволюции химических элементов в звездах, красиво и логично построенные Морозовым, Локайером, Круксом, сейчас уже отошли в область истории.

Согласно старым идеям Локайера, звезды по составу слагающих их химических элементов резко различны между собой. Целый ряд групп, намечаемых различными классификациями, отличаются одни от других развитием или образованием тех или иных атомов. Так как между всеми этими группами наблюдались постепенные переходы, то Локайер создал стройную и логичную гипотезу последовательного развития звезд, причем постепенные стадии их развития характеризовались и изменением температур, и новообразованием или преобразованием химических элементов. Эволюция космическая сводилась к эволюции типов атома. Локайер расположил все звезды в две ветви повышающейся и понижающейся температуры, связал с отдельными фазами процесса те или иные типы старых классификаций Секки и Фогеля и по спектральным линиям для каждого

Нагревание $\longrightarrow$								Типы
	Спиральные туманности	Гиганты (диам. 3 — 66 ☉) с увеличенным световым давлением						Газообразные туманности
Типы обсерв. Гарварда	?	M	K	G	F	A	B	Звезды O (туманности)
Удельный вес (при $H_2O = 1$)		$1,10^{-5}$	0,001				0,05	
Абсолютная температура наружных частей . .	—	3000	—4				18000	до 25000
Цвет	—	Красные		Желтые		Белые		Голубоватые
Скорости (км в сек.) .	—							
Спектры	Сплошной спектр с линиями	См. правую половину диаграммы						Сплошной спектр He, H ⁺

Газо

Примечание. Жирная линия (горизонтальная) связывает типы звезд, в которых различие между гигантами и карликами мало заметно. Спектры нанесены лишь в правой (нисходящей — охлаждающейся) части таблицы, но должны быть, вероятно,

типа, как особой фазы длительного процесса, определил химическую природу звезд.

Однако современные теории ионизации элементов поставили этот вопрос на совершенно новую почву. Оказалось, что различие в спектрах и появление тех или иных линий элементов вызываются не только наличием или отсутствием того или иного элемента в звезде, но термодинамическими условиями ее поверхности. Саха указывает, что типичные спектры звезд точно иллюстрируют физические явления, следующие одно за другим, при постепенном повышении температуры от 4000 до 30 000° абс., прибавляя, что в общем он думает, что все виды звезд, как и Солнце, составлены из тех же элементов, что и Земля.

Таким образом, проблема анализа спектральных линий получила совершенно новое течение. В дальнейшем вкратце изложу результаты старых астрофизических наблюдений, как базу для новых работ, и только потом перейду к анализу химических элементов звезд.

§ 50. Из старых классификаций в основу современных идей положены схемы Секки, Фогеля и особенно Гарвардской обсерватории. На фоне этих схем Локайер расположил звезды в известной системе и дал очень

Таблица 38

звезд
Охлаждение —————>

Ослабление светового давления —————>		Карлики (со слабым световым давлением и значеннем тяготения)				Планетарные туманности
В	А	F	G	K	M (N)	P?
0,045	Около 0,1		1,38 (Солнце)		5,4	
18000—14	11—9000	7—6000	6000—5000	Около 5000	5 3000	
Белые		Желтые		Красные		
12,9	21,9	28,7	29,9	33,6	34,3	18—39
Линейный		Линейный	Линейный	Смешанный	Полосчатый	
Н, Нe? Немного Si, C, O, N Немного ионизиро- ванных металлов (Fe ⁺ , Ca ⁺⁺ , Mg ⁺) выс-	Н, Si, Fe, Ca Усиление ионизиро- ванных ме- таллов (Fe ⁺ , Ca ⁺ , Mg ⁺ , Cr ⁺) Ионизированные метал- лы (протометаллы)	Н, Fe, Ti, Cr, Mg, Ca, Mn Ионизиро- ванные ме- таллы (нем- ного)Ca ⁺	Fe, Ca, Mg, Ti, Mn, Si Линии Н слабые Металлические	Усиление металлов Ослабление Н	Химические соединения (углеводор.) в М—TiO ₂ в N—соед. С Химические соединения	He, H, Neb.

в некоторой части повторены и в левой. Последние работы, повиному, относят планетарные туманности к неправильным газовым туманностям и отмечают на них линии углерода и азота. Цифры скоростей по Кембелу.

детальную характеристику, подробно сравнивая их спектры со спектрами в электрической искре¹.

Займствуя из классической книги А. А. Беловольского² описание основных типов, сведенных мной кратко в прилагаемой табл. 38.

В I классе помещены звезды, в спектре которых видны линии гелия и водорода, причем интенсивность линий того и другого элемента почти одинакова. Фиолетовый конец спектра ярок и простирается далеко. Класс этот обозначается буквой В, но стоит на первом месте, так как исследователи пришли к убеждению, что звезды этого типа наиболее молодые в эволюции. В этих спектрах совсем нет линий металлов.

Последовательные ослабления линий гелия, усиление водородных линий и появление слабых линий кальция дают критерий для перехода от типа В к следующему через градацию В₁, В₂, В₃ и т. д. до В₉ и А. Звезды

¹ Андерсон, в связи с работами Обсерватории на горе Вильсон, пропускал через тонкую нить в 10⁻⁵ сек. ток в 26 000 вольт, благодаря чему температура достигала, по его мнению, 30 000°С. Этим путем, по мнению Андерсона, получают спектры, сравнимые со спектрами Солнца и звезд.

² А. А. Белопольский. Курс астрофизики. 1921.

типа В встречаются чаще вблизи и в самом Млечном пути, чем в остальных областях неба, и особенно много их в созвездии Ориона, отчего их часто называют орионовыми.

В спектре типа А главным критерием являются водородные линии — широкие и густые. Гелиевые совсем отсутствуют. Хорошо заметны линии кальция. В начальных стадиях в спектре этого типа с большим трудом заметны наиболее яркие линии лабораторного или солнечного спектра — спектра железа. По мере развития этого типа (A_1 , A_2 , A_3 и т. д.) линии металлов, кальция и железа, а затем и других металлов становятся все заметнее, при этом фиолетовый конец спектра слабеет и укорачивается.

Спектр типа F включает еще неясные линии водорода, но испещрен множеством тонких резких линий железа, титана, магния; линии кальция бросаются в глаза, по ширине подходят к линиям водорода в спектре типа А. Переход типа F через градации F_1 , F_2 , F_3 и т. д. показателен последовательным усилением яркости линий металлов, ослаблением водородных линий, значительным расширением, до размера полос, линий II и K и ослаблением фиолетового конца спектра.

Тип G, в который переходит тип F, включает в себе Солнце и тождественную по спектру звезду α -Aurigae. Сплошной спектр так испещрен линиями различной интенсивности, что трудно найти место, свободное от них. Водородные линии того же порядка.

Переход к следующему типу K характеризуется последовательным усилением линий металлов, ослаблением водородных линий и значительным укорочением фиолетового конца. В спектре последних градаций этого типа начинают попадаться полосы в сплошном спектре, обусловленные химическими соединениями. Эти полосы с особой резкостью появляются в следующем типе, обозначенном буквою M.

Звезды, в спектре которых встречаются блестящие линии, обозначаются буквою O, причем этот класс, в свою очередь, подразделяется на Oa , Ob , Oc , Od , Oe , в зависимости от разной яркости линий. Повидимому, подразделение Oe предшествует в эволюционном порядке типу В, особенно подразделение Oe_3 .

Буквой P обозначаются планетарные туманности.

Буквой Q — звезды со спектрами, не укладывающимися во все описанные выше подразделения, по преимуществу с блестящими линиями.

§ 51. Перейдем теперь к современным взглядам на характер тех линий, по коим созданы схемы Локайера и которые служили основанием для представления о распространении отдельных элементов на звездах разных типов.

Молодой профессор физики Калькутского университета Мег Над Саха выдвинул теорию ионизации элементов, и очень скоро выяснилось, что эта теория совершенно правильно разгадала проблему спектров звезд. В сущности, многое из старых понятий Локайера могло бы быть оставлено лишь с заменой его гипотетических протометаллов и протоэлементов ионизированными атомами (см. § 45).

В газовой смеси при нагревании от 3000 до 25 000—30 000° идет ионизация элементов, т. е. отделение отрицательных электронов, благодаря чему изменяется спектр элемента, давая новые серии, перемещаясь к ультрафиолетовой части и, наконец, совершенно скрываясь за ее пределом в условиях наших методов наблюдения. Таким образом, сильно ионизированный газ оказывается лишенным своих типических линий или даже совершенно невидимым. Степень ионизации зависит от температуры, давления и атомного веса (t , p и A); она увеличивается с температурой и атомным весом элемента (в грубой схеме) и уменьшается с увеличением давления.

Таким образом, видимость линий того или иного элемента зависит от легкости или трудности его ионизации, и при одних и тех же термодинамических условиях трудно ионизирующийся элемент может быть видимым, а легко ионизирующийся — нет.

Рассел¹ дает примерный список потенциала ионизаций некоторых элементов:

Cs	Rb	K	Na	Li	H
3,8	4,16	4,32	5,11	5,33	13,54
Ba	Sr	Ca	Mg	Zn	He
5,12	5,67	6,08	7,65	9,4	25,2

В этом списке более тяжелые элементы ионизируются легче и потому гораздо труднее и реже будут наблюдаться, чем более легкие, в условиях высоких температур. Чем выше температура, тем вероятнее сохранение линий только у последних; чем ниже — тем понятнее линии и у более тяжелых элементов. Отсюда ясно, что в очень нагретых звездах (см. табл. 39) мы имеем H и He и что Rb может быть найден лишь на самых холодных. При 23 000° абс. водород совершенно ионизируется и делается невидимым, для He в интервалах температур от 23 до 30 тысяч появляется новая серия линий.

Исходя из этого, Саха и Эмден строят следующую примерную картину химии звезд, причем ионы отмечены химическим знаком (табл. 39).

Таблица 39

Распределение атомов и ионов H, He, Ca и Mg при разных температурах

Типы звезд (ср. табл. 38)	Абс. температура	Атомы, ионы ⁽¹⁾
O	25000	H ⁺ , He ⁺
B	20000	H, He ⁺ , He, Ca ⁺⁺
	15000	H, He, Mg ⁺ , Ca ⁺
A	12000	H, Mg ⁺ , Ca ⁺ , (Ca)
G	8000	H, Ca, Ca ⁺ , Mg
M	4000	Ca, Mg

Эта таблица для четырех элементов H, He, Ca, Mg устанавливает те термодинамические условия, при которых каждый из них виден в спектральных линиях. Так как эта таблица необычайно близко отвечает тому, что наблюдается на звездах, то мы можем сказать, что по отношению к указанным выше элементам различие разных типов звезд определяется не наличием или отсутствием одного из них, а лишь термодинамическими условиями, в которых атомы находятся.

Таким образом, если целый ряд наших старых выводов отпадает, то все же возникают новые, намекающие новые пути для решения вопроса о химии звезд. Только сейчас намечаются правильные пути к познанию химии звезд, но на них еще только вступает современная астрофизика, пересматривая свои старые выводы и строя новые, более достоверные.

§ 52. Как мы только что видели, современные теории совершенно устранили старое представление о разном химическом составе звезд и выдвинули идею об их термодинамических различиях. Отсюда вытекают, с одной стороны, все современные теории об эволюции звезд, с другой — ряд гипо-

¹ H. N. Russell. Astrophys. J., 1922, LV, 119.

тетических предположений о процессах изменения атома. Нет никакого сомнения, что наиболее стройная теория в первом направлении дана Эддингтоном, который, противопоставляя ньютоновские силы притяжения и силы светового давления, дал схему последовательности изменения во времени звезд — газовой массы со средним атомным весом около 2,8—3,3. Именно эта схема, в согласии с идеями Каптейна, легла в основу таблицы химии звезд (табл. 38)¹.

Однако эта теория оставляла без внимания вопросы химические и, строго говоря, в свете идей Саха они не могли возникнуть. С точки зрения идеи ионизации у нас нет никаких объективных критериев для суждения об эволюции вещества в звездах; даже больше — как будто бы эта теория устанавливает полное единство химического состава всех типов звезд. Однако такая постановка, как мы уже видели на частном примере Солнца, тоже неприемлема. Огромное нагревание звезд до таких температур, при которых даже наружные части нагреваются до 20—25 тысяч градусов, не находит себе объяснения без допущения какого-либо источника энергии внутри атома. Отсюда вытекает необходимость принятия каких-либо явлений экзотермического характера, каковыми могут явиться или синтез элементов с превращением части массы в энергию, или радиоактивный распад тяжелых атомных систем.

§ 53. Мы подходим к тем выводам, которые положены в основу современных воззрений: повсюду во вселенной химическое строение материи одно и то же...; звезды составлены равномерно из всех элементов... Сейчас, после работ Саха, как будто бы выбита основа из-под теории эволюции, и лишь косвенным образом, на основании ряда предположений, нарисованных в предыдущем параграфе, мы допускаем некоторый процесс интеграции элементов.

Но если мы отрешимся от этих еще далеко не доказанных положений, перед нами остается задача: собрать воедино, независимо от звездного типа, общую картину всех элементарных тел, наблюдаемых на звездах. Эта общая картина дается мной ниже, в табл. 40 (причем элементы, известные только на Солнце, в нее не включены).

Таблица 40

Элементы звезд (ср. табл. 37, Солнце)

Ряды	I	II	III	IV	V	VI	VII	0	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	Ряды
1	H							He					C	N	O		2
3	Na	Mg		Si					K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe Co Ni	4
5										Sr							6
7																	8
9																	10

¹ По всей вероятности, имеется несколько путей эволюции.

Я нанес на диаграмму лишь основные элементы, набрав жирным те из них, которые, повидимому, имеют особое значение. Конечно, таблица очень не полна, но и она снова выдвигает элементы порядковых номеров от 11 до 28 и снова занимает то «поле обычное», которое являлось характерным и для земной коры, и для метеоритов.

На основании сказанного выше, мы должны прийти к следующим выводам:

1. Несмотря на огромное количество и разнообразие типов звезд, возможен их химический анализ на фоне знания их величины, массы, яркости, температуры поверхностных слоев, удельного веса и скоростей движения.

2. Большинство типов звезд располагается по вышеуказанным признакам в общую систему, связанную постепенными переходами и, вероятно, представляющую один или немного общих генетических рядов.

3. Казавшиеся раньше резкими различия в химическом составе звезд ныне объясняются различием термодинамической обстановки поверхностных зон звезд, в общем представляющих газовые скопления.

4. Нет данных, которые бы говорили против признания химического состава звезд более или менее одинаковым.

5. Химические элементы звезд в общем тождественны с элементами Земли и метеоритов, хотя не исключено некоторое увеличение содержания Н и He в известных звездных типах.

6. Хотя мы не имеем еще достаточно полной картины ионизации элементов, связанной с температурой, давлением и атомным весом, тем не менее надо думать, что в звездах преобладают элементы не тяжелые, с атомными весами не свыше 60.

7. Можно думать, что в составе звезд преобладают элементы Н, He, С, Mg, Si, Ca, Ti, Cr, Mn, Fe, Ni (в меньшей степени О, N, Sr, V, Co), т. е. за исключением (из главных) Н и Мп, почти исключительно элементы, кратные 4 п, вероятно, построенные из гелиогрупп.

8. Вышеприведенный список элементов почти тождествен с элементами наиболее глубоких зон земной коры и особенно с элементами метеоритов.

ХИ. ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В КОСМОСЕ

§ 54. На предыдущих страницах последовательно, шаг за шагом, мы выясняли распределение отдельных элементов в Земле и различных космических телах, пытаюсь вникнуть в законы, определяющие современное распределение, и в те причины, которые могли это распределение вызвать.

В этом направлении мы сразу столкнулись с двумя возможностями объяснить современное распределение атомов мироздания. С одной стороны, в основу наших представлений можно поставить идеи в з а м е н о г о п р е в р а щ е н и я и образования новых атомов из старых; в этом случае наблюдаемое сочетание атомов в мироздании могло бы получить объяснение в том последовательном процессе превращения радиоактивного распада или интеграции элементов, который вне каких-либо механических перемещений атомов на том же самом месте, в зависимости от хода процесса, может вызвать большое разнообразие элементарных тел. Так, в куске очищенного урана под влиянием радиоактивного распада возникает целый цикл новых атомов вплоть до свинца.

К этой группе природных явлений, в значительной степени лежащих за пределами точного знания и наблюдения природы, мы вернемся в последней, заключительной главе.

Но есть еще другая область явлений, совершенно несомненная и играющая огромную роль в мироздании: это явление переноса, концентрации или рассеяния уже готовых атомов элементарных тел. Это целый цикл процессов космического, геологического и физико-химического характера, не только в значительной степени положивших начало скоплению космической материи и образованию космических тел, но и постоянно перегруппировывающих космос согласно ряду основных законов природы¹.

Мы должны считать, что современное распределение элементов в природе не есть законченная, постоянная форма их накопления; наоборот, мы наблюдаем многочисленные и сложные явления перегруппировок и перераспределения; космические тела — Солнце, Земля или кометы — не сохраняют своего состава, а связаны между собой и с космосом постоянным и сложным обменом материальных частиц. В нашей Земле мы также наблюдаем постоянное перемещение элементов, приход и уход отдельных атомов в мироздание, сложный обмен наружной пленки с внутренними частями планеты и т. д.

Область, которой я касаюсь, является еще новой в истории науки; в ней еще не может быть дано никаких количественных данных; пока намечаются лишь самые явления и те силы, которые их вызывают.

§ 55. Силы, которые перемещают атомы в мировом пространстве, могут быть весьма различными и связаны с общими законами свойств материи.

В основу всех явлений этого порядка мы должны внешне поставить следующие пять сил²:

1. Силы мирового тяготения.
2. Силы светового давления.
3. Силы радиоактивного распада и излучения (в разреженной среде), связанные с ядром или внутренними электронами.
4. Силы теплового движения молекул и атомов (силы диффузии).
5. Силы химического сродства и силы кристаллизационные (связанные с внешними электронами).

С этими основными силами связаны следующие явления переноса — миграции элементов³:

6. Движение космических тел.
7. Падение метеоритов.
8. Унос легких газовых молекул.
9. Механические движения в космическом теле.
10. Дифференциация магмы.
11. Разделение по агрегатному состоянию.
12. Перенос в водных растворах и в газовых струях.
13. Перераспределение под влиянием органического мира и деятельности человека.

1. Перехожу к краткому рассмотрению вышеперечисленных пунктов, оставляя более детальное изучение этого вопроса до специальной монографии о миграции элементов в земной коре и в космосе.

Несомненно, одной из главнейших сил, определяющих распределение элементов, в основных, грубых чертах, является сила мирового тяготения, сила взаимного притяжения атомов, подчиняющаяся пря-

¹ Идеи перераспределения материи особенно горячо выдвигались Аррениусом.

² Несомненную роль в миграции элементов играют магнитные и электромагнитные явления, коих влияние пока еще ускользает от нашего исследования.

³ Понятие о «миграции» элементов впервые введено мной (см. А. Е. Ферсман Геохимия России. 1922. I, 61—64).

мой пропорциональности масс и обратной пропорциональности квадрату расстояния. Во всех космогонических теориях значение силы взаимного притяжения и распределения элементов по их массам является общепризнанным. Теория Канта — Лапласа придавала мировому тяготению огромное значение, приписывая ему образование туманности, сгущение последней в жидкую фазу и распределение материи обратно пропорционально плотностям (удельным весам элементов). В сущности и изящные идеи Дж. Дарвина и особенно последние идеи Грина ставят в основу космогонического процесса приливную волну, т. е. опять-таки силы тяготения. Теория Чемберлена — Салисбюри, в значительной степени связанная с идеями Дж. Дарвина, также основана на этом законе, но главное его проявление, согласно этим идеям, заключается не в первичном скоплении метеоритов, а в позднейшей перегруппировке, с выделением кверху — к коре наиболее легких частиц.

Отчасти к этим идеям примыкают Шварц и В. М. Гольдшмидт, который считает, что и сейчас под влиянием этих сил в земной коре идет постоянное и постепенное перемещение атомов: тяжелые уходят в глубины, а легкие поднимаются кверху.

Наконец, теория Эддингтона, признающая большое значение светового давления при образовании звезд, противопоставляет ему силу мирового тяготения, благодаря чему сочетание и взаимное преодоление этих сил обуславливает и замечательное постоянство масс звезд, и всю историю их эволюции.

Все земные процессы миграции элементов, на которых мне ниже придется остановить свое внимание, идут в первую очередь под влиянием этой мировой силы, распределяющей элементы в мироздании согласно своим основным законам: концентрирующей в центре более тяжелые атомы и собирающей более легкие в наружных частях космических тел.

2. Силы светового давления были выдвинуты, как могучая космическая причина, после того как П. Н. Лебедеву удалось экспериментально доказать отталкивающую силу лучеиспускающих тел¹. Световое давление ныне рассматривается как величайшая космическая сила, отталкивающая легкие атомы или противодействующая мировому тяготению. Подсчеты Эддингтона показывают, что при очень большом коэффициенте излучения световое давление космического тела преодолевает ньютоновские силы и отбрасывает частицы до тех пор, пока эти две силы не уравновесятся. Подсчеты Лебедева для кометных хвостов, без всякого сомнения, определили их образование как результат давления лучей света на частицы с радиусом около 10^{-8} см. Так как величина давления зависит от удельного веса частицы и ее массы (т. е. поверхности), то очевидно, что световое давление сортирует в мировом масштабе частицы, как по их величине, так и по их удельному весу; optimum отталкивания наблюдается при удельном весе 1 и размере частичек в 0,00016 мм. Действительно законы светового давления приложимы не к молекулам, а к их группам — пылинкам, даже кристаллическим частицам, причем пылинки, радиус которых не превышает одной тысячной миллиметра, будут отталкиваться при 0°С в мировом пространстве с силой, порядок которой в миллион раз превышает порядок силы их ньютоновского притяжения.

¹ П. Н. Лебедев. Давление света. Классики естествознания. М., 1922 (сборник статей); там же литература с работами Бредихина, Фая.

В случае давления на газы происходит еще большее дифференцирование элементов, так как свет давит только на те газы, которые его избирательно поглощают, хотя в общем световое давление при ничтожной величине газовых молекул менее действительно.

Космическая роль светового давления сказывается в отбрасывании от центральных космических тел отдельных газовых частиц, но более всего космической пыли. Она широко проявляется, если правильно современное толкование, в образовании кометных хвостов, зодиакального света и солнечной короны, а также в дифференциации элементов на звездах. Повидимому, на нашей планете непосредственная миграция элементов под влиянием этой силы в настоящее время не происходит, но ее значение было очень велико при процессе образования нашей планеты и при первичном¹ распределении элементов.

3. Третья группа сил, вызывающих миграцию элементов, это те излучения, которые вызываются при радиоактивном распаде и электрических разрядах.

При распаде радиоактивного вещества прежде всего наблюдается выделение α -лучей и связанный с ним вынос частиц гелия, которые освобождаются из старого атома и свободно мигрируют далее под влиянием уже физико-химических условий равновесия среды. Мы знаем сейчас, что частицы α в воздухе обладают длиной пробега до 70 мм, тогда как в минералах, например в биотите, их пробег измеряется только 0,01—0,03 мм. Как ни малы эти числа, но они показывают миграцию элемента гелия и в самой твердой среде и перенос его частицы излучением.

Гораздо грандиознее явление переноса материальных частиц теми излучениями, которые наполняют мировое пространство и природа которых еще не установлена. В частности, некоторые думают видеть в явлении северного сияния влияние α -частиц солнечных излучений, другие приписывают большое значение в миграции элементов светящимся холодным туманностям, в которых свечение обуславливается электрическими разрядами в сильно разреженной среде.

Мы не в состоянии сейчас дать полную картину химического значения этих явлений в миграции элементов, но не можем не остановить внимания на том примере переноса гелия в твердой среде, который я привел выше. Как известно, вокруг радиоактивных минералов, включенных в разные силикаты, образуются темноокрашенные дворрики. Эти дворрики вызываются проникновением в минерал α -лучей, т. е. частиц гелия. Эти лучи, как указал Резерфорд, вызывают расщепление ряда нечетных элементов с выпадением водородных атомов. Очевидно, что образование двориков есть процесс расщепления каких-либо атомов, вероятно алюминия, вызванный миграцией внутри минерала α -лучей материального характера.

Нет никакого сомнения, что этот маленький случай есть только пример огромных процессов природного расщепления элементов в земной коре, вызванного миграцией частиц гелия.

4. Четвертая основная сила заложена в самостоятельном тепловом движении молекул, в так называемом броуновском движении. Это одна из величайших сил мироздания имеющая огромное значение как при формировании космических тел так и при их дальнейшем существовании.

¹ Под «первичным» как здесь, так и в дальнейшем изложении я понимаю явления, стоящие за границей наших геологических данных и геологической хронологии.

Особенное внимание на эту силу впервые обращено планетезимальной гипотезой, противопоставляющей ее силам ньютоновского тяготения и рассматривающей ее как причину очень важного закона распределения легких и тяжелых элементов в мировом пространстве.

Авторы этой теории отмечали, что движение молекул находится в тесной зависимости от молекулярного веса, и приводили табличку скоростей движения частиц. Стои для $T = 0^\circ\text{C}$ даст следующие средние скорости.

H_2 1,69 км/сек.	N_2 0,45 км/сек.
He 1,1 » »	Воздух 0,45 » »
CH_4 0,60 » »	O_2 0,42 » »
H_2O 0,57 » »	CO_2 0,36 » »
CO 0,45 » »	Cl_2 0,29 » »

Эти цифры, хотя и являются только средними, все же показывают, что преодоление мирового тяготения может идти только на очень малых космических телах, так как, например, для Земли предельная скорость, отвечающая силе тяготения, равна 11 км, а для Луны — 2 38 км. Между тем максимальные скорости движения частиц газов не достигают указанных цифр нашей таблицы. Отсюда делается ясным, что в порядке увеличения молекулярного веса легкие газы должны постепенно исчезать из малых космических тел, — сначала H_2 , потом He , H_2O , N_2 , O_2 и, наконец, CO_2 и более тяжелые углеводороды.

Из этих данных вытекает, что сохранение газов в каком-либо космическом теле зависит от его массы или, иначе говоря, от величины поля тяготения. Если масса очень мала, то ньютоновские силы не могут удержать легкие элементы, улетающие согласно кинетической теории газов. Таким образом, первичный зарождающийся комок элементов не может содержать в себе легкие летучие тела. Потом при постепенном космическом увеличении комка газы смогут удерживаться в порядке, обратном вышеприведенному списку, и в зависимости от взаимоотношений ньютоновского притяжения и сил молекулярных мы будем иметь вокруг космического тела оболочку или только из тяжелых газов CO_2 , тяжелых углеводородов (при малых ядрах), или же оболочку из O , N и CO_2 , типа нашего воздуха (при больших ядрах).

Эти необычайно интересные идеи совершенно определенно говорят нам о том, что накопление газовых оболочек в наружных частях космических тел идет строго закономерно, с определенным отбором химических элементов. В частности, процесс вылета легких газов из атмосферы Земли вполне возможен и вероятен; частицы водорода и гелия при известных условиях могут преодолевать мировое тяготение и из высших слоев атмосферы улетать в мировое пространство; это совершенно необходимый и, повидимому, мощный процесс потери Землею части своего вещества; впрочем, Мейер и Вегенер пытаются опровергнуть это явление, указывая, что атомы водорода не достигают нужных скоростей и поэтому накапливаются в верхних частях атмосферы.

Силы молекулярные проявляются, однако, в явлениях миграции еще иначе. Вся область явлений диффузии есть не что иное, как проявление молекулярных сил движения. Между тем силам диффузии мы обязаны в жидких и твердых космических телах огромной важности физико-химическими процессами: на нашей Земле они сказываются как в магматической области, так и в области водных растворов и в газообразной среде. В последней, благодаря силам диффузии, происходит быстрое перемешивание элементов и их равномерное распределение; в водных и

магматических растворах, благодаря диффузии, идут процессы кристаллизации; благодаря диффузии идет распыление некоторых элементов (например, Au) в поверхностной пленке Земли и благодаря тем же силам, по мнению В. И. Вернадского, некоторые элементы с наибольшей способностью к рассеянию исчезают из обихода космического тела.

§ 56. 5. Наконец, остается еще большая сила мирового значения, связанная с внешними электронами, — с и л ы х и м и ч е с к и е, с и л ы х и м и ч е с к о г о с р о д с т в а¹. Значение этих сил как будто бы недооценено в тех мировых концепциях, которые намечали Нернст, Аррениус и Перрен. Силы химического сродства, связанные с валентными электронами, являются несомненно связанными со строением ядра и его электрическим полем. Образование тех или иных химических соединений определяет в значительной степени дальнейшую судьбу входящих в соединение элементов, ибо весь комплекс физических и физико-химических свойств молекулы определяет ряд явлений миграции и химической перегруппировки. Образование из химически неподвижных атомов легкоподвижных систем соединений является фактором огромной важности в космических и геохимических судьбах элемента. Если существование C и Si в их несвязанном виде или в виде сложных устойчивых силикатов не обуславливает миграции этих элементов, то, наоборот, их соединения в виде CO, CO₂ или SiF₄, благодаря летучести в условиях земной обстановки, создают мощные процессы переноса химических элементов. Этот же химический процесс обуславливает перемещение углерода в хвостах комет и, может быть, на некоторых звездах. К сожалению, для космических тел вопрос о химических соединениях еще очень мало разработан. Если в кометах мы знаем спектры CO и CN, если в глубине солнечных пятен подразумеваются какие-то соединения, может быть, окислы титана, магния и кальция, то эти единичные факты еще не позволяют нам не только выяснить ход химических процессов (т. е. сочетания элементов) в космосе, но даже не дают пока фактического материала для каких-либо предположений. Руководящей идеей в этом вопросе являются лишь основные теоретические положения термодинамики — теория Нернста и закон Бертелло: «всякая химическая перегруппировка, происходящая без применения посторонней энергии, направлена в сторону образования одного тела или целой системы тел, связанного с максимальным выделением тепла». Этот закон образования экзотермических соединений имеет, однако, полное применение лишь при абсолютном нуле. Наоборот, при том же абсолютном нуле сводится к нулю возможность образования эндотермических тел, связанных с уменьшением живой силы молекул. Наконец, из данных самого Бертелло мы знаем, что обычно зарождение эндотермических тел сопутствует образованию других соединений, идущих с максимальным тепловым эффектом.

Эти соотношения весьма характерно проявляются в условиях земной коры: в обстановке земной поверхности и верхних зон земной коры идут определенно реакции экзотермические; все явления перераспределения химических элементов определяются этим основным законом. В более глубоких зонах (Nife) коры преобладают реакции эндотермические. В условиях космических, при низких температурах мировых пространств, вероятно среди веществ туманностей, должно преобладать образование

¹ Вопрос о ходе химических реакций в Земле и космосе не может быть, конечно, рассмотрен с какой-нибудь детальностью. Задача настоящего исследования заключается лишь в попытке осветить распределение химических элементов в космосе, но не ход возможных химических реакций и их энергетiku. К этому вопросу я думаю вернуться в другом месте.

сильно экзотермических реакций: химические силы и электрические силы ядра образуют соединения с максимумом выделения тепла (например, $H \rightarrow H_4 = He$); но частично, согласно вышесказанному, возникают эндотермические химические соединения (например, тяжелые атомы — последних рядов менделеевской таблицы). Наоборот, в условиях высоких температур, созданных теми или иными экзотермическими реакциями, идет, с одной стороны, отделение наружных электронов (ионизация), с другой — создается возможность возникновения эндотермических соединений. И в том и в другом случае возникновение определенных химических группировок, возможных все-таки лишь в условиях небольшого интервала температур, определяет распределение и перераспределение химических элементов, согласно основным законам физической химии.

К силам химическим современная наука относит и силы кристаллизации, т. е. закономерного расположения атомов в пространстве, сливающего их в соответственные химические соединения. Сейчас силы образования кристаллов оказались лишь одним из видов сил химических, и вся огромная область построения кристаллических структур явилась лишь формой решения общей с химиками задачи. Силы кристаллизационные, связанные с силами диффузии, представляются в явлениях космоса и нашей Земли фактором огромного значения: подобно тому, как в области строения ядра элементов мы обнаруживаем стремление к накоплению наиболее устойчивых планетарных систем, так же в мире сочетаний этих разнородных систем мы имеем такое же стремление к накоплению наиболее устойчивых группировок — кристаллов. Кристаллическое состояние материи, как определенная фаза вещества, есть одна из форм закрепления связи между отдельными элементами (или ионами), одна из сил, мешающих их свободному передвижению, удерживающая их самостоятельные движения, вызываемые согласно кинетической теории газов. Если газообразная фаза вещества обуславливает подвижность системы и облегчает миграцию элемента в космических и земных условиях, то кристаллическая затрудняет эти передвижения, являясь в общем случае конечной формой накопления вещества, связанной с выделением свободной энергии и потому более устойчивой.

§ 57. 6. Перемещение космических тел. Миграция элементов вызывается теми многочисленными и сложными движениями, которым подчинены космические тела. Собственное движение звезд, движение звезд в группах, перемещение масс в туманностях, столкновения космических тел — все это вызывает миграцию элементов, перераспределение их в мировом пространстве. При скоростях звезд от 13 до 38 км в секунду неизбежно должно наступать неодинаковое перемещение элементов различных атомных весов и различных собственных молекулярных скоростей. В астрофизике уже отмечаются такие явления, при которых для одного и того же космического тела скорость движения в спектрограммах одних элементов не совпадает с другими.

Для нас кажется несомненной возможность некоторой дифференцировки атомов по их атомному весу под влиянием собственного движения космических тел.

7. Перенос метеоритов. Если вышеприведенные явления лишь косвенно давали представление о роли движения космических тел при миграции элементов и их перераспределении, то совершенно несомненное и огромной важности явление представляет падение на Землю метеоритов и космической метеорной пыли. Мы имеем здесь непосредственный перенос вещества, показывающий, что миграция элементов этим путем может достигать больших размеров и что теории Дж. Дарвина и план-

тезимальная в своей основе имеют несомненный фактический материал. Как бы мы ни относились к различным космогоническим теориям, тем не менее мы не можем отрицать общей роли космической пыли и метеорных роев в явлениях, протекающих как на Солнце, так и на других планетах, помимо Земли, и, может быть, на Луне.

8. Вынос легких газовых молекул. Этот важный вопрос мной уже подробно разобран в п. 4.

9. Механические движения в космических телах. Перемещение и перегруппировка элементов происходят в космических телах под влиянием различного рода механических процессов, изменения объема, образования складов, геосинклиналей, горных хребтов, изостатических перемещений целых материков, вулканических извержений и т. п. При всех этих механических и геологических процессах идет перемещение элементов, изучаемое для Земли современной геохимией.

10. Дифференциация магмы¹. Перемещение и миграция элементов являются результатом процессов застывания расплавленных масс и им сопутствующих явлений ликвации и дифференциации магмы. И далек от задачи сколько-нибудь подробно касаться этой большой области явлений, изучаемых современной петрологией.

11. Разделение по агрегатному состоянию. Разделение по фазам: жидкой, твердой, газообразной и определенное распределение этих фаз в пространстве под влиянием силы тяжести представляют огромной важности процесс, идущий с большой очевидностью на тех телах, в которых играет роль ньютоновское притяжение (например, на Земле). Этому разделению фаз в первичных формах мы обязаны современным строением Земли и, вероятно, других планет. Трудной делимостью этих фаз в поле очень слабого мирового тяготения можно объяснять, по мнению В. М. Гольдшмидта, образование некоторых метеоритов (палласитов).

12. Растворы и газовые струи². Перемещение растворов и газовых струй, законы их истечения являются непосредственным результатом двух сил: силы мирового тяготения и силы молекулярного движения. Весь газовый обмен земной коры, газовый обмен атмосферы с космосом, наконец, вынос из неведомых глубин газообразных струй являются примерами теллурических процессов, связанных с миграцией элементов в газообразном, диффузном или растворенном виде.

13. Органический мир и деятельность человека. Перемещение элементов в значительных масштабах производится живым веществом и хозяйственной деятельностью человека. В. И. Вернадский придает живому веществу огромное значение в процессах миграции и перегруппировки химических элементов и пытается выразить количественно роль живой среды в тех циклических процессах, кои устанавливаются на земной поверхности для весьма многих элементарных тел.

Постепенно геохимическим фактором делается и человек, хозяйственная эксплуатация которым природных тел вызывает мощную перегруппировку некоторых элементов, соизмеримую с процессами природными.

§ 58. Таким образом, на основании рассмотренных главнейших явлений перераспределения химических элементов в космосе, мы приходим к следующим выводам:

¹ Совокупность различных явлений миграции элементов в земной коре мы включаем в общее понятие метаморфизма.

² В. И. Вернадский. О газовом обмене земной коры. Изв. Акад. Наук, 1912, 141—162; там же, 1916, 1249.

1. Современное распределение элементов в космосе является лишь временной фазой постоянного сложного космического процесса перераспределения вещества.

2. Перераспределение элементов идет как в первичных стадиях зарождения и созидания космических тел, так и во всей их дальнейшей истории.

3. Главной силой, определяющей распределение элементов в мировом пространстве, является мировое тяготение, обуславливающее распределение элементов по атомным весам (удельным объемам) и распределяющее химическое вещество как в однофазной, так особенно в двухфазной и трехфазной системах.

4. Вторая сила космического перемещения элементов — световое давление, противопоставляющее ньютоновским силам.

5. Третьей силой, еще мало изученной с интересующей нас точки зрения, являются излучение в электрическом поле и излучение распадающихся радиоактивных веществ.

6. Четвертую основную силу представляют силы молекулярного теплового движения (броуновское движение), обуславливающие рассеяние элементов в мироздании, явления диффузии и различные явления, связанные с преодолением мирового тяготения.

7. Пятая сила — это те чисто химические силы, которые связаны с внешними валентными электронами и которые играют столь большую роль в химических сочетаниях; в космических явлениях перераспределения они играют сравнительно меньшую, но все же еще не познанную роль, и только в условиях процессов, сходных с теллурическими, приобретают большое значение.

8. На основании этих пяти основных законов сил происходят различные процессы миграции химических элементов как космического, так и геологического или физико-химического характера.

9. Несомненно, что в основе всех этих явлений лежат интраатомные силы атома как электромагнитной микропланетарной системы.

10. Мы склонны думать, что в истории Земли в космическую стадию зарождения планетной системы главная роль в перераспределении элементов принадлежала соотношению ньютоновских сил и сил светового давления, в планетарную — мирового тяготения и физико-химического распределения фаз, в геологическую — геохимическим факторам физико-химического равновесия.

11. Земная кора при современных геологических и космических условиях изменяется в своем составе, получая из космоса Fe, Mg, S, Ni и отдавая ему H и, может быть, He, а из глубин обогащаясь N, H, может быть C и O, и в свою очередь перемещая в глубины свои тяжелые атомы. Общий баланс обмена земной коры еще не может быть выведен.

ХII. ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ КОСМИЧЕСКОЙ ХИМИИ

§ 59. В предыдущих главах мы последовательно рассмотрели весь фактический материал, касающийся химии Земли и космических тел. Мы старались всюду оставаться в области фактов и наблюдений и тщательно отделяли от самих явлений те объяснения или гипотезы, которые часто грешат против наблюдений или являются только их возможным следствием. В настоящей главе мы попытаемся пойти несколько дальше в рассмотрении этого вопроса и выйти за непосредственные рамки наших фактических данных.

В о-п е р в ы х, мы дадим общую сводку наших сведений по химии космоса.

В о-в т о р ы х, наметим те явления, которые выходят из границ намеченной схемы химии космоса.

В-т р е т ь и х, дадим обзор существующих космогонических воззрений на природу химии космоса.

И, наконец, в-ч е т в е р т ы х, попытаемся наметить схему решения основных проблем космической химии.

§ 60. В табл. 41 мы помещаем сводку наших сведений по химии космических тел, с небольшими примечаниями, необходимыми для ее понимания.

Мы видим из таблицы, что в общем космические тела составлены из одних и тех же элементов. Казавшееся раньше, до работ Саха, разнообразие химического состава явилось ошибочным и ныне замсняется новой схемой. В общем в космосе распространены те же атомы, что и на Земле, за немногими исключениями. Относительное распространение этих атомов на космических телах отвечает в общем теллурическому, и мы вправе думать, что 28 первых элементов менделеевской системы являются вместе с тем и наиболее распространенными типами атомов в мироздании. И среди них самыми основными, помимо двух — водорода и гелия, из которых, повидимому, создается вся постройка, являются элементы между 12 и 26 номерами и, в частности, элементы с атомными весами, четными или кратными 4. Конечно, в зависимости от преобладания тех или иных физических или физико-химических причин возможно на том или ином космическом теле отсутствие одних и необычное преобладание других элементарных атомов. Но вообще силы рассеивания и силы притяжения, силы ньютоновские, леведевские, молекулярные и др., взаимно преодолевая друг друга, выравнивают химический состав мироздания. Нет никаких признаков, позволяющих считать химическое равновесие и современное распределение элементов в космосе стационарными; наоборот, все говорит за то, что химические элементы перемещаются, перегруппировываются, по определенным законам сочетаясь в химические соединения и вновь распадаясь. Эволюционный ход развития космических тел и судьба связанных с ними элементов, по всей вероятности, подобно процессам земным, замыкаются в процессы более или менее циклические, или, вернее говоря, в процессы вида спирали.

В противоположность идеям Локайера и Морозова мы в изучении общих фактов по космической химии не видим непосредственных данных, говорящих за эволюцию элементов, за распад их ядра и соединение в новые атомные единицы. Помимо мощных явлений ионизации, мы объективно не знаем никаких более серьезных потрясений химических элементов, и их ядро к а ж е т с я неизменным.

И все же с этими представлениями постоянства элементов не мирится современная научная мысль, и в вышеприведенных только что намеченных выводах она хочет видеть лишь первое грубое приближение, за которыми кроются ускользающие от нас процессы трансмутации.

Ниже я рассмотрю подробнее те явления окружающей нас природы, которые говорят за большую сложность химического процесса, чем та, которая была изложена выше. Это будут:

1. Распространение в земной коре процессов естественного радиоактивного распада и вероятность генетической связи между всеми элементами.
2. Искусственное расщепление элементов α -лучами.
3. Многообразие различных излучений в сильно разреженном мировом пространстве.

4. Нахождение на космических телах линий неизвестных элементов и притом весьма распространенных.

5. Невозможность объяснить тепло Солнца и звезд без принятия процессов выделения внутриатомной энергии.

§ 61. Радиоактивность Земли и космических тел. До открытия радиоактивности на Земле мы не имели никаких прямых фактов, которые говорили бы о возможности перехода одних элементов в другие: были по этому поводу теории, гипотезы, строились целые стройные схемы, но точное знание с полным основанием отвергло эти схемы. А между тем, открытие Кюри-Складовской совершенно неожиданно изменило все наши представления о трансмутации элементов и об источниках энергии на Земле.

Нельзя в этих судьбах научной мысли не видеть аналогии с тем, что мы отметили выше, в предыдущем § 60. И сейчас по отношению к космической химии точные факты не дают нам никакого материала для суждения о превращениях элементов в космических телах, но все же в такой оценке мироздания мы склонны видеть лишь временный этап познания природы, одно лишь грубое приближение к познанию истинных процессов.

Радиоактивные вещества распространены в земной коре хотя и в относительно ничтожных количествах, но их общий баланс в экономике коры весьма значителен, благодаря постоянному выделению внутриатомной энергии в виде излучений. Мы знаем, что радиоактивные элементы по преимуществу связаны с кислыми гранитными породами, залегающими в верхних частях земной коры, и содержание их уменьшается с глубиной. Уже ультраосновные породы содержат, в среднем, в 6 раз меньше радия, чем кислые граниты, а еще глубже, на основании некоторых термических вычислений, мы должны думать, что количество радия падает до нуля. Таким образом, совокупность всех наблюдений заставляет думать, что распространение радиоактивных элементов ограничивается лишь 30 — 70 км поверхностной пленки, а планетезимальная теория пытается объяснить это явление с точки зрения выноса на поверхность из глубин легкоплавающих и наиболее богатых радием частей.

Очень мало данных имеем мы о распространении радиоактивных элементов на космических телах. Мы знаем только, и это точно установленный факт, что средняя радиоактивность каменных метеоритов равняется лишь $\frac{1}{4}$ радиоактивности земных пород, а радиоактивность металлических метеоритов практически равна нулю.

Из других космических тел мы знаем только кое-что насчет Солнца: уран на нем весьма сомнителен, а линии радия совершенно неизвестны, хотя так часто именно к нему прибегали для объяснения солнечного тепла. Предположен был радий на одной из звезд.

Из элементарных тел, с которыми связан радиоактивный распад, один устойчивый газ гелий является действительно одним из важнейших элементов мироздания, как бы косвенно отмечая огромные накопления конечного продукта распада радиоактивных веществ. Гелий, наравне с водородом, отсутствует лишь в маленьких космических телах, где силы ньютоновского притяжения не могут удержать его быстродвигающиеся молекулы. Но в крупных космических телах с большой газовой оболочкой гелий всюду присутствует, и линии его говорят об огромной космической роли, которую играет этот газ в мироздании.

Анализ теллурических процессов не позволяет нам думать о том, что явление радиоактивности является чем-то исключительным, связанным только с Землей. Нет никаких данных думать, что процессы дезинтеграции тяжелых атомов не идут и не могут идти на телах космических.

Распределение

Элементы и их порядко- вые номера		Земля		Метео- риты	Космические тела				
		наружная кора	внутренняя кора		Солнце ¹	звезды ¹	туман- ности	кометы ²	планеты
1	H	●	●	•	●	●	●	●	•
2	He	•	•	—	●	●	●		•
3	Li	•	•	—	•				
4	Be	•	•	—	•				
5	B	•	•	—	—				
6	C	●	●	●	●	●	●	●	
7	N	•	•	—		●	•	●	
8	O	●	●	●	•	●		●	●
9	F	•	•	—					
10	Ne	•	—	—					
11	Na	●	●	●	●	•		•	•
12	Mg	●	●	●	●	●	•	•	
13	Al	●	●	●	●				•
14	Si	●	●	●	●	●			•
15	P	•	•	●	—				
16	S	•	•	●	—				
17	Cl	●	●						
18	Ar	•	•	—					
19	K	●	●	●	•	•			•
20	Ca	●	●	●	●	●	•	•	
21	Sc	—	—	—		•			
22	Ti	●	●	•	●	●			

Таблица 41

элементов в космосе

Элементы и их порядко- вые номера		Земля		Метео- риты	Космические тела				
		наружная кора	внутрен- няя кора		Солнце ¹	звезды	туман- ности	кометы ²	планеты
23	V	.	.	—	.	.			
24	Cr	.	•	•	•	•			
25	Mn	.	.	•	•	.			
26	Fe	•	•	•	•	•	.	. ?	
27	Co	.	.	•	.	.			
28	Ni	.	•	•	•	•			
29	Cu			.					
38	Sr				•	•			
56	Ba				•				
0—1	Коро- ний ³				•				
1—2	Небу- лий ³					.	•		
87—92	Радие- вые эле- менты	•	.	Очень мало	. ?				

Примечания. Жирно напечатаны элементы с атомным весом, кратным 4. В эту же группу отнесен и Ni, хотя только один его изотоп, и притом второстепенный, подходит под это определение.

Черные точки обозначают большее или меньшее значение данного элемента, причем в своих подсчетах я исходил не из весовых соотношений, а из объемных (по числу атомов). При этом мной введены лишь три градации: большой круг, средний и точка. Тире обозначает или отсутствие данного элемента, или же весьма малое содержание.

Из характера методики астрофизики вытекает, что отсутствие линий какого-либо элемента не может рассматриваться как признание отсутствия данного элементарного тела.

¹ Для Солнца см. табл. 37. Помимо указанных важных элементов, надо еще отметить за пределами таблицы: Y, Zr, Nb, Mo, Pd, TR.

² Для комет увеличенный значок водорода относится не к чистому элементу, который в кометах стоит под вопросом, а к его соединениям с C.

³ Короний, так же как и небулий, гипотетический элемент того времени, не подтвержденный дальнейшими исследованиями. — *Ред.*

Совершенно особую группу явлений, связанных частично с радиоактивным распадом, представляют различного рода излучения, природа которых еще не изучена, но часть которых, несомненно, имеет космическое происхождение. Остается загадочным излучение высоких слоев атмосферы, особенно на высотах 4000—9000 м. Еще менее ясно происхождение так называемого гессовского излучения.

§ 62. Радиоактивность как общее свойство материи. Таким образом, фактические наблюдения не позволяют исключать радиоактивный распад из мировых космических процессов; к тем же данным приводят и теоретический анализ явлений радиоактивности, и процессы искусственного расщепления элементов.

Хотя только 10 порядковых номеров периодической системы в ее конце (81—92) и 2 в начале (19 и 37) заняты радиоактивными самостоятельно расщепляющимися элементарными атомами, тем не менее, идея о том, что явления распада представляются общим свойством материи, признана всеми химическими авторитетами. Аналогия в изотопии, несомненное сходство атомистического строения всех членов периодической системы, целые числа атомных весов чистых элементов, наконец, расщепление более легких нечетных атомов — все это определенно указывает, что все атомы построены из первичной материи типа водорода и что, таким образом, периодичность свойств и вся химическая и физическая характеристика атомов есть закономерный общий процесс. Мы не знаем, являются ли нерадиоактивные элементы активными, но с такой продолжительностью существования, что их распад оказывается нами не замеченным, может быть, связанным с излучениями, не схватываемыми нашими приборами. Может быть, при наблюдаемых нами условиях этот распад совершенно не идет при отсутствии какого-либо возбудителя типа тех ультра-и-кс-лучей, которыми Перрен объясняет процессы радиоактивного распада на Земле и в космических телах.

Здесь мы все еще находимся в совершенном неведении, но это не мешает нам представлять генетическую связь всей менделеевской таблицы.

Нет никакого сомнения в том, что эта идея в значительной степени подкреплена опытами разложения, проведенными Рёзерфордом. Мы не будем касаться их характера, но отметим, что это расщепление вызывается α -лучами, и ему оказались подверженными лишь нечетные 5, 7, 9, 11, 13, 15 (B, N, F, Na, Al, P)¹.

Эти нечетные элементы в условиях опыта оказались менее устойчивыми.

Явления радиоактивности нам вообще показали, что большей устойчивостью обладают атомы четные и, в частности, те, кои построены из гелиевых групп, и что, согласно Рёзерфорду, «ядро гелия обладает весьма прочной конфигурацией, которая выдерживает интенсивные возмущения, возникающие при его выбрасывании из радиоактивного атома, и что оно является одной из единиц, из которых может быть построено большинство атомов. Еще Зоммерфельд отметил, что особая устойчивость ядра гелия может быть объяснена тем, что при соединении 4 водородов получается масса вместо 4,032—3,997: за счет потери массы происходит выделение энергии.

Устойчивость элемента в общем определяется продолжительностью его жизни, а эта последняя связана с его внутренним строением и является результатом определенных скоростей распада. Скорость распада при зем-

¹ Наличие в Земле α -излучений вызывает аналогичный распад в земных процессах (см. дворники — «halos») и выделение свободных водородных ядер.

ных наблюдаемых нами условиях постоянна; насколько она неизменна и в космических условиях, сказать трудно.

Таким образом, на основании радиоактивных явлений мы можем прийти к следующим основным положениям, приложение которых к процессам Земли и космоса является одной из величайших проблем нашего времени.

Повидимому, явления радиоактивного распада представляются общими явлениями всех атомов, построенных из одного первичного вещества в форме более или менее устойчивых планетарных систем. Наиболее устойчивыми, вероятно, являются атомы четные и особенно кратные 4, построенные из весьма устойчивых гелиевых групп. Продолжительность жизни отдельных элементарных атомов, вероятно, может служить показателем устойчивости. Скорость распада в условиях Земли и лабораторного эксперимента постоянна, но в свете идей Перрена она изменчива в разных частях мироздания.

§ 63. Тепловой режим космоса и звездных миров. Тепловой режим космических тел лучше всего изучен на одном частном случае, имеющем огромное значение для Земли, — на Солнце. Для этого столь близкого от Земли светила мы имеем весьма любопытные подсчеты, сведенные у Пуанкаре и Аррениуса.

При массе в $2 \cdot 10^{33}$ г солнечное светило излучает $4 \cdot 10^{33}$ эрг/сек. Для объяснения этих огромных количеств энергии принимались различные гипотезы: сначала думали о химических процессах окисления или сгорания, о массовом падении метеоритов, наконец, о нагревании при сжатии. Все эти причины могли бы дать тепла максимум на 30 миллионов лет, каковая цифра отвергается геологами как слишком малая.

После открытия радия была выдвинута идея о радиоактивных процессах на Солнце, так как при распаде урана до свинца выделяется огромное количество тепла. Конечно, выделяемое при этих процессах тепло могло бы покрыть расход энергии Солнца, но только в том случае, если бы радия на Солнце было много. Если даже заподозрить, что все Солнце из урана (а это неверно), а радий находится с ним в радиоактивном равновесии, то удалось бы покрыть лишь $\frac{1}{3}$ излучения.

Аррениус на фоне этих идей выдвигает следующие наиболее вероятные источники энергии, и его выводы приложимы, очевидно, ко всякой звездной системе:

1. Часть тепла дается благодаря образованию экзотермических соединений или распаду эндотермических; иначе говоря, небольшая часть энергии связана с настоящими химическими процессами.

2. Часть тепла, и притом весьма значительная, должна поступать при воссоединении ионизированных атомов с электронами. Так как диссоциация атомов для звезд и Солнца ныне доказана работами Саха и Эддингтона, то, несомненно, в этом процессе мы имеем мощный источник тепла, который, по расчетам Аррениуса, при допущении полной ионизации атомов всего Солнца мог бы дать энергии для 500 миллионов лет свечения.

3. Так как вышеуказанные причины покрывают, очевидно, лишь часть расхода энергии и все же в недостаточной степени, чтобы обусловить существование Солнца не менее $3 \cdot 10^9$ лет, то, очевидно, надо искать другой источник (и притом возобновляемый) энергии.

Нерст таковым считает распад более тяжелых радиоактивных атомов, чем № 92, — предположение, которое можно оставить лишь как догадку, но нельзя ни опровергнуть, ни доказать. Более определенно высказываются Перрен, Эддингтон и Аррениус, которые главный источник энергии видят в синтезе элементов и, в частности, в конденсации H в ядра He.

В этом процессе они находят главнейший возможный источник тепловых процессов Солнца и звезд, тогда как все остальные являются лишь дополнительными,

§ 64. Космогонические теории и их современное значение. Мы рассмотрели выше фактический материал наблюдений, дали схему химии космоса и выделили в ней область явлений, не укладывающихся в общие рамки схемы и требующих иных объяснений. Эти объяснения мы пытались искать в явлениях атома, в том сложном комплексе явлений, который ныне объединяется специальными научными течениями, на границе между физикой и химией.

Различны и сложны были пути, по которым пытались выяснить и объяснить происхождение и ход процессов мироздания. Мы далеки здесь от задачи рассмотрения этих путей; мы только выхватили из них те основные течения, которые привели нас к современному мировоззрению.

В космогонических гипотезах мы можем подметить два основных течения: одно, базируясь на законах небесной механики, пыталось выяснить современное строение звездного мира и нашей планетной системы, не касаясь химической природы атома. Второе, наоборот, основывалось на идеях трансмутации химических элементов и непосредственно подводило нас к вопросам химической эволюции и радиоактивного распада. Если первое по большей части занималось механикой планетной системы, второе базировалось на спектроскопии звезд. Но и в первом течении мы невольно находили факты, непосредственно касавшиеся химии элементов, так как, оперируя с физическими величинами, эти гипотезы должны были исходить из определенных удельных весов тел и элементов.

Две основные гипотезы оспаривают сейчас первенство: это, с одной стороны, старая кант-лапласовская, или небулярная, гипотеза, воспринятая с поправками Пуанкаре, и планетезимальная гипотеза Чемберлена—Салисбюри, рожденная из обобщений Дж. Дарвина. К ним в той или иной форме примыкает длинная плеяда других гипотез.

И планетезимальная и небулярная теории для нас важны тем, что в основу и той и другой положены силы ньютоновского тяготения, т. е. те силы, которые в космическом масштабе распределяют атомы по их удельным весам. И из той и из другой гипотезы вытекала необходимость сосредоточения тяжелых элементов в центральных частях и легких — снаружи. В теории планетезимальной к этому присоединились еще силы молекулярного движения, частью вызывавшие вынос легких элементов из недостаточно мощных полей тяготения. Наконец, к этим двум причинам в последнее время Лебедев, Аррениус, Эддингтон и др. присоединили световое давление — третью могучую мировую силу, разделяющую молекулы, элементы и их группировки в мироздании на основании характера физических свойств.

Вторая группа гипотез базировалась на идее взаимного превращения элементов, и этим идеям положили начало Локайер и Крукс: последний еще в 1874 г. в речи в Шеффилде стремился показать, что не только одни виды материи переходят в другие, но что энергия и масса материи одно и то же.

Идеи Локайера, вытекавшие из анализа звездных спектров, общеизвестны; для него при повышении температуры идет распад вещества до первичной материи и вновь созидание элементов при охлаждении. Поэтому на очень горячих космических телах он видел одни только газы, протоподород¹, далее к ним присоединялся гелий и еще далее, при охлаждении,

¹ Элементы Локайера с приставкою прото являются просто ионизированными газами. См. выше, §§ 50, 51.

«протометаллы», потом C, N, O и Si, наконец, постепенно появляются сами металлы, а водород и протозлементы исчезают. Схема звездной эволюции отвечала схеме эволюции химических элементов.

В сущности это были уже старые идеи Крукса, этого мистика-философа, который еще в 1886 г. рисовал фантастические картины генезиса элементов путем конденсации в космической туманности легких элементов в более тяжелые атомы.

Однако, как ни велико было значение схемы Локайера, как ни увлекательны были те горизонты, которые раскрывались в ее стройной картине, тем не менее она долгое время оставалась только гипотезой, а ныне в свете идей Саха, оказывается, не отвечает наблюдениям. Вся смена линий в спектрах звезд оказалась вызванной, правда, теми же физическими причинами, что и в схеме Локайера, но ее химическая основа оказалась подорванной, и постоянство и неизменность ядра атома вновь оказались ненарушенными.

Между тем целый ряд явлений, отмеченных мной выше в § 60, в действительности не укладывался в столь простую схему отрицания всяких генетических явлений в атомах, и, признавая, что факты говорят о постоянстве и однородности химического состава мироздания, многие химики и физики, тем не менее, пытались в последнее время осветить эту основную проблему.

Глубокий анализ мировых химических процессов был дан Перреном (1919—1922 гг.). Признавая невозможность самопроизвольного распада радиоактивного вещества, Перрен приписывает его излучению ультра-кис-лучей, которые выделяются при процессе конденсации водорода и гелия в более тяжелые атомы. Этот процесс интеграции элементов происходит и на звездах и в центральных частях Земли. Образование тяжелых элементов нормально идет с огромным выделением тепла, причем впервые Перрен мировое тепло звезд и нашего Солнца пытался связать с колоссальным выделением энергии при конденсации четырех водородов в гелиогруппу. При этом происходит потеря на 1 г соединения 32 мг материи, что отвечает $7 \cdot 10^{11}$ малых калорий тепла. Позднее по этому пути пошли в объяснении тепла Солнца Астон и Аррениус. Таким образом Перрен становится определенно на точку зрения синтеза элементов с выделением лучей, вызывающих их же распад, а в космогонии выдвигает идею образования звезд из туманностей с образованием в первичной стадии H, He и Neb (с атомным весом 3).

Нет никакого сомнения, что научный авторитет Перрена говорит за строгую научность тех смелых выводов, которые он делает; однако весьма вероятно, что не все элементы менделеевской таблицы в одинаковой мере реагируют на указанные им деятели, и остается попрежнему не исключенным, что радиоактивный распад с видимым выделением энергии возможен лишь для особо тяжелых групп, содержащих в себе водородные частицы, и что распад гелия на водородные атомы возможен лишь при приложении мощного источника энергии.

На близкой точке зрения стоит и Аррениус. Для него несомненно, что внутреннее тепло Солнца и звезд нельзя объяснить без принятия каких-либо особых предположений, вытекающих из рамок обычных наших представлений. Подробно разбирая природу солнечного тепла (см. § 63), он последовательно отвергает старые гипотезы и доказывает недостаточность принятия и сильно экзотермических реакций и воссоединения элементов, ионизированных с электронами. Таким образом, остается единственное объяснение, что выделение тепла вызывается конденсацией четырех водородов в группы гелия, тем более, что такой процесс мог бы обеспечить одновременный тепловой режим Солнца на 87 миллиардов лет.

По мнению Аррениуса, звезды образуются из туманностей, причем сначала возникают Н, He и Neb (небулий с атомным весом около 3); далее начинается образование N, O, Mg, Si, позднее Ca, Ti, Fe. Вначале туманности холодные, с температурами, близкими к абсолютному нулю, чем и объясняется сохранение легких летучих газов в пределах туманности, светящейся благодаря электрическим разрядам в сильно разреженной среде. Далее начинается сильно экзотермический процесс образования более тяжелых элементов, атомы диссоциируют, исчезают He и Neb. Равновесие системы поддерживается соотношением сил светового давления и ньютоновских сил притяжения. Температура повышается, звезды-великаны превращаются в карлики, после чего рост температуры останавливается: твердые частицы, окружающие гиганты, мало-помалу стягиваются к поверхности постепенно охлаждающейся звезды. В этой космогонической теории мы не видим никаких новых точек зрения; идеи Перрена комбинируются со старыми мыслями Локайера: круг превращений вновь начинается после столкновения погасших звезд и превращения их снова в туманности.

К Аррениусу очень близко примыкает и Мейтнер, дающая в большой обзорной статье сводку радиоактивности космоса; однако никаких новых фактов она не приводит.

Концепция Нернста 1921 г. — новая широкая попытка поставить в основу космических процессов явления радиоактивного распада. Нернст смелее своих предшественников, и во многих вопросах его мысль залетает далеко за пределы завоеваний точного знания.

Основные идеи Нернста следующие.

Идея о постепенной эволюции мироздания, согласно идеям энтропии, должна быть ныне заменена идеей стационарного состояния. Хотя эта мысль отвергается рядом исследований, все же она заслуживает внимания, хотя правильнее было бы заменить стационарное состояние Нернста постоянным циклическим процессом. Одни звезды гаснут, зажигаются другие, мир живет во времени, сочетая массу и энергию в единый элемент мироздания: потеря в массе равна потере во времени, деленной на квадрат световой скорости, — такова его основная формула, взятая у Эйнштейна. Все видимое нами мироздание подчинено законам радиоактивного распада материи; огромные космические температуры вызваны не синтезом элементов, а просто температурной кривой процесса радиоактивных превращений. Ни одно из космических явлений в известных нам мощностях и с известными нам коэффициентами не может повлиять на скорость распада: он идет неизменно во всем мироздании, вызывая и нисходящую и восходящую ветви звездной эволюции. В этом мы видим резкое отличие от концепции Аррениуса, относящего главную часть повышения температуры звезд не к радиоактивному распаду, а к еще более экзотермическому процессу — синтезу гелиевых групп. Нернст в мироздании не видит этого синтеза, он признает его существование, но не может определить форму и место интеграции атомов. Чувствуя, что в подсчетах ему не хватает тепла для покрытия звездного и солнечного процесса, и, вместе с тем, не допуская интеграции элементов в качестве более могучего источника тепла, Нернст принужден прибегнуть к новому допущению: что в космических телах имеются еще более тяжелые атомы, чем уран, еще более мощные радиоактивные системы, стоящие за № 92.

Для Нернста конечный продукт распада элементов — это наполняющий космос, наделенный запасами энергии световой эфир, из которого время от времени, в качестве случайности, на основе кинетической теории газов, возникают новые сочетания, т. е. создаются более тяжелые

атомы — химические элементы нашей периодической системы. Вместе с Эддингтоном он признает огромное значение светового давления и, принимая средний атомный вес газового скопления в 3,2, что отвечает весу паров сильно пониженного железа, он видит космический процесс, с одной стороны, в различии соотношений между ньютоновскими силами притяжения и силами отталкивающими светового и газового давления, с другой — в постепенном и неуклонном течении радиоактивного распада, которому подчинена, по его мнению, вся периодическая система. Излучаемая тепловая энергия поглощается световым эфиром, превращаясь в ту энергию, которая свойственна ему еще при абсолютном нуле.

§ 65. Новая концепция химии космоса. Мы можем сейчас подвести некоторые итоги и среди различных намеченных нами путей выбрать тот, который наиболее отвечает фактам.

Я уже указывал выше, что мы еще не доросли до познания химии космоса, мы только нащупываем пути и ищем выводов.

Мы видим сейчас, что доступный нашему изучению космос составлен из одних и тех же элементарных построек — планетарных электрических систем, кои мы называем атомами и разнообразие коих и составляет нашу периодическую систему Менделеева. Мы вправе думать, что подавляющая часть космоса составлена именно из этих атомов вместе с еще двумя, природа которых нам не ясна, — небулием и коронием. Силы мирового тяготения, светового давления и молекулярных движений являются в первую очередь теми притягивающими и отталкивающими силами, которые распределяют и перераспределяют элементы в мировых пространствах. В общем мы можем думать, что элементы распределены в мироздании более или менее равномерно. Количество атомов различных элементарных тел различно; мы вправе думать, что и тяжелых атомов, начиная с № 28, и самых легких, до № 8—9, вообще в мироздании меньше, что мы имеем определенное космическое явление преобладания элементов от № 11 до 28, может быть еще H и He¹.

В первом приближении, в глубоком подходе современной астрохимии, мы были склонны считать, что элементы наполняют собой мировое пространство, сохраняя в целости свои положительные ядра. Однако современные идеи заставляют нас думать, что элементы космоса испытывают превращения, подчиняясь строго определенным мировым законам. Создание элементов и их радиоактивный распад должны рассматриваться как два противоположных процесса, взаимно уравнивающих друг друга, согласно законам физико-химического равновесия. Преобладание определенных элементов есть лишь проявление статистического подсчета: как бы мы ни представляли себе эволюцию атома и соотношение рядов распада и созидания, преобладание в определенный момент определенных элементарных построек есть результат того же статистического закона, который регулирует, например, распад радиоактивного вещества и в смеси продуктов распада обнаруживает ничтожное количество одних членов и огромное преобладание других.

Часть мирового процесса от спиральных туманностей до белых звезд рисуется нам в свете по преимуществу явлений создания более тяжелых атомов: группировка H в гелий и сочетание гелиогрупп вместе являются

¹ За Fe, Co и Ni начинается новая область элементов, что вытекает не только из перелома кривой распространности, но и из строения вещества: какую бы схему строения атомных ядер мы ни приняли, но за атомным весом в 59 наблюдается резкое изменение скачком характера атомов. Д. Рождественский показал, что в характере излучения элементов после четырех малых периодов в вертикальном столбце наступит коренное изменение.

источником огромных нагреваний, конденсации материи, накопления более тяжелых атомов. Этот синтез является, вместе с тем, и источником радиоактивного распада, если мы встанем на точку зрения Перрена. После преобладания формирования тяжелых атомов наступает сначала равновесие между созиданием и распадом; затем начинается стадия белых звезд, начинает преобладать распад радиоактивных тяжелых элементов; этот процесс в значительной части идет тоже с выделением тепла¹, таким образом, задерживает темп охлаждения.

Мы сталкиваемся здесь неожиданно с проблемой, на которую не обратили внимания ни Нернст, ни Аррениус¹: и созидание и распад в известных частях своих идут с выделением энергии; одни с одинаковым правом строят восходящую кривую эволюции элементов на первом, другие — на втором. Очевидно, что не всякий синтез и не всякий распад на первичные элементы мы можем рассматривать как источник мировых процессов выделения энергии. Синтез гелиевых групп из водорода идет с огромным выделением тепла, превосходящим даже тепло, выделяемое металлами группы радия. Получаемые из этого синтеза сочетания оказываются необычайно прочными, возникающими с колоссальными выделениями энергии образованиями, трудно разрушаемыми в свете природных явлений распада. Эти атомы, построенные только из гелиогрупп, должны обладать атомными весами, кратными 4. Мы подходим к первому, уже подробно разобранным нами закону: наибольшей распространенности и устойчивости атомов, кратных 4, — He, C, O, Mg, Si, S, Ca, Ti, Cr, Fe, отчасти Ni. Разве, перефразируя слова Канта, мы не можем сказать: дайте нам легкие элементы, кратные 4, и мы построим из них мир, мир, правда, неорганизованной природы, мир без жизни.

Мы остановились на железе, кобальте, никеле; дальше за № 28 начинается новый мир химических элементов, не только в космосе за третьим горизонтальным рядом менделеевской таблицы начинается мир маловажных редких атомов мироздания, но и в самой структуре этих элементов физик находит резкое изменение скачком основных свойств.

Мы не продолжаем дальше, после железа, наше перечисление, так как для нас и элементы с атомными весами, кратными 4, за пределами этого элемента кажутся слишком сложными постройками, чтобы их считать простыми устойчивыми группировками гелиогрупп.

Что именно вышеуказанные элементарные группировки являются наиболее устойчивыми и заключают в себе меньше энергии, вытекает и из анализа заключенных между ними элементов B, F, N, Al, P, искусственное расщепление коих происходит с большим выделением энергии; правда, мы не знаем, во что они превращаются, но, очевидно, отделение водорода приводит к более устойчивым их группировкам типа четных элементарных тел.

Все элементы, следующие в нижней половине менделеевской таблицы, и в том числе радиоактивные, являются сложными элементарными постройками с большими внутренними запасами энергии и способны частично самопроизвольно выделять эту энергию путем излучения и превращения в более легкие элементы.

Эти тела не могут рассматриваться как устойчивые атомы мироздания: в процессах мировых превращений и они должны стремиться превратиться в те группировки, кои мы выше признали наиболее устойчивыми.

Таким образом, исходя из современных знаний энергетики атома, мы склонны думать, что в менделеевской таблице после-

¹ При принятии взглядов Перрена этот вопрос не возникает, так как для него радиоактивный процесс эндотермичен.

довательность сверху вниз не определяет увеличения внутриатомной энергии. Наоборот, есть основание думать, что наименьшими запасами ее обладают более легкие элементы, но построенные по типу гелия из немногих гелиевых групп, т. е. элементы четные и кратные 4 в пределах номеров 4—28.

Этими законами определяется и основной ход мировой эволюции химических элементов, накапливающих в мироздании совершенно определенных члены периодической таблицы. Этим разрешается загадка о поразительном преобладании в космосе Mg, Si и особенно Fe.

Но выше мы установили не только один космохимический закон об определенной распространенности некоторых элементов в мироздании; мы видели еще вторую закономерность, согласно которой н а и б о л е е у с т о й ч и в ы е э л е м е н т ы к о с м о с а (именно из выше перечисленной группы) преобладают в центральных частях космических тел, в обстановке наибольших давлений и температур, тогда как в наружных частях больших космических тел к ним присоединяются элементы менее устойчивые, построенные по типу $4q + 3$, по большей части, однако, тоже легкие (т. е. выше № 28). В земной коре мы эту закономерность подметили с полной очевидностью.

Причины большого содержания в наружных частях нечетных легких элементов типа $4q + 3$ лежат, очевидно, в физических законах распределения вещества в космосе, т. е. прежде всего в силах ньютоновских и силах светового давления. Однако этим не может быть объяснено накопление здесь как раз нечетных групп и особенно групп $4q + 3$. В свете идей Перрена мы имеем, однако, разгадку этого явления: части центральные планетных и звездных тел быстрее достигают максимального равновесия под влиянием тех процессов излучения, которые им свойственны. В наружных частях мы еще имеем не достигшие равновесия системы и среди них радиоактивные образования. Как раз в этих телах менее устойчивой группировки, может быть подобно K и Rb, обладающих известными способностями к излучению, мы находим ряд наших химических элементов органической жизни: N, F, Na, Al, P, Cl, K.

§ 66. Итак, из этой главы, в которой рассматривались основные проблемы химии космоса, мы можем сделать следующие выводы:

1. Космос построен по преимуществу из тех же 92 элементов, которые известны на Земле.

2. В космических телах, повидимому, как и на Земле, преобладают элементы четные, построенные по типу $4q$, порядковых номеров от 6 до 28.

3. За № 28 следует резкое уменьшение распространенности химических элементов, связанное с изменением скачком некоторых свойств этих элементов и строения атома.

4. Преобладание элементов от № 6 до 28 может быть объяснено их наибольшей устойчивостью, т. е. меньшими запасами внутриатомной энергии.

5. Менее устойчивые группировки легких элементов типа $4q + 3$ по преимуществу сосредоточены в наружных частях космических тел, тогда как во внутренних мы видим преобладание элементов типа $4q$ (№ 20—28).

6. Необходимо думать, что в известных стадиях космической эволюции идет синтез более тяжелых элементов, по преимуществу построенных по типу $4q$ (из гелиевых групп) и выделяющих при этом огромную тепловую энергию.

7. Дальнейшая эволюция звездных миров, вероятно, может быть связана с ослаблением процесса образования более тяжелых атомов и постепенным распадом этих элементов вплоть до тех же элементов № 6—28.

8. Придавая в химии космоса огромное значение атомам до № 28, кратным 4, а именно, помимо двух основных элементов H и He, также C, O, Mg, Si, S, Ca, Ti, Cr, Fe и Ni, я склонен эти 12 элементов называть основными элементами космоса.

9. Преобладание основных элементов мироздания не может быть рассматриваемо как случайное явление, но представляется как результат статистических соотношений между отдельными атомами в их процессах преобразования.

10. Относительные количества отдельных атомов в мироздании определяются статистическими законами, очевидно аналогичными законам радиоактивного равновесия.

11. Вопрос о том, изменяются ли эти соотношения во времени и имеет ли циклический процесс преобразования атомов определенное поступательное движение, не может быть разрешен в настоящее время, но несомненно, что общий ход процессов мироздания должен определяться законом энтропии.

12. Перераспределение элементов в мироздании подчиняется ряду закономерностей и в своей основе связано с физическими свойствами ядра атома.

13. Основные проблемы химии космоса при современных наших знаниях не могут быть решены, они могут быть только поставлены.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Заключение может быть кратким. Наши знания по химии космоса лишь сейчас начинают сливаться в отрывки общей картины. Никакая стройная и научно обоснованная теория еще не может быть построена. Мы находимся лишь в периоде постановки вопросов, но не их разрешения.

Сейчас важны правильная формулировка проблемы и нащупывание путей для их разрешения.

Мы сейчас даже не можем сказать, что вехи поставлены: для них заготовлен только сырой материал. Но и здесь, на этом первоначальном пути, намечаются некоторые основные идеи. Проблемы химии космоса не могут быть разрешены силами одной науки; лишь дополняя друг друга и предъявляя свои запросы к другой дисциплине, их разрешат согласованные исследования астрофизики, геологии, геохимии, геофизики, химии и особенно физических наук.

Изучение элементов мироздания сливается в единую общую проблему космохимии, новой нарождающейся отрасли химических дисциплин. Но познание химии космоса зависит от успехов изучения физической обстановки космических миров. В интервале температур — от близких к абсолютному нулю до миллионов градусов, в интервале давлений от крайних разрежений, превышающих наши рентгеновские трубки, до давлений в миллионы атмосфер, в незнакомой нам обстановке различных электромагнитных полей, полей тяготения и полей излучения — атом химического элемента, сохраняя свои статистические законы распада и, вероятно, синтеза ядра, является основным объектом познания космохимии.

Его судьбы в мироздании являются судьбами и всего космоса на сложных путях космической истории.

Заканчивая эту работу, я не могу не отметить, что попытка подойти к учету химических элементов вселенной неизбежно должна была коснуться достижений ряда научных дисциплин, весьма отдаленных от моей специальности минералога и геохимика. Я сознаю, что многое, может быть, набросано слишком смело, что пришлось коснуться областей, которых я чужд, и что невольно мной могли быть и, вероятно, были сделаны в этих областях ошибки. Часто, базируясь на достижениях физики, химии, астрофизики или геофизики, мне приходилось нередко сообщать чужой научный материал, не вкладывая в него критики, лишь пытаюсь осветить его с точки зрения моих собственных геохимических идей. Пусть критика дополнит и исправит мои ошибки и недочеты; я считаю необходимым дать основную канву в одном из важнейших вопросов химии космоса и толкнуть научную работу в определенном направлении.

СТРОЕНИЕ И СОСТАВ ЗЕМЛИ КАК КОСМИЧЕСКОГО ТЕЛА^{1,2}

ГЕОХИМИЧЕСКИЙ ОЧЕРК

«Велико есть дело достигать во глубину земную разумом, куда руками и оком достигнуть возбраняет натура; странствовать размышлением в преисподней, проникать рассуждением сквозь тесные расселины и вечной ночью помраченные вещи и деяния выводить на солнечную ясность».

Ломоносов, 1763³.

І. ВВЕДЕНИЕ

Проблема химического состава Земли как космического тела могла быть поставлена только в самые последние годы, так как раньше не только для ее разрешения, но даже для ее постановки не было достаточных фактических данных. Надо, однако, сказать, что еще сейчас она является одной из сложнейших научных проблем и что в этой области сейчас больше смелых догадок и теоретических построений, чем точно обоснованных положений. Вместе с тем, в вопросы изучения состава Земли за последние годы было внесено столько интересных идей, были выработаны столь интересные методы анализа природных явлений, что мы должны связать их в общую картину и попытаться во всей широте рассмотреть нашу задачу. Это тем более заманчиво, что для построения этой картины необходимо было объединить данные геохимии, минералогии, геофизики, кристаллографии и астрономии.

Человек в своем стремлении к познанию окружающего мира, конечно, не мог успокоиться на том исключительном незнании, которое обнаруживала наука по отношению к глубинам Земли: в сущности, глубже 20 км с поверхности не проникала мысль человека, и, таким образом, ближайшие участки, находящиеся непосредственно под его ногами, оставались для него загадочными. А между тем, не только глубокие научные проблемы привлекают его в эту область природы, его техническая и промышленная мысль, несомненно, еще в ближайшее столетие направится в глубины Земли, где ее будут привлекать и громадные запасы тепла и наличие редких на поверхности металлов. Не надо быть ни фантазером, ни мечтателем — познание и использование более глубоких зон Земли составляют одну из самых заманчивых проблем человечества. И сейчас оправдываются слова Ломоносова, сказанные более 150 лет тому назад: «Ныне уже, любители рудных тел, одарены вы отменным зрением; коим не токмо по земной поверхности, но и в недра их глубоко проникнуть можете, то есть по наружности и о внутренностях дознаться; или как просто говорят, по нитке знаете и клубка добратся»⁴.

¹ Печатается по тексту, опубликованному в журнале «Научное слово», 1928, № 6—7, стр. 23—62.— *Ред.*

² В основу статьи положен доклад в геофизическом семинарии Московского университета 8 февраля 1928 г. См. также: А. Е. Ферсман. Химические элементы Земли и космоса. Пг. Научн. хим.-техн. изд., 1923, и А. Е. Ферсман. Химия мироздания (популярное изложение). Пг., 1923.

³ О слоях земных. Прибавление 2-е к «Первым основаниям металлургии», 2-е изд., 1794, стр. 168, 169.

⁴ О слоях земных. Там же, стр. 280.

До настоящего времени наши точные науки ограничивались тоненькой пленкой земной коры: минералогия изучала минералы земной коры, геология учила о том, что происходит на поверхности и на ничтожных глубинах; пытаться выскочить за тесные рамки официальной науки считалось недопустимым дерзновением, недостойным точного знания.

Фактически в руки человека попадало вещество из очень небольших глубин; самые глубокие рудники не достигают глубин 2,5 км: золотой рудник Вилледж-Дип-Майн в Южной Африке — 2289 м и Морро-Вельо в Бразилии — 2262 м; немногим глубже проникают буровые инструменты:

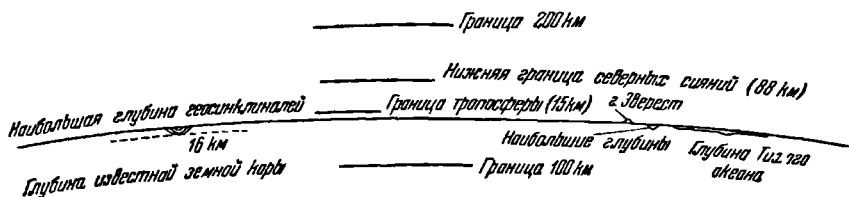


Рис. 1. Часть земной поверхности (по Бергу, 1927). Радиус земной поверхности в этом масштабе равняется 42,5 см.

в Атенс-Филд в Калифорнии — до глубины 2318 м, в Мак-Чейнс в Пенсильвании — до 2365 м и, наконец, скважина Чейнслор Канфилд Мидуэй Ойл К° имеет в настоящее время глубину 2450 м и предполагается углубить ее до 3000 м.

Однако этим поле, доступное химическому исследованию человека, не ограничивается. В долгие геологические эпохи на поверхности Земли происходят и накапливаются крупные геологические события (рис. 1). Если землетрясения почти не открывают перед человеком неведомых ему областей земной оболочки, то связанные с ними тектонические процессы, сбросы и сдвиги, складки и горные цепи открывают перед ним гораздо более глубокие зоны земной коры, чем те, куда он может проникнуть по собственной воле. Глубокие геосинклинали земной поверхности, далеко уходящие от поверхности океана, превращаются в течение геологических периодов в высокие горные цепи и осадки самых больших глубин, перемешанные с потоками изверженных пород и продуктами перекристаллизации тех и других, поднимаются на большие высоты, образуя гребни горных краев. Сама природа идет навстречу человеку, и среди постоянных движений земной коры она раскрывает перед ним странички из химической жизни земной коры до глубины 10 или, может быть, 20 км.

А что же дальше этих ничтожных величин, едва достигающих 0,003 земного радиуса? Что делается там, за пределами этих цифр, в остальных 997 тысячных частях радиуса Земли? Именно в эту область мы попытаемся проникнуть в настоящей статье на основании ряда геофизических, геохимических и астрономических данных, тем более что как раз этой области посвящаются сейчас многочисленные интересные работы, главным образом советских, норвежских и американских ученых.

Но раньше чем мы перейдем к ним, необходимо посмотреть, как обстоит дело с границами нашего познания химии Земли и мироздания: сначала вверх от той пленки, на которой работает наша мысль, — к верхним границам земной атмосферы.

Здесь тоже год за годом отодвигаются границы нашего познания природы, и почти каждый год приносит новые крупные завоевания в этом направлении.

Мировое межпланетное пространство, вероятно, постепенно через зону разреженных газов переходит в нашу земную атмосферу. Самому человеку доступны высоты лишь около 13 км, на высотах до 9 км сделаны точные определения химического состава воздуха на основании проб, взятых столь безвременно погибшим Андре и Вигандом. Шары с самопишущими приборами поднимаются немного выше 37,5 км. Пролетающие метеориты загораются на высоте 150—200 км.

Особенные успехи сделало спектроскопическое исследование более высоких слоев атмосферы. Человек уже давно интересовался северными сияниями, восхищался яркостью их тонов, красотой формы и переходов, не зная, что их спектр состоит главным образом из линий тех благородных газов и особенно гелия, о существовании которых он не догадывался до самых последних лет; линии кислорода, азота, неона и гелия сверкают в северном сиянии еще на высоте 800 км.

Постепенное расширение нашего химического кругозора достигается, однако, совершенно не химическим способом — обычная химия с ее аналитической лабораторией мало может помочь разрешению нашей задачи в целом, и постепенно на помощь приходят новые методы научных исследований.

В то время как самыми разнообразными способами мы постигаем химический состав атмосферы, наравне с этим идет за последние годы работа по изучению химии самой земной поверхности — той оболочки Земли, которую мы называем *б и о с ф е р о й*. Здесь благодаря новому биогеохимическому направлению работ академика Вернадского впервые начинают выясняться распределение химических веществ в живых организмах и роль в земной коре хозяйственной деятельности человека.

Гораздо сложнее обстоит дело с расширением наших сведений о химических свойствах в глубинах Земли; здесь наши познания выявляются все еще очень медленно, и лишь за последние годы успехи геофизики и, в частности, сейсмологии, намечают совершенно новые пути в понимании этих вопросов.

Сейчас самые крупные геологи и геохимики начали заниматься этими вопросами, и целые школы геохимиков дали нам за последние годы весьма ценный материал из этой области.

Основные сведения по химии Земли делают возможными:

- а) определение геофизических констант: давления, температуры, удельного веса, твердости и упругости Земли и ее отдельных оболочек;
- б) предположения физико-химического характера об агрегатном состоянии Земли;
- в) исследование сейсмических волн;
- г) анализ распределения радиоактивности в земной коре;
- д) геохимические и минералогические подсчеты;
- е) сравнительный анализ Земли и пород космического происхождения (метеоритов);
- ж) сравнительный анализ Земли и других космических тел.

Таковы те отдельные пути, по которым мысль современного ученого упорно стремится ворваться через броню твердых оболочек Земли в ее внутренний мир. Задача нелегкая, но она ставится на очередь самым ходом исторического развития нашей науки.

II. КЛАРКОВСКИЕ ЧИСЛА

Ровно 40 лет тому назад молодой американский геолог и химик Кларк впервые подошел к проблемам химии Земли и попытался, после неясных предположений еще конца XVIII века, выразить состав Земли в точных числах. Для первоначального разрешения задачи он остановился только на доступных человеку известных частях земной коры: на атмосфере, водной и каменной оболочках до глубины 10 миль, т. е. до 16 км.

В те времена было мало точных анализов горных пород, многие геологические явления, и особенно проблемы образования горных пород, были очень плохо выяснены, тем не менее Кларк взялся за эту задачу и в течение всех 40 лет неустанно работал над ней, развивая и уточняя свои цифры. Сначала построения Кларка касались только главнейших химических элементов, постепенно к этому присоединились данные и о менее важных составных частях, о распределении в земной коре очень редких химических веществ. К работам Кларка присоединились многочисленные исследования норвежской и русской геохимических школ, благодаря чему вопрос о среднем составе земной коры вырос в целую главу современной геохимии. Числа, выражающие среднее содержание какого-либо химического элемента в земной коре, получили наименование *к л а р к о в с к и х ч и с е л*, или просто *к л а р к о в* (подобно вошедшим в наш обиход электротехническим терминам — амперу, ому, вольту и др.).

В своих первых работах Кларк исходит из очень простых предположений: на поверхности пленка Земли составлена из пород осадочных и из пород изверженных, образовавшихся из некогда расплавленных масс. Соотношение этих пород в отмеченной выше наружной пленке приблизительно таково:

	% по весу
Изверженные породы	95,00
Глинистые породы	4,00
Песчаники	0,75
Известняки	0,25
	100,00

Однако нет необходимости отдельно определять состав изверженных и осадочных пород: ведь последние образовались из первых, только перегруппировав между собой элементы, общее же число вещества в них должно оставаться одним и тем же, если только принять во внимание, что часть легко растворимых соединений перешла еще в водные растворы, а часть газов, как кислород и угольная кислота, была заимствована из воздуха.

Таким образом, в основе надо было определить средний состав изверженных пород, причем Кларк совершенно правильно рассчитал, что можно прямо взять среднее из всех анализов, не принимая во внимание различие в площадях, занимаемых разными породами, так как статистически можно доказать, что для более распространенных пород имеется больше анализов, а для менее важных — меньше. После первых грубых подсчетов цифры стали проверяться самими разнообразными методами: путем отдельного определения состава пород осадочных, определения кларковских чисел для разных континентов, определения средних отдельных типов горных пород, определения состава по площадям распространения и т. д. Все эти методы привели к замечательному однообразию чисел, что можно видеть из табл. 1.

Таблица 1

Средний состав изверженных пород земной коры (в %)

	1	2	3	4	5
Кремнезем — SiO_2	59,97	59,12	60,19	59,84	50,03
Глинозем — Al_2O_3	15,39	15,34	15,76	15,12	15,51
Окись железа — Fe_2O_3	4,03	3,08	2,87	3,17	3,88
Закись железа — FeO	3,56	3,80	3,67	3,67	6,23
Окись магния — MgO	4,60	3,49	3,16	3,61	6,62
» кальция — CaO	5,41	5,08	4,80	4,97	7,99
» натрия — Na_2O	3,28	3,84	3,90	3,73	4,00
» калия — K_2O	2,97	3,13	3,07	3,40	2,10
» титана — TiO_2	0,56	1,05	1,01	0,83	1,96
Фосфорный ангидрид — P_2O_5	0,23	0,30	0,26	0,23	0,25
Остальные вещества	—	1,77	1,31	1,43	1,43
Сумма	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Примечание. 1. Средний состав по Кларку — 1889 г. 2. Средний состав по Кларку — 1924 г. 3. Средний состав изверженных пород Центральной и Северной Америки — 1924 г. 4. Средний состав изверженных пород Европы. 5. Средний состав изверженных пород островов Тихого океана.

Уже беглый взгляд на эту таблицу показывает, насколько постоянен состав земной коры, и лишь столбец 5 дает нам несколько отличные цифры: мы знаем и причину этого, так как особый характер дна Тихого океана нам открывает, оказывается, более глубокие зоны земной коры, о чем речь впереди (см. рис. 4).

Во всех анализах мы имеем еще последнюю строку — остальные вещества, занятую целым рядом химических элементов, принимающих меньшее участие, но имеющих, тем не менее, в составе Земли большое значение.

Их определение потребовало очень много времени и коллективного участия большого числа геохимиков. Вот как, например, расшифровывает Кларк в столбце 2 последнюю строку — 1,77:

	%		%
Вода — H_2O	1,150	Закись марганца — MnO	0,120
Углекислота — CO_2	0,100	Окись никеля — NiO	0,025
Окись циркония — ZrO_2	0,040	» бария — BaO	0,055
Хлор — Cl	0,050	» стронция — SrO	0,022
Фтор — F	0,030	» лития — Li_2O	0,007
Сера — S	0,050	Медь — Cu	0,010
Окись редких земель — TR_2O_3	0,020	Цинк — Zn	0,004
» хрома — Cr_2O_3	0,055	Свинец — Pb	0,002
» ванадия — V_2O_5	0,030		

После того как Кларк вычислил таким образом средний состав горных пород, можно было перейти к его основной задаче: вычислить средний состав всей земной коры до глубины 16 км, включая сюда и атмосферу. Не буду останавливаться на том, как много еще трудностей предстояло на этом пути, но в основу своих вычислений он поставил соотношение масс вещества:

	% по весу
В твердой оболочке (до глубины 16 км)	93,06
» жидкой » (» » 16 »)	6,91
» газообразной » (» » 16 »)	0,03
	100,00

Отсюда и получились основные кларковские числа.

Средний состав земной коры (до глубины 16 км) в целом¹
(рис. 2)

	% 1 2			% 1 2	
1. Кислород	49,52	49,60	15. Сера	0,048	0,15
2. Кремний	25,75	25,94	16. Барий	0,047	0,08
3. Алюминий	7,51	7,43	17. Хром	0,033	0,02
4. Железо	4,70	4,18	18. Азот	0,030	0,04
5. Кальций	3,39	3,24	19. Фтор	0,027	0,10
6. Натрий	2,64	2,40	20. Цирконий	0,023	0,03
7. Калий	2,40	2,35	21. Никель	0,018	0,02
8. Магний	1,94	2,07	22. Стронций	0,017	0,02
9. Водород	0,88	1,00	23. Ванадий	0,016	0,02
10. Титан	0,58	0,50	24. Редкие земли	0,014	0,02
11. Хлор	0,188	0,20	25. Медь	0,010	0,01
12. Фосфор	0,12	0,11	26. Остальные элементы	0,032	0,03
13. Углерод	0,087	0,35			
14. Марганец	0,08	0,09	Сумма	100,00	100,00

¹ В первом столбце приведены данные Кларка — 1924 г., во втором — данные В. И. Вернадского — 1925 г. и А. Е. Ферсмана — 1928 г.

Таковы завоевания современной геохимии. Своеобразные и в сущности несколько неожиданные законы определяют состав земной коры, и мы можем их выразить в следующих положениях:

1. Химические элементы входят в состав земной коры в количествах весьма различных, причем амплитуда этих колебаний — миллиарды раз.

2. Преобладающее значение в земной коре имеют только немногие элементы из известных, причем можно подсчитать, что

	%
первые 3 составляют	86,84
» 9 »	98,85
» 12 »	99,63

3. Преобладающее значение имеют в земной коре элементы легкие, с низкими атомными весами и малыми порядковыми числами.

4. Любопытно преобладание в земной коре элементов четных порядковых чисел и четных атомных весов.

Какие странные числа и какие огромные колебания в относительной роли отдельных атомов! Конечно, этот вопрос не мог не заинтересовать тех, кто работал над ним.

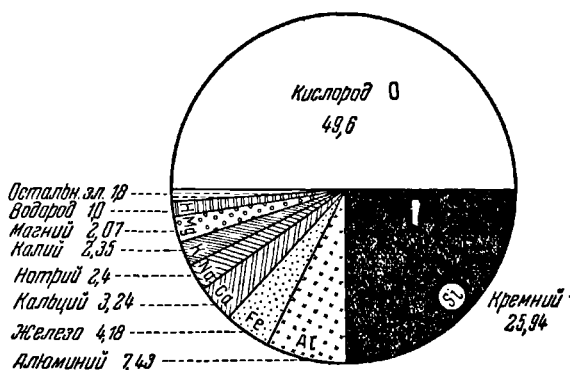


Рис. 2. Средний состав земной коры до глубины 16 км.

Первая мысль, которая приходила для объяснения этих различий, связывала их с историей образования самих элементарных тел. В робкой форме она была высказана самим инициатором подсчетов Кларком, который при начале работы был под обаянием напумевших в конце восьмидесятых годов прошлого столетия обобщений Крукса и идей о зарождении миров Локайера. Но для точного обоснования этих идей в те времена еще не было фактов.

Де Лоне, французский геолог, первый подметил некоторые черты распределения химических элементов; он не побоялся встать на путь широких обобщений, и в его идеях проскальзывали и философские идеи Демокрита и глубокие картины его предшественника — Эли де Бомона.

Но не будем уходить в область гипотез — им еще много места будет отведено впереди, а пока останемся в области точных фактов. В этом сила кларковских чисел, положивших, как мы увидим, начало точным количественным подсчетам состава Земли и других космических тел.

III. ЗОНАЛЬНОСТЬ ЗЕМЛИ

Кларковские числа давали среднее из совершенно разнообразных сред, составляющих нашу земную кору; нельзя было, однако, не учесть, что это среднее является в некоторых отношениях фикцией, что Земля неоднородна и состоит из весьма различных по составу и по строению оболочек. Первое деление Земли на оболочки встречается уже у древнегреческих и малоазиатских философов, которые не могли не различать газообразную среду воздуха, жидкую среду морей и твердую Землю; но точное обоснование этого деле-

ния и введение определенных понятий в геологию и геохимию было выполнено выдающимся геологом XIX века Зюссом.

Разбирая строение Земли, Зюсс не мог не подметить, что основные оболочки, в свою очередь, делятся на отдельные зоны и что, таким образом, зональное построение всей Земли является одной из характернейших ее черт. И чем более сейчас развиваются геохимия и геофизика, тем более определенно начинает выявляться идея зонального распределения вещества в Земле; она сказывается не только в наших построениях глубин Земли, основанных на геофизических данных, но даже и при изучении кларковских чисел, если мы в пределах хотя бы только изученных 16 км разделим породы по глубинам их залегания (см. рис. 8).

При этом мы увидим совершенно закономерное изменение количества элементов сверху вниз, а именно: к низу уменьшается содержание кислорода, кремния, алюминия, калия, фосфора, бария, стронция, но увеличивается — магния, железа, титана и отчасти кальция. Эти данные приводят нас к мысли о как бы радиальном расположении элементов в земной коре и в ее глубинах, о чем мы ниже будем говорить подробнее (см. рис. 10).

В табл. 2 дана схема тех 12 основных оболочек и ядра Земли, которые мы в ней различаем, с характеристикой их отдельных свойств. При этом мы должны знать, что тип границ между ними неодинаков, отмечается иногда постепенный переход, в других же случаях, а именно: между атмосферой и гидросферой, гидросферой и литосферой, а также между центральным ядром и окутывающей его оболочкой, — более резкий.

Нас интересуют еще два вопроса в построении Земли. Прежде всего, являются ли оболочки совершенно однородными на всем своем протяжении или же они построены химически более сложно? На основании дальнейшего мы должны будем признать, что оболочки построены довольно однообразно, поэтому мы вправе ожидать, что наши средние числа являются не фикцией, а картиной типической химической среды. Только одна поверхностная пленка (5, 6, 7 и 8-я оболочки) менее однородна и подчинена ряду очень интересных, но совершенно особых законов пространственного перераспределения химических элементов.

Второй вопрос возникает при изучении этих оболочек, окутывающих всю Землю, — это вопрос об их постоянстве во времени и об обмене веществом между ними.

Это вопрос огромной геохимической и геологической важности, который с несомненностью указывает на то, что явления перехода — миграции элементов между оболочками — намечаются в очень большом масштабе и, может быть, даже частично определяют современный состав поверхности пленок Земли.

Перехожу теперь к систематическому обзору отдельных оболочек, пользуясь общей сводной таблицей (см. табл. 2).

Атмосфера

Постепенно рассеиваясь, атмосфера продолжается в неведомые области межпланетного пространства; с другой стороны, газовая фаза вещества простирается много глубже нижней границы атмосферы, подчиняясь ряду законов избирательного поглощения. Как мы видим по табл. 2, атмосферу мы можем довольно резко разделить на две основные оболочки: нижнюю — тропосферу, тесно связанную с геохимией самой Земли и с движением воздуха, и стратосферу — сплошную постоянную

Строение Земли

Сейсмиче- ские грани- цы в км	Глубина в км	Название оболочки	Мощность в км	Давление в атмосфере	Температура
	300	Межзвездное простран- ство		$1 \cdot 10^{-13}$	
	200 50—70	1. Стратосфера	200—300	0,00001	—50° —70° зона инверсии
	10—15	Атмосфера Слой постоянной температуры 2. Тропосфера	10—15	0,3—0,5	—55°
	6	Гидросфера и био- сфера 3. Биосфера (по- верхностная пленка)	Вверх 5 км, вниз 3 км. Всего 8 км	Около 1 (до 500)	От —67,8° до +85°С
		4. Гидросфера	Средняя 3,7	Около 1 (до 500)	0 — +70°
Резкая граница		5. Кора выветрива- ния	0,8	Не выше 250	Средняя тем- пература +16° До +80°
		6. Осадочная оболоч- ка	≈ 4	< 1000	До +100°

Таблица 2

и ее отдельных оболочек

Состояние вещества	Удельный вес	Излучение	Масса по отношению ко всей Земле (в %)	Химическая характеристика	Минералы	Примечания
Разреженные газы. Электроны	—	Космическое излучение		До 300—500 км. Водород, гелий, остатки кислорода и азота		Метеориты 200—300 и до 600 км
Разреженные газы, область земной коры по Вегарду	—	Космическое излучение	0,000002	До 100 км. Содержание азота и кислорода уменьшается. Водород, гелий, озон	Пояс периодического озона. Граница паров воды	Северное сияние 85—950 км. Светящиеся облака до 80 км
Газы. Твердая пыль	—	Космическое излучение, излучение радия	0,00001—0,0001	Азот, кислород, аргон, неон, гелий, криптон, ксенон, озон, пары воды, угольная кислота, нитрон		Шары-зонды до 37,7 км. Человек до 13 км
Преимущественно коллоиды	—	Излучение Солнца. Эманация радия			Живое вещество	
Растворы	1,03	Низкая радиоактивность	0,02	Водород, кислород, хлор, натрий, отчасти сера	Вода, лед	
Преимущественно коллоиды	2,2	Повышенная радиоактивность в осадках		Кислород, водород, кремний, алюминий, углерод, угольная кислота, хлор	Глина, кварц, лимонит, гипс, соль, боксит и др.	Граница кислородной поверхности
Коллоиды + кристаллы	2,5	Средняя радиоактивность		То же	То же + кальцит, доломит, уголь	

Сейсмиче- ские грани- цы в км	Глубина в км	Название оболочки	Мощность в км	Давление в атмосфере	Температура
30—40 (глубина земле- трясе- ний)	15—20	Литосфера 7. Метаморфиче- ская оболочка	5—10	<2500	До 350°
		8. Гранитная обо- лочка	10	До 6000	600°
	100 км	Литосфера 9. Базальтовая	85	До 20 000	1000—2 000°
		10. Перидотито- вая (экполи- товая)	1000	До 500 000	1200—1500° 1000°
1200	1200				
1700	2450	Промежуточная оболочка 11. Рудная обо- лочка Рудная оболочка	750 Всего 1500	1 000 000	Порядка 1000°
2900		12. Палласитовая	1700 750	1 500 000	Порядка 1000°
	6360	Резкая граница 13. Центральное ядро	3400	3 000 000	2000° [до 8000 (?)]

Т а б л и ц а 2 (продолжение)

Состояние вещества	Удельный вес	Излучение	Масса по отношению ко всей Земле (в %)	Химическая характеристика	Минералы	Примечания
Кристалл	2,7	Более высокая радиоактивность	0,5	Кислород, водород, кремний, алюминий, углерод, угольная кислота, хлор	Кварц, полевые шпаты	
Кристалл	2,6—2,8	Наиболее высокая активность		Кислород, кремний, алюминий, калий, натрий, железо, магний, кальций и др.	Кварц, полевые шпаты, слюда, магнетит, апатит	
Кристалл + расплав	2,7—3,3	Средняя активность	1,0	Кислород, кремний, алюминий, натрий, железо, магний, кальций, титан, фосфор, сера, хлор	Плагноклазы, пироксены и роговые обманки, магнетит, апатит	Расплавленная оболочка (70—120 км)
Расплав + стекловатое	3,6—4	Низкая активность	36,5	Кислород, кремний, железо, магний, кальций, хром, никель, ванадий	Оливин, пироксен, анортит (пирон, алмаз)	
Стекловатое	5—5,5	Весьма низкая активность	20,0	Содержание железа, магния, серы, кальция, фосфора, углерода, кремния и алюминия уменьшается. Возможны скопления титана, свинца, марганца, ртути. Вместе с серой — селен и теллур	Оливин, пироксены, серый колчедан (пирит), хромит, магнетит, гематит, рутил, ильменит	
Свойства твердого тела, стекла	6	Весьма низкая активность	10,0			
То же	9—11	Весьма низкая активность	32,0	Железо, никель, кобальт, фосфор, углерод, хром, сера. Возможна группа платины	Самородное железо и никель, троилит, когенит, прейберзит и др.	

геохимическую систему. Изменение состава атмосферы с высотой подвержено еще ряду сомнений. Прилагаемые три рисунка изображают наши представления по этому вопросу (рис. 3).

Наиболее вероятная схема вполне отвечает повышению атомного веса (1—4—14—16).

Весьма вероятно, что на высотах 80—100 км вместо кислорода мы имеем озон, образующийся периодически в течение дня под влиянием Солнца, при действии ультрафиолетового излучения — как раз с этой же высотой совпадают наиболее обычные северные сияния. Необходимо отметить еще

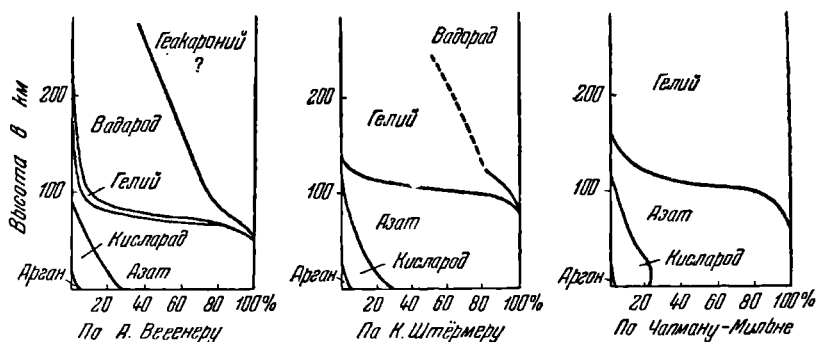


Рис. 3. Строение атмосферы по разным авторам.

очень важную границу постоянной температуры, которая на высотах в 10—15 км колеблется в пределах 55—85° С, оставаясь и вверх от этой границы приблизительно постоянной или даже повышаясь. Характер, состав и природа высоких слоев определяются не только особенностями химического состава, но и той ионизацией и своеобразными излучениями, частью сильно проникающими, которые создают особенности физического состояния сильно разреженного газового вещества.

Биосфера

Понятие биосферы было выдвинуто Зюссом еще в 1875 г., но реальное значение оно получило только в последние годы в работах академика Бернадского. Биосфера — оболочка, связанная в своих химических процессах с жизнедеятельностью органического мира; она нередко отделена от других оболочек и по существу является связанной лишь с самой поверхностной пленкой Земли, глубже она распространяется в области водных бассейнов и довольно высоко захватывает атмосферу.

Верхняя граница жизни определяется высотой в 5 км, может быть, частично до 10 км доходят споры микроорганизмов; гидросфера вся целиком может считаться зоной жизни, так как, по видимому, даже в глубоководных илах наблюдается жизнь бактерий. Совершенно не разгадано распространение жизни в глубинах твердой оболочки. По данным почвоведов мы знаем, что в сущности жизнь связана только с верхним метром почвы и что с каждым последующим метром количество живых существ на 1 см³ сильно падает и на глубинах 5—6 м практически приближается к нулю.

Зона биосферы необычайно неоднородна и очень сложна в связи с разнообразием климатического режима, типом оболочки, на которой

она развивается. Перемещение элементов, т. е. миграция их, является одним из характернейших признаков для этой оболочки; недаром даже воды поверхности были названы в а д о з н ы м и, т. е. блуждающими.

Вместе с тем, атмосфера — как пограничная область — является связующим звеном между Землей и космосом, т. е. областью, через которую устанавливается основной обмен веществ между нашей планетой и другими космическими телами и межпланетным пространством.

Гидросфера

Гидросфера, как замкнутая водная оболочка Земли, вошла в сознание еще у древних греческих философов, но в виде определенного геологического явления она была формулирована лишь Зюссом. В среднем глубину этой оболочки надо определить в 3,75—3,80 км, но некоторые глубины достигают почти 10 км.

Последние работы над мировым океаном обнаружили его строение, совершенно тождественное в схеме со строением атмосферы, но в обратную сторону, причем наиболее характерный разрез дает океан в области тропических и субтропических широт: до глубины 200 м — з о н а в о з м у щ е н и я со средней, довольно однородной для этих широт температурой около 15—16°C, далее следует з о н а т р о п о с ф е р ы до глубины в 1300 м с постепенным понижением температуры до 1—3°C и, наконец, сферы совершенно одинаковых температур и свойств.

Кора выветривания, осадочная и метаморфическая оболочки

Самая верхняя оболочка литосферы представляет собой продукт сложной и длительной геологической истории обмена веществ и перегруппировки элементов между гранитной и базальтовой оболочками, с одной стороны, и атмосферой и гидросферой — с другой. Эта оболочка, равно как следующая — метаморфическая, есть геологическое новообразование Земли.

Книзу осадочная серия часто незаметными переходами связана с более глубокими зонами — гранитной и базальтовой. Долгое время в геологии считалось, что метаморфическая оболочка из гнейсов, кристаллических сланцев некогда покрывала всю Землю, образуя как бы наиболее древнюю твердую кору на расплавленном шаре планеты. Сейчас мы должны совершенно определенно отказаться от этой мысли: для нас метаморфическая оболочка есть сложная промежуточная зона между осадочными и изверженными породами — в значительной части это древние осадки, измененные под влиянием высокой температуры и давления глубин и чаще всего пропитанные внедрявшимися снизу гранитными расплавами или горячими растворами. Сейчас в нашем представлении метаморфические оболочки есть часть тех гранитных островов — материков, которые мы мыслим себе как бы плавающими на полужидком вековом океане своеобразной базальтовой массы, которую геологи сейчас называют «базальтовой постелью».

Гранитная, базальтовая и перидотитовая оболочки

Ниже коры выветривания и метаморфизма следуют три каменные оболочки, сейчас хорошо нам известные; свойства этих трех оболочек изложены в табл. 2, а их химический состав сведен ниже. Строение верхней обо-

лочки — гранитной — весьма неоднородно. Повидимому, наши континенты преимущественно представлены гранитной оболочкой, плавающей на однообразной «базальтовой постели». Эта постель образует дно Тихого океана и изверженные массы его островов, а Атлантический океан имеет на дне тонкий слой гранитной оболочки, под которой залегает все тот же базальтовый покров.

Общее строение и взаимоотношение этих двух зон хорошо видны на рис. 4, а также на диаграмме, изображающей удельные веса отдельных континентов и их средние высоты (рис. 5); мы видим, что более легкие континенты выше, более же тяжелые опущены глубже в вязкую массу «постели».

Постепенно с глубиной базальтовая оболочка переходит в перидотитовую. Надо сознаться, что характер этой оболочки довольно гипотетичен,

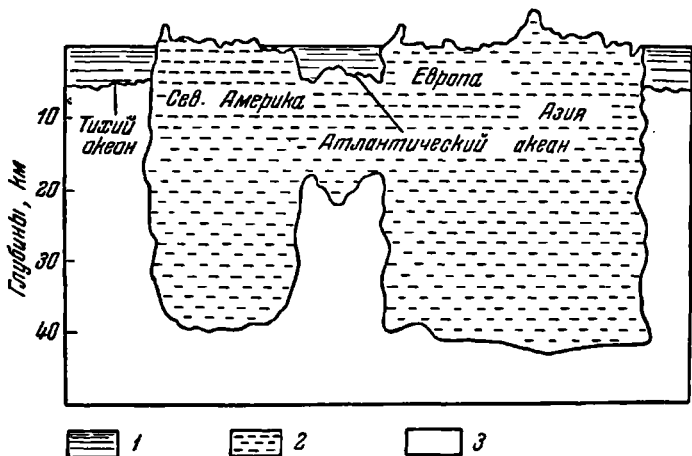


Рис. 4. Схематический разрез через земную кору, по Гутенбергу (1926 г.):

1 — океаны; 2 — материнки; 3 — базальтовая постель.

хотя общая совокупность геологических и петрографических данных не противоречит сложившемуся о ней представлению.

Рудная оболочка

Правильный анализ промежуточной оболочки между каменным поясом и центральным ядром представляет наибольшие трудности для разрешения, и именно для этой области нет единства взглядов на ее строение. Мощность оболочки колеблется между 1700 и 1200 км, удельный вес постепенно растет с глубиной от 4,5 до 6,5 км, температурные условия совершенно загадочны, давление колеблется между 500 и 1500 тысяч атмосфер, агрегатное состояние весьма сложное, скорее отвечающее состоянию стекла. Одни, как Гольдшмидт и Тамман, считают эту оболочку более или менее однородной и богатой серой, другие, как Вашингтон и Кларк, делят ее на две, из которых верхняя как бы продолжает изменение пород земной коры, вторая же является полуметаллической и напоминает метеориты — палласиты, состоящие из металлического железа с как бы рассеянными в нем камнями кремневых соединений.

Очевидно, что это типичная рудная оболочка (рис. 6), содержащая металлы или в самородном состоянии (никель, кобальт, железо) или в виде

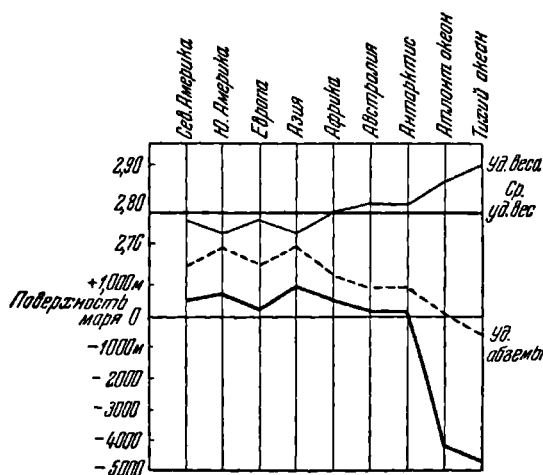


Рис. 5. Удельные веса и высоты континентов.

Объяснение	Уд. вес	Высота средняя в м
1. Земная кора в целом	2,77	+686
2. Северная Америка	2,75	+573
3. Южная Америка	2,72	+631
4. Европа	2,75	+285
5. Азия	2,72	+969
6. Африка	2,77	+614
7. Австралия	2,79	+244
8. Антарктика	2,79	?
9. Дно Атлантического океана	2,85	-4115
10. Дно Тихого океана	2,89	-4517

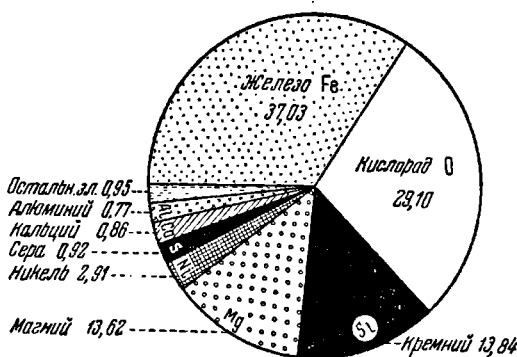


Рис. 6. Средний состав рудных оболочек.

соединений с кислородом (кремний, железо), или в виде сернистых соединений.

Тамман подошел очень остроумно к анализу этой оболочки, исходя из того закона, что вообще в природе накапливаются такие соединения,

которые при своем образовании выделяют максимальное количество тепла. Поэтому, если в этих породах есть металлическое железо, то наравне с ним могут существовать лишь такие соединения, которые выделяют меньше тепла, чем то, которое выделяло бы железо при своем окислении; отсюда вытекает вероятность нахождения в этом поясе вместе с металлическим железом таких металлов, как цинк, хром, марганец, кобальт, никель, кальций, а наверху, где металлического железа меньше, могут присоединиться к нему еще, с увеличением содержания кверху, стронций и редкие земли и, наоборот, уходить в глубины, с увеличением содержания к центру, — свинец, висмут, сурьма, медь и серебро. Впрочем, летучесть и подвижность висмута и сурьмы заставляют думать об их постоянном перемещении кверху.

Как бы ни были серьезны расхождения в понимании этой промежуточной оболочки, все же в своей основе она ясна и, составляя около одной трети всей массы Земли, является областью сосредоточения ряда тяжелых металлов.

Центральное ядро

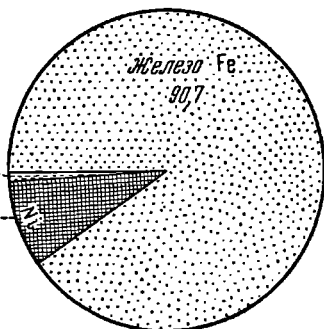
Мы видим из хода волн землетрясений, что наиболее резкий скачок

в свойствах Земли начинается на глубине 2900 км. С этим скачком мы связываем переход рудной оболочки в центральное ядро, где господствует сравнительно невысокая температура, но вещество находится под давлением нескольких миллионов атмосфер.

Вероятный состав ядра характеризуется приводимыми ниже цифрами, причем в первом столбце помещен предполагаемый состав ядра по Вашингтону, а во втором и третьем дан средний состав железных

Рис. 7. Средний состав центрального ядра.

метеоритов, вычисленный чикагским геологом Фаррингтоном (1911 г.) и нашим ученым П. Н. Чирвинским (1919 г.).



Земля Метеориты

	1	2	3
Железо	90,67	90,57	90,85
Никель	8,50	8,71	8,52
Кобальт	0,59	0,69	0,59
Фосфор	0,17	0,22	0,17
Сера	0,04	0,16	0,04
Углерод	0,03	0,11	0,03
Медь	—	0,06	0,02
Хром	—	0,06	0,01

Сумма . . . 100,00 100,58 100,23

В этом ядре, помимо вышеуказанных элементов, на основании ряда теоретических соображений можно ожидать скоплений молибдена и платиновых металлов, а в верхних частях, переходных к палласитовой оболочке,— меди и серебра.

IV. СРЕДНИЙ СОСТАВ ЗЕМЛИ В ЦЕЛОМ

Теперь, когда мы определили путем тех или иных вычислений или догадок средний состав земных оболочек, можно подсчитать и средний состав Земли в целом. Для этого надо только определить соотношение масс отдельных оболочек:

	По Вашингтону	По Ферману
Оболочка гранитная	0,48	0,5
" базальтовая	1,08	1
" перидотитовая	40,08	36,5
" рудная	31,06	30 (10 + 20)
Центральное ядро	27,30	32
	100,00	100,00

Эти цифры, полученные вышеуказанными авторами самостоятельно, весьма близки друг к другу и в общем позволяют, в грубом приближении, сказать: на каждую из трех основных групп (каменной оболочки, рудной оболочки и ядра) приходится по $\frac{1}{3}$ всей массы Земли (рис. 8).

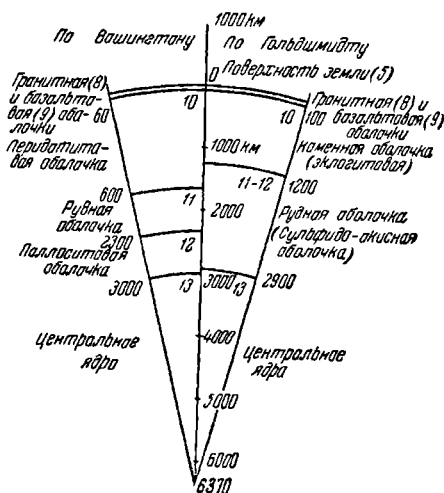


Рис. 8. Схематический разрез через земную кору с ее отдельными оболочками.

Приводим ниже средний состав Земли в целом и состав ее отдельных оболочек (табл. 3 и рис. 9).

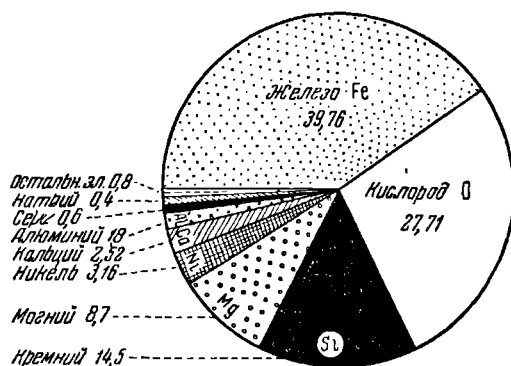


Рис. 9. Средний состав Земли в целом.

Таблица 3

Средний состав (в процентах по весу) отдельных зон Земли по Вашингтону (1925) и Черману (1928)¹

Элементы	Гранитная оболочка	Базальтовая оболочка	Перидотитовая оболочка	Рудная оболочка	Центральное ядро	Земля в целом
Кислород — O	46,59	44,24	42,05	29,10	—	27,71
Кремний — Si	27,72	23,24	23,00	13,84	—	14,53
Алюминий — Al	8,13	8,46	3,26	0,77	—	1,79
Железо — Fe	5,01	8,86	13,50	37,03	90,67	39,76
Кальций — Ca	3,03	6,51	5,09	0,86	—	2,52
Натрий — Na	2,85	2,35	0,50	0,32	—	0,39
Калий — K	2,60	1,28	0,22	0,07	—	0,14
Магний — Mg	2,09	3,73	10,91	13,62	—	8,69
Водород — H	—	—	—	—	—	—
Титан — Ti	0,63	0,83	—	—	—	0,02
Углерод — C	0,09	—	—	0,08	0,03	0,04
Хлор — Cl	—	—	—	—	—	—
Фосфор — P	0,13	0,20	0,06	0,11	0,17	0,11
Сера — S	0,05	0,10	0,54	0,92	0,04	0,64
Марганец — Mn	0,10	0,25	0,18	—	—	0,07
Фтор — F	—	—	—	—	—	—
Барий — Ba	—	—	—	—	—	—
Азот — N	—	—	—	—	—	—
Цирконий — Zr	—	—	—	—	—	—
Стронций — Sr	—	—	—	—	—	—
Ванадий — V	—	—	—	—	—	—
Хром — Cr	0,04	0,10	0,31	0,17	—	0,20
Никель — Ni	—	—	0,33	2,91	8,50	3,16
Остальные	—	—	Co—0,04	Co—0,19	Co—0,59	Co—0,23

¹ См. диаграммы отдельных зон, рис. 6, 7 и 9.

В тесной связи с вопросом о среднем составе Земли стоит и вопрос о радиальном распределении в ней отдельных элементов и о том, как намечается в Земле распределение более редких элементарных тел.

В общем порядок распространенности элементов в Земле как космическом теле таков:

Fe — железо	O — кислород	Si — кремний
Ni — никель	Ca — кальций	Al — алюминий
S — сера	Na — натрий	Co — кобальт
Cr — хром	K — калий	P — фосфор
Mn — марганец	C — углерод	Ti — титан

По сравнению с порядком вещества на земной поверхности мы видим весьма значительное расхождение, что видно из рис. 10, где схематически изображено содержание главных элементов в отдельных оболочках Земли.

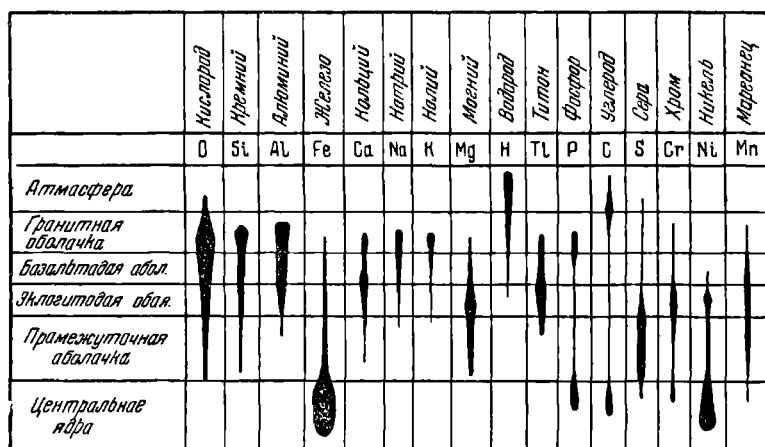


Рис. 10. Схема распространения главных химических элементов в отдельных зонах Земли.

V. СРАВНЕНИЕ ЗЕМЛИ С МЕТЕОРИТАМИ

Нарисованная выше картина состава отдельных оболочек и центрального ядра Земли в значительной степени основывается на аналогии их состава с составом метеоритов.

Как известно, метеориты довольно резко распределяются на два типа: каменные и железные, как бы напоминая этим более или менее резким различием ту резкую границу, которая на глубинах 2900 км отделяет рудную оболочку Земли от центрального ядра.

Особенно интересно сравнение каменных метеоритов с породами земной поверхности, которое устанавливает между ними довольно определенно и сходство и различие.

В общем состав каменных метеоритов напоминает состав глубинных пегматитовых пород и несомненно указывает на какое-то внутреннее сходство с ним. Тем не менее, между ними есть и ряд очень определенных различий. В метеоритах больше: железа, магния, никеля, серы.

В метеоритах меньше: кислорода, кремния, кальция и алюминия.

Вспомним установленные нами при анализе пород земной поверхности законы радиального распределения вещества: на основании анализа земных пород, мы говорим, что с глубиной должно увеличиваться содержание железа, магния, никеля, серы, хрома и кальция и уменьшаться — кислорода, кремния, алюминия, натрия, калия.

Мы видим поразительное совпадение: метеориты в своем составе как бы продолжают ряд изменений земных пород с глубиной и являются как бы дальними, глубинными породами, которые нам пока еще не известны и не имеются в наших руках.

Но что при этом особенно замечательно, так это то, что в каменных метеоритах совсем нет пород, отвечающих самой поверхностной пленке Земли — гранитам, и наравне с этим в них нет и характерных для гранитов химических элементов. Действительно, в метеоритах совсем не найдены (по Мериллу, 1913—1916 и 1919 гг.) стронций, барий, цирконий, молибден, олово, вольфрам, а также нет мышьяка, сурьмы, свинца, цинка. Достаточно посмотреть на список элементов гранитной оболочки, чтобы подметить отсутствие именно элементов гранитов!

Еще замечательнее получаются наши подсчеты, если мы сравним полученный нами выше средний состав Земли в целом со средним составом метеоритов всех наблюдавшихся типов. Последняя задача нелегкая, так как мы уже говорили, что между каменными и железными метеоритами есть как бы разрыв в свойствах. Взять просто средний состав всех имеющих в музеях метеоритов было бы неправильным, так как в них преобладают железные метеориты, тогда как при подсчете наблюдаемых падений, наоборот, железные оказываются весьма редкими. Дело в том, что железные метеориты гораздо легче обнаруживаются, резко отличаясь от других горных пород, поэтому много чаще попадают в музеи и нередко независимо от наблюдения их падения. В 1923 г., исходя из ряда данных и основываясь на предположении, что из каждых пяти метеоритов только один является металлическим, я получил среднее значение состава метеоритов. Относящиеся сюда цифры сведены мной в табл. 4. В последнем столбце ее присоединены результаты подобных же подсчетов, основанные на лучших новейших анализах. Рядом, в первом столбце, я поместил средний состав Земли в целом так, как он был дан еще в 1924 г. Вашингтоном. Должен при этом указать, что Вашингтон не знал моих работ и подошел к своим цифрам, исходя из совершенно иных данных и иного хода мыслей. Сходство всех трех столбцов оказывается поразительным, и, что особенно интересно, пересчеты среднего состава метеоритов, сделанные мной на основании новых данных в 1928 г., еще более сблизили наши числа, особенно тогда, когда между ними наблюдалось более резкое различие (например, для кальция, калия или марганца). Какой же вывод мы можем из этого сделать?

Средний состав метеоритов и средний состав Земли в целом тождественны и отмечают единоеобразие химического состава всех космических тел. Правда, что для нас до сих пор остается неизвестным происхождение метеоритов и до сих пор имеются лишь более или менее вероятные догадки, связывающие их то с малыми планетами, астероидами, то с кометами, то с обломками, выброшенными вулканами Луны. Когда-нибудь и этот вопрос получит свое разрешение, но пока нам интересен вывод в том простом фактическом виде, как он мной дан ниже (табл. 4).

Средний состав Земли и метеоритов
(в процентах по весу)

Таблица 4

	1925 г.	1922—1928 гг.	
	всей Земли (по Вашинг- тону)	метеоритов (по Ферс- ману)	
Железо — Fe	39,76 (из них ме- талл. 31,82)	37,90	37,04
Кислород — O	27,71	28,78	28,56
Кремний — Si	14,53	14,61	14,47
Магний — Mg	8,69	11,11	11,03
Никель — Ni	3,16 (металл.)	2,66	2,96
Кальций — Ca	2,52	1,00	1,38
Алюминий — Al	1,79	1,16	1,22
Сера — S	0,64	1,49	1,44
Натрий — Na	0,39	0,56	0,52
Кобальт — Co	0,23 (металл.)	0,21	0,06
Хром — Cr	0,20	0,29	0,26
Калий — K	0,14	0,21	0,15
Фосфор — P	0,11	0,12	0,12
Марганец — Mn	0,07	0,34	0,18
Углерод — C	0,04	0,01	0,13
Остальные	0,02	0,01	0,48
Сумма	100,00	100,46	100,00

VI. СРАВНЕНИЕ ЗЕМЛИ С ДРУГИМИ КОСМИЧЕСКИМИ ТЕЛАМИ

Мы отметили в предыдущей главе исключительное сходство Земли с метеоритами. Нам даже кажется, что между ними нет никакого существенного различия в химическом составе, и поэтому мы подняли вопрос о том, что же такое представляют собой метеориты и к какому типу космических тел их надо отнести? Мы не получили до сих пор ответа на этот вопрос, и поэтому неизбежно наша мысль пытается идти дальше по пути сравнений и искать сходства или различия между Землей и другими космическими телами — планетами, кометами, туманностями и звездами.

Здесь мы окажемся в центре современной астрофизической работы, среди новейших проблем мировой физики и химии, разрешаемых в больших обсерваториях. Величайшие умы современной отвлеченной математики и физики работают над этими проблемами.

Каждый месяц приносит новые успехи в этом направлении; химия космоса выясняется гораздо скорее, чем химия Земли, но именно она и проливает свет на строение и состав центральных частей нашей планеты.

Ближе всего к нам маленькая Луна, спутник Земли, с массой немного более 0,01 земной, с силой тяжести на поверхности, равной всего лишь $\frac{1}{6}$ земной, с малым удельным весом, всего лишь 3,34—3,46. Мы не имеем прямых данных по химии и минералогии Луны, несмотря на ее близкое соседство и на прекрасную изученность ее мертвой поверхности, лишенной

атмосферы и жидкой воды, лишь изредка изменяемой какими-либо мощными обвалами или подвижностью каких-либо глубочайших трещин. Но все-таки кое-что мы знаем: нам известно по характеру поляризации отраженных лучей, что породы поверхности Луны сходны с нашими кварцевыми порфирами, что белые пятна и полосы, расходящиеся, как лучи, от кратеров вулканов, весьма напоминают нам зоны минерала алунита (сернокислой соли алюминия и калия), которые мы знаем вокруг земных вулканов и которые в таком поразительном развитии открыты были академической экспедицией в 1927 г. в Закавказье, вокруг вулкана Алагеза. Несколькo болee высокий удельный вес сравнительно с поверхностной пленкой Земли говорит за то, что Луна должна состоять из минералов не только гранитного пояса, но и следующего базальтового (уд. вес 3,2).

Сейчас мы знаем, что далеко не все элементы могут сохраняться в расплавленном или нагретом космическом теле. Скорость частиц некоторых газов может оказаться настолько большой, что эти газы преодолевают силу тяготения тела и покидают его в безбрежных пространствах вселенной. Нетрудно видеть, что чем меньше само космическое тело, тем слабее на нем сила тяготения и тем шире круг тех веществ, которые должны его покидать. Луна нам дает замечательный пример этого мирового явления, и из точных подсчетов мы видим, что не только во времена своего нагретого состояния, но даже и сейчас Луна не может удержать на своей поверхности водород, гелий, пары воды, азот, кислород, аргон и угольную кислоту. Мы можем продолжить нашу смелую мысль и в те времена, когда Луна отделялась¹ от Земли в виде расплавленной массы: она должна была быстро потерять свои газы глубин, и вместе с упомянутыми веществами ее должны были покинуть в мощных взрывах и пары фтора, и бора, и все те летучие вещества, которые составляют все богатство земных гранитов, ее пегматитовых жил и ее самоцветов.

Итак, мы считаем сейчас, что Луна — кусочек преимущественно трех наружных оболочек Земли, лишенный всякой атмосферы, застывший не в кристаллические граниты, а в аморфные стекла, со взрывами, лишившийся всех летучих компонентов.

Приведем для понимания химии планет табл. 5.

Химически планеты сходны с Землей, поскольку мы можем судить о составе их самых наружных частей: одни из них, как Марс, могут быть более приспособлены по типу атмосферы к развитию растительных организмов, другие, как Юпитер, должны особенно подходить к условиям развития гидросферы.

Распределение удельных весов всех планет как будто бы показывает нам, что чем ближе планета к Солнцу, тем удельный вес ее больше, так как она содержит при этом большее количество тяжелых элементов, в частности железа; наоборот, Сатурн, Уран и Нептун должны состоять из наиболее легких элементов, с высоким содержанием водорода и гелия.

Совершенно иную картину нам рисует еще очень мало изученная химия комет.

Наши познания в этой области довольно ограничены. Эти загадочные тела ничтожных масс по сравнению с Землей, с ничтожной плотностью, подчиняются еще неведомым законам рассеянной материи. Повидимому, световое давление излучений Солнца вызывает в них образование разреженных хвостов, направленных от нашего светила; повидимому, легкие

¹ По современным представлениям Луна образовалась самостоятельно.— *Ред.*

группы молекул и частицы различных газов, сообразно с их плотностью и величиной, образуют эти хвосты.

В голове комет, кроме неизвестного элемента, мы знаем линии углерода, циана, азота и пары натрия, железа и никеля; под сомнением остаются водород и магний. В хвостах почти исключительно — окись углерода и циан.

Однако спектр комет гораздо сложнее этой простой схемы и притом различен для различных тел.

Что мы можем вывести из этих немногих данных? Можем ли мы говорить об их сходстве с элементами нашей планеты, можем ли мы говорить о связи падающих на Землю метеоритов с кометами, на что указывает ряд астрономических явлений?

Наши сведения слишком ничтожны, слишком неясна также та лаборатория, в которой свечение может быть вызвано излучениями Солнца в сильно разреженной среде, где сила светового давления вызывает рассеяние частиц, достигающее разрежения наших гейслеровых трубок, где более легкие атомы и молекулы, не задержанные силами тяготения, улетают в мировое пространство.

Менее тяжелые элементы преобладают в спектральных линиях комет, металлоиды сочетаются с немногими металлами; но не есть ли это чисто кажущееся явление, в котором, подобно опытам Фоулера, линии более тяжелых металлов, как железо, никель или хром, оказываются скрытыми свечениями летучих газов?

Переходя к туманностям, мы входим в область исключительно сложную и мало изученную.

Чем больше развивается изучение астрофизиками туманностей, тем сложнее оказываются их химический состав и строение: неправильные, кольцообразные, планетарные и туманные звезды — вот те разновидности этих космических тел, эволюция которых, очевидно, приводит к ряду постепенных переходов к настоящим звездам.

В одних, неправильных и планетарных, мы видим газовые скопления со сверкающими линиями водорода, гелия и, повидимому, углерода и азота, а также кислорода; в спиральных, — а их число огромно и едва ли не превышает 1 млн., — мы видим твердые раскаленные частицы — то метеориты, или планетизимали, из которых Чемберлен и Мультион строили все мироздание, или же сильно сгущенные газы; часть этих спектров спиральных туманностей говорит нам о тех же элементах, что наблюдаются и на Солнце; но на всех сверкают линии небулия, этого таинственного газа мироздания, в котором Вендт и Ландауер (1920 г.) хотели видеть особый вид водорода H_3 , но который только сейчас разгадан в исследовании Боуэна — это сильно перегретые (сильно ионизированные) частицы кислорода¹.

Что же! И здесь ничего существенно нового — обычные элементы Земли: кислород, водород, гелий, азот, углерод и обычные металлы: магний, железо. Замечательные данные Милликена о зарождении гелия, азота, кислорода, магния, кремния и железа в сильно проникающем излучении подтверждают эту картину.

Гораздо грандиознее раскрывается перед нами химия звезд, а среди них нашего Солнца.

Химия Солнца вырисовывается на фоне многочисленных и весьма детальных астрофизических исследований, и потому о Солнце мы имеем весьма полные и интересные сведения. Яркость и количество линий отдельных элементов служили, вместе с тем, показанием распространенности отдель-

¹ Современная наука отрицает существование небулия. — *Ред.*

Физико-химические

	Меркурий	Венера	Земля
Масса ¹	0,06	0,8	1,0
Удельный вес	6,2	4,4	5,52
Сила тяжести ¹	0,4	0,9	1,00
Атмосфера	Почти нет	Атм.	Атм.
Нагреваемость	Сильная	Сильная	Средняя
Химические элементы атмосферы	—	Немного N, CO ₂	H, He, N, O, CO ₂
Возможность потери газов ²	H, He, H ₂ O, O, N	H, He подобно Земле	H, (He) частично

¹ По сравнению с Землей, принятой за 1.

² H — водород, He — гелий, O — кислород,
N — азот, H₂O — пары воды, CO₂ — углекислота.

ных элементов, и только последние работы внесли серьезный корректив в эти данные. Особый интерес представляет связь элементов с определенными глубинными зонами Солнца, что позволяет провести некоторую аналогию с геохимическими зонами Земли.

Не разбирая во всех деталях всех элементов, найденных на Солнце, мы дадим лишь следующую схему распределения их по важности и распространенности:

По Вашингтону (1925 г.) — кальций, железо, водород, натрий, никель, магний, кобальт, кремний, алюминий, титан, хром и т. д.

По Расселу (1926 г.) — железо, кальций, магний, никель, водород, титан, натрий, алюминий, кремний, хром, стронций.

Если мы попытаемся связать элементы Солнца с определенными его зонами, то получим очень интересную картину, приобретающую настоящий смысл лишь в свете новых идей Граммона и Саха, так как мы сейчас знаем, что температура поверхностных оболочек Солнца (фотосферы) около 5000—6000° С, а температура пятен почти на 2000° ниже. С этими температурами только и приходится считаться при анализе той физико-химической среды, которая дает спектры, ибо остальные, более глубокие зоны, вероятно с весьма высокими температурами, до 1 млн. градусов, остаются нам неизвестными.

Приведенные выше данные весьма важны для нас при их сравнении с таблицей распространения элементов в земной коре и в Земле. В общем валовой состав земной и солнечной оболочек весьма сходен; бросается в глаза преобладание обычных элементов пород, начиная с гранитов и кончая перидотитами, причем налицо и характерные спутники и тех и других:

Таблица 5

свойства планет

(Луна)	Марс	Астероиды	Юпитер	Сатурн	Уран	Нептун
(0,01)	0,1	—	318	95,2	14,5	17,2
(3,34)	3,9	?	1,5	0,7	1,2 (1,54)	1,1 (1,55)
(0,16)	0,37	Макс. 0,045	2,5	1,06	0,9	0,9
Нет	Мало	Нет	Значительная	Твердое кольцо	Атм.	Атм.
Высокая ³	Средняя	?	Слабая	Слабая	Очень слабая	Очень слабая
1—6 H ₂ O	Пыль H ₂ O мало O мало	—	—	H ₂ O	H, He	H, He, H ₂ O
H, He, O, H ₂ O, CO ₂ и т. д.	N, CO ₂ H, He, немного H ₂ O, N, O	Все газы потеряны	Ничего не уходит	Как Земля	Как Земля	Как Земля

³ Сильные и быстрые колебания температуры до + 160°.

для гранитов — цирконий, ниобий, редкие земли, молибден, тантал; для ультраосновных пород — ванадий, хром, кобальт и никель.

В общем Солнце состоит из тех же элементарных тел, из которых состоят Земля и метеориты. Спектральный анализ обнаруживает на Солнце присутствие по преимуществу элементов легких, что вполне совпадает со средним составом и земной коры и метеоритов.

Приблизительно к таким же выводам придем мы, когда перейдем к необычайно большой и важной группе космических тел — к тем 3—4 млрд. звездных миров, которые составляют основу нашего мироздания, в которых накоплена главная часть мировой материи.

За последние десятилетия изучение звезд сделало огромные успехи; оно выросло в целую самостоятельную область астрономии, а исследования астрофизики дали возможность судить о величинах, расстояниях, массах, скоростях, температурах и внутренней природе звездных миров. Сейчас, в особенности после работ индийского ученого Саха, термодинамическая обстановка поверхности звезд оказалась выясненной, и это дало возможность критически пересмотреть старые вопросы о химических элементах звезд и подвергнуть совершенно новому анализу длинные списки линий элементов, полученные в результате астрофизических исследований.

На основании этих исследований мы должны прийти к нижеследующим выводам о химическом составе звезд по сравнению с составом Земли.

1. Несмотря на огромное количество и разнообразие типов звезд, возможен химический анализ их поверхностных зон на основе знания их величины, массы, яркости, температуры поверхностных слоев, удельного веса и скоростей движения.

2. Казавшиеся раньше резкими различия в химическом составе поверхности звезд ныне объясняются различием физической обстановки поверхностных зон звезд, в общем представляющих газовые скопления.

3. Нет данных, которые бы говорили против признания химического состава звезд более или менее одинаковым.

4. Химические элементы звезд в общем тождественны с элементами Земли и метеоритов, хотя не исключено некоторое увеличение количества водорода и гелия в некоторых звездных типах.

5. Хотя мы не имеем еще достаточно полной картины ионизации элементов, связанной с температурой, давлением и атомным весом, тем не менее, надумать, что в звездах преобладают элементы не тяжелые, с атомными весами не выше 60.

6. Можно думать, что в составе звезд преобладают элементы: водород, гелий, кремний, натрий, магний, алюминий, углерод, кальций, железо, цинк, титан, марганец, хром, калий, никель, в меньшей степени — кислород, азот, стронций, ванадий и кобальт, т. е., за исключением (из главных) водорода, марганца, натрия и алюминия, почти исключительно элементы, кратные 4, и, вероятно, построенные из групп гелия.

7. Вышеприведенный список элементов почти тождествен с элементами наиболее глубоких зон земной коры и особенно с элементами метеоритов.

ВИ. ОБЩИЕ ЗАКОНЫ ХИМИИ МИРОЗДАНИЯ

Мы подходим к некоторым выводам.

Сравнение состава Земли с другими телами привело нас к весьма сходным данным. Как ни таинственны еще законы распределения вещества

Таблица 6

Место, занимаемое отдельными элементами по их распространенности в мироздании

№ п/п		Земная кора	Вся Земля (по Ва- шингтону)	Вся Земля (по Фар- рингтону)	Метеори- ты (по Ферсману)	Солнце (по Рас- селу)	Звезды (по Пайн)
1	Железо	4	1	1	1	1	7
2	Кислород	1	2	2	2		
3	Магний	8	4	5	4	2	3
4	Кремний	2	3	4	3	9	1
5	Никель	25	5	3	5	4	
6	Кальций	5	6	7	8	3	6
7	Алюминий	3	7	9	7	8	4
8	Натрий	6	9	10	9	7	2
9	Сера	14	8	6	6		
10	Титан	10	16	15	15	6	9
11	Углерод	11	15	14	15		5
12	Хром	23	11	12	11	10	11
13	Марганец	15	14	15	10		10

в мировом пространстве, все же во всей работе нам пришлось говорить все об одних и тех же элементарных телах.

Мы попытались в табл. 6 сопоставить состав отдельных космических тел: в графу каждого элемента мы условно поставили цифру, отвечающую порядковому числу, занимаемому данным элементом в каждом типе космических тел. Сложив для каждого данного элемента эти числа, мы получим некоторую сумму: чем меньше эта сумма, тем более важное положение в мироздании занимает данный элемент.

Мы прибегли к довольно искусственному методу и получили ряд элементов в последовательности их значения. Не забудем только, что мы при этом сравнивали много несравнимого, могли учесть состав лишь наружных частей звезд и Солнца и поэтому, повидимому, несколько переоценили в мироздании те оболочки, которые носят более поверхностный характер. По самой методике исследования мы не могли в достаточной мере учесть газы, несомненно имеющие в мироздании большое значение: водород, гелий, кислород и азот.

Поэтому ряд химических элементов мироздания в наиболее вероятной последовательности их важности и роли мы могли бы написать так:

1 водород — H	2 гелий — He	3 железо — Fe
4 кислород — O	5 магний — Mg	6 никель — Ni
7 кремний — Si	8 кальций — Ca	9 алюминий — Al
10 натрий — Na	11 сера — S	12 титан — Ti
13 марганец — Mn	14 углерод — C	15 хром — Cr

Таков последовательный список основных элементов Земли и мироздания.

Интересно с этим списком сравнить последовательность веществ, используемых человеком, расположив элементы в порядке убывания годовой добычи:

1 углерод — C	2 железо — Fe	3 кремний — Si
4 сера — S	5 кальций — Ca	6 хлор — Cl
7 натрий — Na	8 калий — K	9 фосфор — P
10 медь — Cu	11 свинец — Pb	12 цинк — Zn
13 марганец — Mn	14 азот — N	15 магний — Mg
16 олово — Sn	17 алюминий — Al	18 серебро — Ag
	19 золото — Au	

Мы видим, что по существу различие невелико, и человек по преимуществу использует самые основные элементы мироздания и к ним прибавляет лишь медь, свинец, цинк, олово, серебро и золото.

Попытаемся сейчас немного вникнуть в природу наших 16 элементов и сопоставим их в табл. 7.

Таблица 7

	H	He	Fe	O	Mg	Si	Ni	Ca	Al	Na	S	Ti	Mn	C	Cr	N
Атомный вес	1	4	56	16	24	28	58	40	27	23	32	48	55	12	52	14
Порядковый номер элемента . .	1	2	26	8	12	14	28	20	13	11	16	22	25	6	24	7

Прежде всего рассмотрим в наши цифры: в обеих строках преобладают числа, кратные 4, в строке атомного веса преобладают элементы, делящиеся на 4 (они напечатаны жирно). Нет ни одной цифры атомного веса выше 58 и порядковых номеров выше 28. Мы знаем теперь и смысл таких чисел: в мироздании и на Земле преобладают элементы первых рядов менделеевской системы, более легких четных номеров, с атомными весами, делящимися на 4. С точки зрения строения атомов, это элементы наиболее устойчивой постройки, наиболее симметрично сложенные и поэтому наиболее долговечные системы.

Астон в своих работах 1927 и 1928 гг. показал, что в менделеевской таблице прочность ядер атома увеличивается к железу, чтобы далее снова уменьшиться, и что в каждой соседней паре элементов четный прочнее нечетного.

Сейчас для нас совершенно несомненно, что цифра абсолютного количества элемента в мироздании есть результат прочности постройки его ядра, тогда как его дальнейшие судьбы связаны с характером его внешних электронов.

Нетрудно видеть большое общее космогоническое значение этого положения, выявление которого достигнуто лишь в последние два года.

VIII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. ХИМИЧЕСКИЕ ЗАКОНЫ ИСТОРИИ ЗЕМЛИ

Мы можем сейчас подвести некоторые итоги и среди различных намеченных нами путей выбрать тот, который наиболее отвечает фактам.

Я уже указывал выше, что мы еще не доросли до полного познания химии Земли, мы только нащупываем путь и ищем выводы.

Мы видим сейчас, что доступный нашему изучению космос составлен из одних и тех же элементарных построек — планетарных электрических систем, которые мы называем атомами и разнообразие коих и составляет нашу периодическую систему Менделеева. Мы вправе думать, что подавляющая часть космоса составлена именно из этих атомов. Силы мирового тяготения, светового давления и молекулярных движений являются в первую очередь теми притягивающими и отталкивающими силами, которые распределяют или перераспределяют элементы в мировых пространствах. В общем мы можем думать, что элементы распределены в мироздании более или менее равномерно. Количество атомов различных элементарных тел различно: мы вправе думать, что и тяжелых атомов, начиная с 28 номера, и самых легких, до 8—9, вообще в мироздании меньше, что мы имеем определенное космическое явление — преобладание элементов средней части менделеевской таблицы — от 11 до 28 номера, может быть, еще водорода и гелия.

В первом приближении мы были склонны считать, что элементы, наполняющие собой мировое пространство, сохраняют в целости свои положительные ядра. Однако современные идеи заставляют нас думать, что элементы космоса испытывают превращения, подчиняясь строго определенным мировым законам. Создание элементов и их радиоактивный распад должны рассматриваться как два противоположных процесса, взаимно уравновешивающих друг друга согласно законам физико-химического равновесия. Преобладание определенных элементов есть лишь проявление статистической закономерности: как бы мы ни представляли себе эволюцию атома и соотношение рядов распада и созидания, — преобладание в определенный момент определенных элементарных построек есть результат

того же статистического закона, который регулирует, например, распад радиоактивного вещества; в смеси же продуктов распада обнаруживается ничтожное количество одних членов и огромное преобладание других.

Как же рисуется нам химическая история Земли в свете современных геохимических и космических идей Эддингтона, Саха, Рассела, Гольдшмидта, Вашингтона и других?

Нам и здесь хочется оставаться в области фактов и наблюдений, и поэтому мы не решимся на постановку нашей задачи в целом.

Для понимания Земли и ее химии мы не можем очень далеко уходить от нашего современного момента. В ее жизни мы различаем как бы три эпохи: молодой возраст — звездный, в котором ее жизнь была частью жизни Солнца в условиях своеобразных звездных процессов миллионных температур, разреженных газов и явлений излучения. Взрослый возраст ее самостоятельной жизни, но все еще космической, заключался в поисках новых форм механического равновесия и образования оболочек и ядра — это была эпоха, которую мы могли бы назвать планетарной. Наконец, наступила ее старость — эпоха геологического развития, единственно ясная для нас и сравнительно краткая — продолжительностью в 1—2 млрд. лет.

Так или иначе, но сейчас Земля есть физико-химическая система, которая пришла к современному состоянию путем длительного звездного, планетарного и геологического процессов. Высоко нагретая система, согласно законам теоретической химии, или сразу, если она была когда-либо вся в нагретом состоянии, или по частям охлаждаясь, делилась на основные фазы — оболочки, газы, кору кремневых соединений, сульфидное кольцо и металл. Кислорода, кремнезема, серы, фосфора, углерода было недостаточно, чтобы окислить все металлические атомы или превратить их в сульфиды и силикаты. Образовывались лишь те окислы и сульфиды, кои, согласно законам химии, выделяли при этом больше тепла.

Эти земные явления шли не в условиях звездных температур — десятков миллионов градусов — с их упрощенными, как бы раздетыми атомами, лишенными наружных электронов, а в сравнительно холодной системе, где атомы потеряли свое космическое однообразие и действие наружных электронов вызывало к жизни ряд сложнейших геохимических процессов.

И чем дальше шел процесс развития Земли и она постепенно старела, тем более усложнялись мир и построение атома. Как сначала из одного ядра родилась целая планетарная система атома, так в условиях земной поверхности родился из группы атомов кристалл как новая закономерная постройка, основанная тоже на идее равновесия системы. Мир кристаллических построек усложнил строение Земли, но усложнение пошло еще дальше, и из сложнейшего комплекса атомов родилась наиболее сложная форма природы — живая клетка.

Следующий этап в познании вселенной лежит в познании ее химических процессов, в постижении широкого мирового океана химических реакций и химического распада сложного атома вещества; и прошлые и будущие судьбы и самой Земли и всего мироздания скрыты пока в законах химии вселенной, в тех законах строения материи, где равнозначны энергия и вещество, где единство пространства, времени и массы позволяет подойти по-новому к старым, казалось, давно решенным и ясным вопросам.

Мы подошли уже к той границе, где начинается новое: старые рамки трех химических наук — собственно химии, минералогии и астрофизики — не могут вместить нового содержания и новых общих проблем: нарождается **к о с м и ч е с к а я х и м и я**, маленькие ее отделы берут на себя минералогия и молодая геохимия в ее познании истории и роли элементов в земной коре.

Так, тремя отдельными реками сливается современная химическая мысль в русло **к о с м о х и м и и**, чтобы вместе выковать единую мысль, постигающую сущность процессов всего мироздания и вековечное течение мировых законов атома.

Таковы лишь отдельные штрихи новых идей будущего; пока из старой скучной минералогии рождается новая наука — **х и м и я З е м л и**; вместе с геофизикой она призвана решать важнейшие проблемы Земли как планеты. Но новые течения научной мысли обычно двигаются вперед не силой самих идей, а силой фактов, которые их обосновывают, силой экспериментов, на которых они рождаются, силой творческого завоевания реального мира.

На границе научных течений, в сопредельных линиях, где смыкаются и размежевываются отдельные дисциплины, наука в последние годы сделала самые большие достижения: между физикой и кристаллографией родилась новая концепция реального мира, между старой астрономией и физикой рождаются сейчас величайшие завоевания современной науки о звездах, о рождении и смерти вещества, между геологией и физикой появляется прикладная геофизика с ее проблемами. Между химией и минералогией должно вырасти здание новой **х и м и и З е м л и и х и м и и в с е л е н н о й**.

Ленинград
Июль 1928 года

О ЗАКОНАХ ГЕОХИМИИ

—

ЗАКОНЫ ЭВОЛЮЦИИ В ХИМИИ ЗЕМНОЙ КОРЫ¹

ВВЕДЕНИЕ

Двадцать лет тому назад знаменитый норвежский геохимик и металлург Фогт сказал крылатое слово: «внедрение идей физической химии в геологические дисциплины даст им ту же живительную силу и смысл, которые дали идеи эволюции биологическим наукам». Действительно, эти слова не только оказались пророческими, но больше того: законы эволюции, выработанные на органической природе, оказались применимыми к процессам минерального мира, и сейчас, после многих лет интенсивных работ по геохимии, петрологии и минералогии, сделалось возможным говорить об эволюции горных пород, о строго закономерном развитии рудных жил, о строго закономерной последовательности, чисто эволюционного характера, процессов застывания пегматитовых жил, т. е. целого ряда явлений, до сих пор остававшихся разобщенными и независимыми.

Мы понимаем под термином эволюция закономерную последовательную связь явлений, вытекающих постепенно из предыдущих и приводящих неизбежно, в строго причинной зависимости согласно законам статистического характера, к новым последующим состояниям более устойчивого при данных условиях и потому более совершенного характера.

Отсюда — всякая сложная физико-химическая система при закономерном изменении одной или нескольких переменных ведет к определенным результатам, и начальное явление эволюционирует, сменяется новым, которое можно предсказать, если известна полностью диаграмма равновесия данной системы.

Дарвин в своем гениальном прозрении построил такую систему для живых существ и, придав большое значение одной координате — борьбе за существование, пренебрегли, вернее, ослабил значение других переменных величин и на этом построил естественную историю развития жизни. Позднее было много попыток прибавить к главной переменной Дарвина еще и другие: влияние взаимной помощи (Крапоткин, Кесслер), географического ландшафта (Берг) и т. д., но все это не меняло основной установки — признания закономерного и непрерывного процесса изменений — эволюции живого вещества. Гениальность Дарвина заключалась именно в том, что он сумел упростить явления природы, отбросить все случайное и нехарактерное, или, выражаясь языком математика, сумел выбрать правильные координаты своих построений для определения смысла явлений природы.

¹ Печатается по тексту, опубликованному в журнале «Природа», 1930, № 3.—
Ред.

Очевидно, что именно такая же задача стояла перед исследователем, если он хотел найти законы развития процессов неорганической природы и в их многообразии и сложности отыскать основные закономерные черты. Эта задача сейчас начинает выясняться, и хотя она еще далеко не разрешена полностью, но все же достигнуты весьма важные результаты, позволяющие в совершенно новом виде рисовать ход природных процессов.

То, что раньше казалось искусственными схемами, сейчас начинает приходить в логическую естественную систему; даже сама классификация минеральных объектов, строившаяся ранее на случайных признаках, физических или химических, сейчас заменяется естественной классификацией, правда не столько самих объектов, сколько явлений, положивших им начало.

Идеи даны; их разработка, однако, еще в будущем.

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ЦИКЛЫ ЗЕМНОЙ КОРЫ

Доступная нашему непосредственному исследованию земная кора есть не что иное, как сложная физико-химическая система, построенная из 90 различных элементов, соединенных между собою в разных количествах, при разных условиях многообразной окружающей обстановки. Казалось бы, и мы долго думали так, что природа тысячами способов использует комбинации этих элементарных тел и что десятки разнообразных геологических, геофизических и геохимических факторов еще более разнообразят картину. Однако, чем более мы углублялись в изучение природных фактов, накапливали их и систематизировали, тем скорее обнаружили, что природные сочетания не так сложны, что в их основе лежат не все 90 элементов, а только два десятка наиболее важных, и из внешних факторов только три: концентрация, температура и давление. Но и этих переменных величин было более чем достаточно, чтобы до чрезвычайности усложнить природную картину. Надо было ее упростить в наших представлениях и дать модель природного процесса.

Мы знаем сейчас, что все многообразие химических процессов земной коры сводится к трем основным геохимическим циклам, которые могут быть определены так:

- 1) Цикл магматический, связанный с остыванием сложной системы расплава.
- 2) Цикл климатический, или цикл земной поверхности.
- 3) Цикл метаморфический (по мере проникания продуктов второго цикла в условия глубин).

Температура и давление являются для нас основными координатами земных систем, изменения в концентрации и сочетании элементов определяют собою основные черты построения диаграмм равновесия. Все остальные факторы мы можем временно оставить без внимания.

Итак, мы упростим наши явления и наметим следующие основные системы.

1. Цикл охлаждения расплавленного очага магмы. Некоторый комплекс элементов, нагретых до общего расплава, испытывает в о в р е м е н и ряд изменений, причем координаты времени и постепенного падения температуры совпадают. Величина давления в начале процесса вообще должна считаться известной, в зависимости от того, где происходит процесс: в глубинах или близко к поверхности. Задача относительно проста и сводится к изучению тех процессов, через которые пройдет расплав M_0 , богатый летучими газами, при охлаждении от 1500—1200 С

ских законов (Н. С. Курнаков, Вант-Гофф), для морских осадков (Кайе, Колле), для почвенного покрова (русская школа почвоведов, Ганс, Берендт, Гарассовиц, Кайзер), для осадочных пород (Самойлов, Лейт и др.).

3. Наконец, третий цикл — метаморфический — исходит из конечных продуктов второго цикла ($M_{a, b, c, d}$) и переводит их в новые комплексы $B_{I, II, III}$ в глубинах Земли, т. е. перегруппировывает их в условиях повышающихся давлений и температуры. Задача упрощается благодаря тому, что процесс идет без воздействия других факторов, кроме давления и температуры, и поэтому он позволил В. М. Гольдшмидту применить физико-химические принципы и в особенности правило фаз Джиббса к разрешению этой задачи. Здесь цикл идет в строго определенном направлении и подлежит точному учету.

Итак, мы имеем три определенных геохимических цикла, в которые укладывается подавляющее число геохимических процессов земной коры.

В каждом из этих циклов процесс заключается в таком перемещении входящих в него веществ, которое имеет целью дать новую систему, более устойчивую при тех новых условиях, к которым цикл ведет. Понижение температуры с 1500° до 0° в первом, приспособление к температурам отдельных широт и к главному деятелю поверхности — воде во втором и увеличение давления с повышением температуры в третьем — таковы основные координаты, на которых строится каждый из этих процессов. И в каждом из них в результате нового равновесия получается новая система, способная сохранять свое состояние, т. е. сопротивляться всем факторам, которые хотят вывести ее из равновесия, уничтожить, растворить, вынести. Система стремится образовать такие соединения, которые будут устойчивы против основных деятелей — воды, кислорода и угольной кислоты воздуха; и эволюция геохимических процессов в нашем понимании есть борьба за существование этих устойчивых тел, за сохранение и их накопление.

Физико-химический ход процесса является поэтому вполне сравнимым с ходом эволюции органической жизни: мы только выражаем его другими понятиями и словами, но внутренний смысл их один и тот же.

Я рассмотрю в настоящей статье только первый цикл; к его геохимическому пониманию мы подошли лишь в последние годы, а между тем, именно он определяет основной ход эволюции земной коры. Геохимии второго цикла я посвящаю другую статью; третья — в достаточной мере выяснена Гольдшмидтом в Осло.

Но раньше чем перейти к сводному изложению эволюции магматического цикла, я хочу дать краткую картину одного района — как пример природных взаимоотношений. Я считаю это совершенно необходимым, так как во всех наших рассуждениях наблюдения в природе являются тем фактом, который должен лежать в основе всех наших построений.

ИЗ НАБЛЮДЕНИЙ В ПРИРОДЕ

Вместе с Д. И. Щербаковым летом 1929 г. мы посетили ряд месторождений в Забайкалье. Мы знаем эту область по исключительному богатству различных минеральных образований, скоплений металлов и драгоценных камней, а большие сводки Реутовского, Озерского, Стальнова, намекая месторождения полезных ископаемых, покрывают карту громадным количеством точек и различных значков. Пестрая картина сложнейшего минералообразования ложится на сложную картину геологии страны, еще недавно сведенную В. А. Обручевым в общее построение.

Отдельные месторождения изучаются независимо и детально: драгоценные камни, золотые жилы, серебро-свинцовые, цинковые и другие руды.

Ведется обработка результатов крупных исследовательских и разведочных работ. Накапливается огромный фактический материал, и лишь устаревшие сводки де Лоне и очень краткие схемы В.А. Обручева пытаются свести эти наблюдения в единую картину минерогенеза.

Когда мы осматриваем вольфрамовые месторождения, мы видим ясные системы жил, видим, как вольфрамит в виде блестящих черных кристаллов тянется почти от стенок жил внутрь серого кварца, видим, как эти жилы отделяются от породы тоненькой каемочкой слюды и как местами за вольфрамитом следуют массы сернистых руд, «съедающих» вольфрамовую руду. Мы со вниманием следим за кварцем и видим, как изменчивы его свойства: то это дымчатые кварцы, которые иногда наблюдаются еще в начальных стадиях образования жил, то кварцы белые, молочные; мы прекрасно видим, что они образовались п о с л е вольфрамита, напоминая кварцы золотых месторождений. Отдельные минералы начинают перед нашими глазами входить в определенную систему — одни раньше, другие позже: перед нами как бы рисуется кусочек длинной ленты событий, отрывок, обрывающийся в начале и в конце, и мы ищем их продолжения в обе стороны. Начало процессов мы находим в мощных пегматитах: здесь корни общих проявлений, первые отдаленные, начальные стадии застывания гранита. Соединения олова, тантала и лития вырисовываются перед нами в их ранней истории; кварцы — дымчатые, темные и светлые; только кое-где п о з д н е е их сменяет серый и далее блестящий на солнце белый сплошной кварц. В других местах мы видим какие-то другие страницы одной и той же книги — страницы, начинающие историю охлаждения гранитной магмы. Гранит весь испещрен и прорезан разнообразными жилами: они выделились из него при его застывании, пересекли последними горячими выделениями как самый гранит, так и окружающие сланцы и известняки, положили начало пегматитовым скоплениям и выделениям олова и вольфрама.

В районах, где много лет добывалось золото, — беловато-серые кварцы с пиритом и мышьяковым колчеданом, кое-где с ними скопления кальцита; они снова нам бросаются в глаза, и их страницы ложатся последовательно в общую серию наблюдений.

Нас привлекают более поздние страницы — золото уходит в сложные жилы со свинцовыми, цинковыми и медными рудами, халцедоновый кварц определенно говорит о том времени, которое мы называем концом процесса; а еще далее с настоящим натечным халцедоном и баритом мы видим жилы киновари.

Гранитные магмы для нас в этом отрезке времени и пространства — основные линии системы, но мы видим, что и они не первоисточник: они сами, в свою очередь, лишь какие-то закономерные следствия других явлений, происходивших в этой области в связи с общей геологической историей Забайкалья.

Химические явления этой замечательной области в своей истории связываются закономерной последовательностью законов физической химии, и только сейчас мы начинаем их понимать не как отдельные независимые части, а как звенья общего, единого закономерного процесса — охлаждения в глубинах расплавленного очага.

ЭВОЛЮЦИЯ МАГМАТИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

Только что нарисованная картина представляет комплекс тех результатов, которые получились при охлаждении магматического гранитного очага. Наша задача — дать объяснение этому процессу и подвести под изложение физико-химическую основу.

Для этого рассмотрим сначала чисто теоретически судьбу охлаждения сложного силикатного расплава, состоящего как из очень легколетучих компонентов, так и из очень труднолетучих. Задача эта экспериментально и теоретически разрешена Ниггли и Фогтом и дает нам следующий ход явлений, схематически изображенный и проработанный в приводимых диаграммах (рис. 1 и 2).

Расплав охлаждается, и из него, по мере постепенного понижения температуры, выделяются, с одной стороны, легколетучие вещества, с другой, начинают последовательно выкристаллизовываться отдельные составные части. Однако еще до начала этого процесса сам расплав в огненно-жидком виде мог разделиться на несколько отдельных расплавов, несовместимых друг с другом; этот процесс отмечен мною на схематической диаграмме (рис. 1) в первом, еще чисто магматическом этапе процесса. Для нас, однако, непосредственный интерес и значение представляет второй этап — магматического расплава, в котором, как выше указано, одновременно существуют все три фазы вещества: жидкая (огненно-жидкая), твердая (кристаллическая) и газообразная (рис. 1). В зависимости от давления или вязкости породы, все эти фазы могут оставаться в одном месте, и наш расплав в этом случае застывает в типичную горную породу. Однако обычно происходит пространственное разделение этих фаз: наверх, в окружающие породы, будут подниматься летучие газы и пары, они будут как бы вылавливать из расплава некоторые рассеянные элементы, например, тяжелые металлы, вольфрам, олово. По справедливому анализу Фогта, сначала будут выделяться наверх преимущественно сульфиды (см. левые строки на рис. 1), в конце — фтористые погony, богатые кремнеземом, оловом, вольфрамом. Эти эманации, в зависимости от упругости газов и величины давления, будут в кровле гранитного массива делиться путем хорошо нам известной в лаборатории фракционированной перегонки и будут давать целую серию погонов разного состава, т. е. то, что мы называем п н е м а т о л и т а м и. Одновременно с этим из расплава будет постепенно кристаллизоваться твердое вещество; первые выделившиеся частицы — то, что мы на диаграмме (рис. 1) называем протокристаллизацией, — могут избрать три пути: первый путь — благодаря своей тяжести они потонут в расплаве, опустятся на глубину и там снова растворятся в более горячих частях расплава, обогатив их в п р о т о - н а п р а в л е н и и; второй путь — они останутся рассеянными в самом расплаве и дадут при его охлаждении равномернозернистую породу типа нормального гранита; наконец, третий путь — выделившиеся вещества или соберутся в отдельные скопления, которые мы называем шпирами, или, согласно закону Соре, будут мигрировать к более холодным границам массива и накапливаться на контактах.

Наконец, огненно-жидкий расплав, освобождаясь от летучих и ранее выкристаллизовавшихся компонентов, постепенно охлаждается и доходит до состояния M_{IV} на рис. 1. Здесь начинается в его судьбе нечто совершенно новое: составы газовой и остаточной жидкой фазы сближаются и делаются одинаковыми, — наступает новый этап, когда в равновесии остаются только две фазы: твердая и флюидная — газовой-жидкая.

Это и есть начало тех новых процессов, которые мы называем пегматитовыми и которые в общем протекают в интервале между 800 и 400° С. Явления кристаллизации из этого флюидного состояния необычайно интересны, но и сложны; расплав флюидный пропитан летучими компонентами; при некоторых условиях понижение температуры (а! не повышение) может приводить его к кипению; в нем накапливаются все остатки, все мельчайшие примеси магмы, — это последние выжимки самой магмы.

И в то время как пегматит охлаждается до 400° , образуя мощные жилы, богатые полевым шпатом и соединениями элементов Be, TR, Nb, Ta и Li, охлаждаются и многочисленные пневматолиты (А, В, С — рис. 1 и 2), образуя одновременно с пегматитами кварцевые жилы с оловом, вольфрамом и сернистыми рудами, цинка, меди и железа.

Пегматиты и кварцевые жилы пневматолитов почти неизбежно сопутствуют друг другу; они идут параллельно одни другим, оказываясь явлениями сопряженными, связанными единством происхождения и общими корнями в магме. Старые идеи Бека и особенно Штудера о связи пегматитов с кварцевыми жилами воскресают, но в новом виде.

Наконец, при дальнейшем охлаждении флюидная масса достигает температуры критического состояния воды, т. е. вместо двух сосуществующих фаз мы снова возвращаемся к трем, снова начинают выделяться пары летучих соединений, особенно воды, снова получаются растворы, но уже водные, снова последовательно начинается выделение из остатков пегматитов и пневматолитов. Но в первых почти больше ничего в растворе не осталось, — пары воды могут лишь начать перерабатывать старые минералы и действовать на стенки трещин; практически эволюция пегматитов на этих температурах уже закончена. Иначе протекает судьба пневматолитов: именно здесь начинается их кристаллизация, и последовательно, шаг за шагом, идет выделение металлов из горячих водных растворов — гидролитов.

Рис. 2 дает нам полную картину последовательности отложений из всех типов ветвей охлаждающейся магмы. Эта диаграмма обобщает наблюдаемые факты и объясняет те характерные взаимоотношения элементов, которые мы установили ранее.

Но, чтобы еще резче выделить ход нашего процесса, я даю ниже рис. 3, в котором особым методом мною нанесены основные черты эволюции геохимических процессов в пегматитах.

Как видно, горизонтальная координата отвечает одновременно и времени и падению температуры (слева направо). Как нам показывают наблюдения в природе, это же направление дает нам пространственное взаимоотношение отложений, так как в схеме более правые процессы налегают на более левые, или перекрывают их, или замещая их.

В вертикальном направлении перечисляются минералы или соответственные элементы; для первых — в последовательности начала их отложения, для вторых — в порядке повышения атомных весов. Время (температурный интервал и место в жиле) намечается линией или линзой, чтобы грубо качественно наметить время максимума отложения.

Этот метод имеет свою длинную историю, зародившись более 50 лет тому назад у французских петрографов и получив особое развитие у минералогов и геохимиков последнего времени (Ниггли, Шнейдерхён, Кёнигсбергер, Ферсман и др.). До самого последнего времени к нему относились несколько скептически, не понимая удобства в его применении к сложным природным процессам. В печатаемой мной работе о гранитных пегматитах я попытаюсь применить этот метод к различным минеральным образованиям, при условии единого масштаба; этот масштаб грубо намечается при 400 и 600° двумя характерными точками, которые можно наблюдать на природных объектах: первая — отвечающая критической точке воды, вторая — переходу β -кварца в α -кварц.

Конечно, каждое явление, обозначаемое в диаграмме, не занимает в ней очень строго определенного места, но под влиянием сложных и изменчивых условий может перемещаться влево или вправо; так, повышение содержания данного вещества перемещает точку влево, увеличение летучих компонентов и давления — вправо.

Но, в общем, построенные мною диаграммы с огромною очевидностью устанавливают закономерность хода процессов, их постоянство и определенное направление. Не забудем, что наши диаграммы намечают

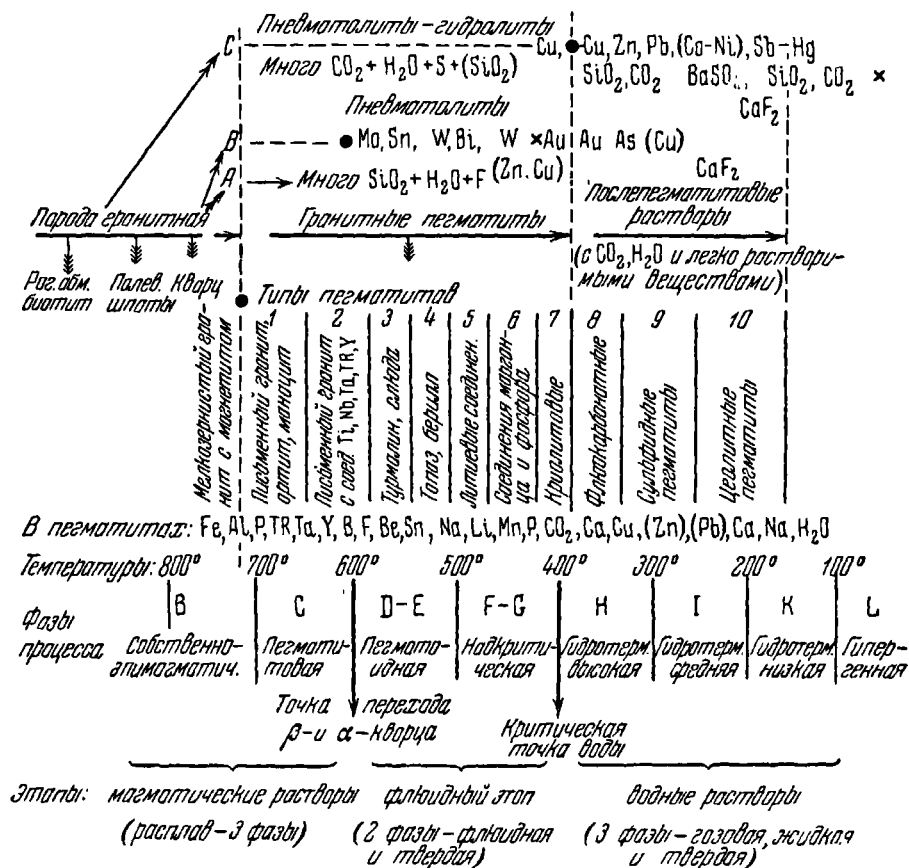


Рис. 2. Естественная история минералов гранитной магмы.

Схема намечает последовательность минеральных образований по мере охлаждения расплавленного очага, т. е. во времени; процесс идет слева направо; ● — начало образования твердой фазы, т. е. кристаллизация; × — наиболее обычный конец кристаллизации.

изменения в составе осадков, — им в порядке дополнения отвечает постепенное изменение растворов, эволюция которых и есть основной процесс.

Я не подвергаю более детальному объяснению характер диаграмм — это завело бы меня слишком далеко, общие же их черты ясны сами собою.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ход геохимических процессов напоминает нам законы эволюции в живой природе; большое количество переменных факторов не позволяет предвидеть линии изменения, но общее их течение ясно и определено: те же эволюционные типы корней, стволов и ветвей, тот же параллелизм развития, те же скрещивающиеся пути и иногда слепо заканчивающиеся ходы

развития. Не простая геометрическая диаграмма определяет пути кристаллизации, а сложная физическая система, неоднородная во времени и в пространстве, геохимически запутанная в своих сочетаниях. Не только горные породы в своей последовательности и составе закономерно отражают законы равновесия расплавленных масс: и все остальные типы минеральных ассоциаций, если не количественно, то качественно, гораздо

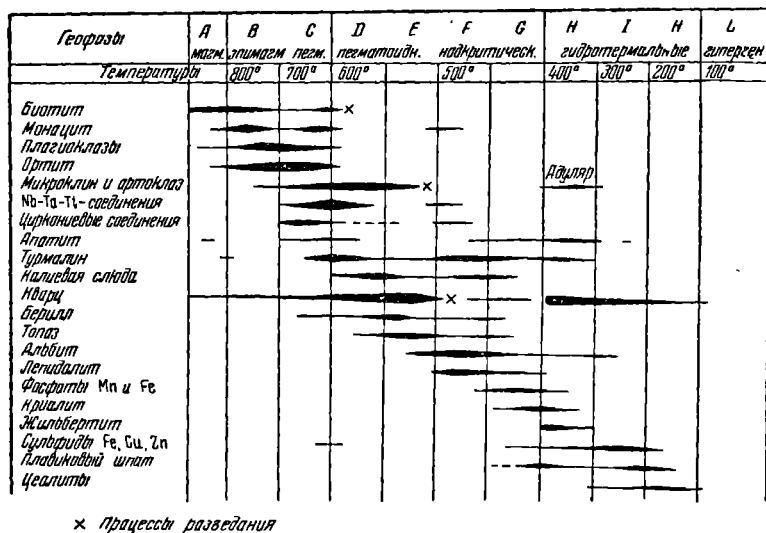


Рис. 3. Схема кристаллизации остаточного гранитного расплава.

более закономерны, чем мы это раньше думали. И если в породах, как говорит Боуэн, есть такие непримиримые соперники, как кварц и нефелин, то столь же определенно выражены геохимические противоречия между вольфрамом и ртутью¹, между бериллием и сурьмой, равно как геохимически близки друг к другу вольфрам и олово или бериллий и литий.

При этом анализе, постепенно разбираясь в природных фактах, мы обнаруживаем одинаково закономерное положение во времени и в пространстве как самих элементов, так и отдельных их сочетаний. В сущности, в этом лежит основная причина того, что мы знаем в природе сравнительно мало минеральных тел, менее 1500 сочетаний; а между тем, если бы природа не выбрала строго определенных реакций, то мы из 90 химических элементов должны были бы получить, не говоря о различных количественных соотношениях, совершенно иное число, определяемое 28 знаками, т. е. цифрой, которая сделала бы практически невозможным какой-либо минералогический анализ. И наоборот: мы знаем, что как только где-либо будет обнаружено наложение двух совершенно разнородных процессов, не вытекающих нормально из эволюционного хода развития минеральных сочетаний природы, сейчас же появляется большое количество новых минеральных видов (например, месторождения Лонгбан в Швеции, где количество новых минеральных видов измеряется несколькими сотнями).

¹ В настоящее время известен тип ферберита (FeWO_4)-киноварных эпитеpmальных месторождений. — Ред.

Только сейчас мы подходим к настоящей «естественной истории минеральных тел», т. е. к той «*histoire naturelle*», о которой мечтал в своих писаниях Бюффон 150 лет тому назад и которую математически ясно доказал для горных пород Боуэн в 1928 г.

Перед нами раскрываются явления очень большого значения; они требуют еще громадной систематической работы, требуют накопления фактического материала, но это накопление будет закономерно нанизывать отдельные звенья, увязывая их в общие цепи, а эти цепи сплетать и укладывать в общие русла общих идей.

Мы ждем от этой работы больших научных и практических достижений.

Ташкент

Январь 1930 года

ПЕРИОДИЧЕСКИЙ ЗАКОН МЕНДЕЛЕЕВА В СВЕТЕ СОВРЕМЕННОЙ НАУКИ¹

«Как одно из недавних, но выдержавших лабораторную проверку, научных обобщений, как инструмент мысли, еще не подвергшийся до сих пор никаким видоизменениям, периодический закон ждет не только новых приложений, но и усовершенствований, подробной разработки и свежих сил».

(Д. И. Менделеев.
Избр. соч. Т. II, стр. 366, 1934).

Несколько слов по поводу моего сегодняшнего доклада. Я, старый натуралист и геохимик-минералог, считаю за особую честь иметь возможность выступить сегодня, в знаменательные дни празднования столетия со дня рождения Фридриха Энгельса, в собрании отделения истории и философии нашей Академии.

В своих известных «Письмах об изучении природы» Герцен писал: «Совершенная отрезанность естествоведения и философии часто заставляет целые годы трудиться для того, чтобы приблизительно открыть закон, давно известный в другой сфере, разрешить сомнение, давно разрешенное: труд и усилие тратятся для того, чтобы во второй раз открыть Америку, — для того, чтобы проложить тропинку там, где есть железная дорога. Вот плод раздробления наук, этого феодализма, окапывающего каждую полосу земли валом и чеканящего свою монету за ним»².

Эти слова Герцена придают мне смелость выступить в собрании историков и философов с анализом периодического закона Менделеева с точки зрения современной науки и выявить его научную сущность в свете бессмертных идей Маркса—Энгельса—Ленина—Сталина.

ВВЕДЕНИЕ

В своей гениальной «Диалектике природы» Фридрих Энгельс сказал крылатые слова:

«Менделеев, применяя бессознательно гегелевский закон о переходе количества в качество, совершил научный подвиг, который смело можно поставить рядом с открытием Леверрье, вычислившего орбиту еще неизвестной планеты, Нептуна»³.

Этому научному подвигу, одному из величайших во всей истории науки, и посвящен мой анализ. Величие его — в небывалой простоте, которую можно сравнить

¹ Доклад на собрании отделения истории и философии АН СССР 29 ноября 1940 года. Печатается по тексту, опубликованному в журнале «Под знаменем марксизма», 1941, № 1.—Ред.

² А. И. Герцен. Избранные философские сочинения, стр. 81. Соцэкгиз. М., 1940.

³ К. Маркс и Ф. Энгельс. Соч., т. XIV, стр. 530.

лишь с простотой идеи мирового тяготения, родившейся в уме Исаака Ньютона. Лишь в итоге огромного творческого труда ряда поколений постепенно выясняется, что оба эти закона имеют фундаментальное значение; содержание же их до конца и доныне еще не вскрыто, даже после упорных теоретических и экспериментальных исследований последних лет.

Действительно, что может быть, на первый взгляд, проще самого рождения периодического закона?

Молодой, полный горячности и творческой энергии, талантливый химик готовится к ответственному курсу общей химии в Петербургском университете. Он обдумывает план своего курса, ищет путь к наиболее ясному и логичному изложению свойств тех 60 химических элементов, которые ему известны и из которых составлена окружающая его природа. Он собирает огромный литературный материал: фолианты трудов Лавуазье и точные цифры многотомной химии Берцелиуса служат для него путеводной звездой; он собирает материалы обо всех известных тогда простых веществах; они отличаются друг от друга характерными индивидуальными чертами: атомным весом, удельным объемом, цветностью, растворимостью и т. д. Все они независимые, самостоятельные звенья мира, кирпичи мироздания; между ними можно видеть как ряд сходных черт, так и крупные, существенные различия. Среди этого хаоса различных свойств, среди нагромождения ошибок еще весьма несовершенных научных методов Менделеев ищет закономерностей в сходстве и в различии элементов. Он раскладывает на столе карточки с написанными на них названиями элементов, их атомным весом и характерными свойствами и очень скоро замечает совершенно простое и очевидное явление: элементы, расположенные по восходящим атомным весам, за немногими исключениями, изменяются в определенном порядке, но так, что через некоторое определенное число элементов, 7 или 17 (мы теперь говорим 8 или 18), общие черты элементов начинают повторяться, а изменчивости свойств кладется некоторый предел их периодичностью. «...Сомневаясь во многих неясностях, я ни на минуту не сомневался в общности сделанного вывода, так как случайности допустить было невозможно», — говорил Менделеев.

Но простота решения этой задачи в исторической перспективе является только кажущейся. Стоявшие перед Менделеевым трудности в расположении карточек были гораздо большими, чем можно думать. Прежде всего из тех 92 элементов, о которых мы сейчас говорим, ему были известны только 67, но о семи из них он мог говорить лишь условно, без достаточных фактических данных. Сами атомные веса, которые он положил в основу своей системы, в ряде случаев были определены неточно, а иногда даже совершенно неверно. Нужна была необычайная смелость, чтобы исправить атомные веса для десяти элементов (урана, индия, платины, осмия, иридия, бериллия, титана, тория, церия и иттрия); надо было быть еще более смелым, чтобы оставить в своем ряде свободные места и этим обеспечить стройность системы. Надо было быть уверенным в своей правоте, чтобы на основании рассмотрения пустых мест в периодической системе так смело и точно предсказать существование еще не известных элементов, которые затем были открыты: скандий, галлий, германий, а позднее рений и мазурий¹. Наконец, Менделееву надо было нарушить в некоторых случаях установленный им же самим порядок увеличения атомных весов и поставить кобальт перед никелем, теллур перед иодом, а позже — аргон перед калием. Словом, в ряде случаев надо было идти наперекор имевшимся фактам, не говоря о том, что надо было выступать и против старых

¹ Ныне технеций. — *Ред.*

Периодическая система Д. И. Менделеева
(по данным 1940 г.)

18	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
	1 Н Водо- род																	Не
2 Не Гелий	3 Li Литий	4 Be Бе- рил- лий	5 B Бор	6 C Угле- род	7 N Азот	8 O Кис- сло- род											9 F Фтор	10 Ne Неон
10 Не Неон	11 Na Нат- рий	12 Mg Маг- ний	13 Al Алю- миний	14 Si Крем- ний	15 P Фос- фор											16 S Сера	17 Cl Хлор	18 Ar Аргон
18Ar Аргон	19 K Калий	20 Ca Каль- ций	21 Sc Сканд- ий	22 Ti Титан	23 V Вана- дий	24 Cr Хром	25 Mn Мар- ганец	26 Fe Же- лезо	27 Co Ко- бальт	28 Ni Никель	29 Cu Медь	30 Zn Цинк	31 Ga Гал- лий	32 Ge Гер- маний	33 As Мышь- як	34 Se Селен	35 Br Бром	36 Kr Крип- тон
36 Kr Крип- тон	37 Rb Руби- дий	38 Sr Строн- ций	39 Y Ит- рий	40 Zr Цир- коний	41 Nb Нио- бий	42 Mo Мо- либден	43Ma* Мазу- рий	44 Ru Руте- ний	45 Rh Родий	46 Pd Пал- ладий	47 Ag Сере- бро	48 Cd Кад- мий	49 In Индий	50 Sn Олово	51 Sb Сурь- ма	52 Te Тел- лур	53 J Иод	54 Xe Ксе- нон
54 Xe Ксе- нон	55 Cs Цезий	56 Ba Барий	57-71 Ред. зем.	72 Hf Гаф- ний	73 Ta Тан- тал	74 W Воль- фрам	75 Re Рений	76 Os Осмий	77 Ir Ири- дий	78 Pt Плати- на	79 Au Золото	80 Hg Ртуть	81 Tl Тал- лий	82 Pb Свин- ец	83 Bi Вис- мут	84 Po По- лоний	85* Ала- бий	86 Rn Радон
86 Rn Радон	87* Вир- гиний	88 Ra Радий	89 Ac Акти- ний	90 Th Торий	91 Pa Прота- ктиний	92 U Уран												

TR: 57 La Лантан 58 Ce Церий 59 Pr Празеодим 60 Nd Неодим 61 Pm Прометей 62 Sm Самарий 63 Eu Европий 64 Gd Гадолиний 65 Tb Тербий 66 Dy Диспрозий 67 Ho Гольмий 68 Er Эрбий 69 Tm Туллий 70 Yb Иттербий 71 Lu Лутетий 72 Hf Гафний 73 Ta Тантал 74 W Вольфрам 75 Re Рений 76 Os Осмий 77 Ir Иридий 78 Pt Платина 79 Au Золото 80 Hg Ртуть 81 Tl Таллий 82 Pb Свинец 83 Bi Висмут 84 Po Полоний 85* Алмабий 86 Rn Радон

* В настоящее время № 43 известен под названием технеций (Tc), № 85 — астатин (At), № 87 — франций (Fr), № 61 — прометей (Pm). — Ред.

традиций школы Лавуазье с ее формально-субъективистским подходом к понятию о химическом элементе.

Так создавался периодический закон Менделеева. Но этот закон не только внес внешний порядок в систему элементов природы, — он, в сущности, по-новому выразил идею о единстве вещества и, против воли самого творца закона, открыл общность и внутреннюю связь химических элементов между собой, причем это была не отвлеченная идея философской мысли тысячелетий, а реальный вывод из точных наблюдений природы: независимо, самостоятельно существованию 60 элементов был положен конец!

Но надо было, чтобы прошло почти три четверти века, пока периодический закон Менделеева, родившийся прежде всего как эмпирическое обобщение фактов, как неизбежное следствие из них, превратился в величайший и глубочайший закон о строении вещества.

От простого пасьянса с отдельными карточками и гениального по простоте замысла Менделеева до современных представлений о периодической системе элементов — целая пропасть! Менделеевская таблица — глубочайшее выражение самых сложных природных закономерностей, а не просто список элементов, расположенных в порядке некоторых определенных физических и химических свойств. В основе этой таблицы лежит естественный закон, выражающий внутреннюю связь между элементами, между их свойствами, количеством и распределением вещества в окружающей нас природе, закон, которому подчиняются процессы миграции, строения, сочетания и рассеяния химических элементов на сложных путях преобразования миров. В глубочайшем синтезе современной физической и химической мысли рождается все более глубокое и точное понимание менделеевской таблицы, ведущее на каждом шагу к новым открытиям.

ИСТОРИЧЕСКИЕ ПУТИ

«...Земля ограничена, а знаниям грани не предвидится. Поэтому и промышленность, соединившись со знаниями и науками, обещает развиваться безгранично».

(Менделеев, 1901).

Мы не будем во всем охвате исторической перспективы рисовать перед вами отдельные этапы и той многовековой научной работы, которая — начиная с индийских и греческих философов, арабских алхимиков и кончая гениальными представлениями Дальтона и концепциями шведского химика Берцелиуса — привела Д. И. Менделеева к открытию периодического закона. Исторический анализ этого процесса отвлек бы нас от основной задачи, но все же очень важно отметить несколько главных моментов, предшествовавших тем историческим годам — 1869—1870, когда были установлены последние факты и сделаны обобщения, приведшие к оформлению нового закона природы.

Более двух тысяч лет шла борьба за представление о сущности так называемых кирпичей мироздания, за самое понятие первичной формы материи, за идею единства в многообразии и многообразия в единстве различных видов вещества. Сначала это были только четыре элемента — качества единого субстрата в еще очень отвлеченных представлениях Аристотеля, потом таковыми стали считать 9 уже более определенных характерных химических элементов (преимущественно металлов) древнего мира; число их очень медленно увеличивалось в течение многих столетий вплоть до конца XVIII века, когда мы наблюдаем появление в есте-

ствознании точных фактов и новых понятий. В годы революционного перелома науки и общественной мысли, на грани XVIII и XIX веков, понятие об элементе делается предметом и многочисленных экспериментальных исследований и философской борьбы. Вскоре уже около 30 химических элементов, как химически неделимых, простых веществ, оказывается в руках химиков. Их число растет по мере развития методов химического исследования и изучения минералов, особенно Скандинавии, сложных руд Саксонии и Семиградья, и этот рост, вытекавший в основном из успехов горного дела, так расширял старые списки, так увеличивал число химически неразложимых веществ — этих единиц мироздания, что, казалось, грозил окончательно сломать сложившиеся натурфилософские представления о простоте окружающей природы и единстве ее материи.

Поэтому исторически совершенно понятно, что как протест против растущего количества неделимых химических элементов явились попытки пересмотреть самое понятие «химический элемент» и снова вернуться к идее единства вещества, критически пересмотрев формальные положения Лавуазье.

Такова была та обстановка, когда анонимно, в осторожной форме английский врач и химик В. Праут в 1815 г. высказал мысль о том, что все элементы состоят из одного первичного вещества — протила. Эта мысль как будто подтверждалась и общим анализом атомных весов, она вытекала из общих натурфилософских представлений, стремившихся уменьшить число первичных элементов природы.

Однако эта гипотеза шла вразрез с экспериментальной школой химии того времени, которая, следуя за Лавуазье, не могла воспринять этих идей, связанных с ломкой установившихся представлений о неразложимости самого элемента.

Начатая точная экспериментальная работа показала, что лишь в первом приближении Праут был прав и что расхождения между атомными весами и целыми числами были слишком велики, чтобы считать их ошибками опыта; его идея была официально отвергнута, но умереть она не могла: независимость отдельных элементов была поколеблена, и в разных странах и в разных научных школах начинаются поиски взаимоотношений между 50—60 известными тогда элементами природы. Пусть эти взаимоотношения будут чисто формальными, но что-то общее есть, и это «что-то» надо найти. Так зародилось сначала в голове немецкого химика Дёберейнера правило триад (1817—1829 гг.). Работы продолжались потом во Франции и Англии: Ж.-Б. Дюма распределил элементы на группы, пытаясь выразить их определенными формулами (1857 г.); Кремерс (1852 г.), Гладстон (1853 г.), Кук (1854 г.), Гинрихс (1856 г.), М. Петтенкофер (1850 г.) и ряд других постепенно намечали отдельные зависимости; и, наконец, настоящие зачатки периодической системы мы встречаем у Одлинга (1857 г.), у Ленсена (в том же году), Шанкуртуа (1863 г.), Ньюлендса (1865 г.) и Лотара Мейера (1864 г.).

Первый Международный химический съезд в Карлсруэ в 1860 г. дал новый толчок к поискам соотношений между элементами. Блестящие, строго логичные идеи молодого итальянского химика Канниццаро, естественно, привлекли к себе внимание молодых слушателей, среди которых был и Менделеев. Менделеев вернулся со съезда убежденным, что есть какие-то великие законы, об открытии которых он мечтал еще на студенческой скамье.

Но прошло еще почти 10 лет, пока это подсознательное убеждение не привело его в марте 1869 г. к первой формулировке периодического закона,

долженного в собрании только что организованного объединения русских химиков в Петербурге:

«...Свойства простых тол, также формы и свойства соединений элементов находятся в периодической зависимости... от величины атомных весов элементов»¹.

Контуры закона установлены. Найдены связующие звенья между отдельными химическими элементами, одержана победа в борьбе за единство вещества. Казалось, что идеи Праута восторжествовали, что старые представления о превращении элементов получили новое экспериментальное доказательство.

Но широта и смелость этих выводов испугали творца новой системы: для глубокого философского подхода, для более глубокого физического понимания закона вопрос не созрел. Менделеев, опасаясь, что увлечение новыми философскими перспективами отвлечет от экспериментальной разработки химических представлений, возражал против этих выводов; вся его многолетняя борьба против углубленного понимания своего же закона вытекала из той исторической обстановки, в которой родился закон, когда не было ни тех методов, ни тех фактов, которые могли бы обосновать это новое толкование; только в историческом анализе нам делаются понятными слова Менделеева: «...Периодический закон... создан совершенно помимо какого-либо представления о природе элементов, не вытекает вовсе из понятия об единстве их материи, исторически с этим остатком классических мучений мысли вовсе не связан...»²

А между тем, новые толкования все сильнее захлестывали ограниченную трактовку периодического закона, нахлынувшие новые завоевания физики и химии заставили отказаться от прежнего толкования, и сам Менделеев, хотя медленно и постепенно, но отходил от своих первоначальных позиций, осторожно видоизменяя их содержание и подготавливая новые формулировки.

Но не эта сторона вопроса интересует нас сейчас. Нам важно углубленное понимание самого закона в свете современной науки.

ЭВОЛЮЦИЯ СОДЕРЖАНИЯ

«...Нет ни одного сколько-либо общего закона природы, который бы основался сразу; всегда его утверждению предшествует много предчувствий, а признание закона наступает не тогда, когда зародилась первая о нем мысль, даже не тогда, когда он вполне создан во всем его значении, а лишь по утверждении его следствий опытами...»

(Д. И. Менделеев. Основы химии, 1934, т. II, стр. 382).

Величие закона Менделеева заключается в том, что он не представляет застывшей формы, ортодоксальной схемы, а обладает внутренней способностью к эволюционному развитию. Новые факты и новые научные течения не опрокидывают его, не заменяют его новым законом, а неизменно уточняют его форму, расширяют его содержание, вкладывают в его формулировку новые толкования, дополняя и углубляя его гениальный смысл.

Именно в этом историческом процессе эволюции закона мы видим его роль как в науке наших дней, так и в науке будущего.

¹ Д. И. Менделеев. Избранные сочинения. Т. II, стр. 265 и 321, 1934.

² Д. И. Менделеев. Периодический закон химических элементов, стр. 171, 1934.

Сам Д. И. Менделеев подробно рассказывал о том, как работала его мысль в поисках тех координат, которые могли бы дать естественную систему природы. На каких свойствах и на каких константах обосновать эту систему? Перебрав ряд изменчивых черт отдельных атомов, Менделеев останавливается на атомном весе, считая, что это наиболее постоянный, неизменный признак элемента. Расположив в порядке повышения атомного веса все известные в то время элементы, он подметил, что некоторые химические и физические свойства элементов закономерно изменяются с возрастанием атомного веса и в то же время через определенное число элементов наблюдается повторение свойств.

Таким образом, сразу наметились два главных понятия, лежащих в основе менделеевской таблицы: определенная последовательность и наличие в этой последовательности отдельных отрезков, т. е. периодичность. Так как атомный вес, по которому расположены были элементы, не подчинялся периодичности, то логически вытекало и второе положение: что одни свойства не обнаруживают периодического хода, тогда как другие — и их было большинство — подчиняются закону периодичности. Как мы увидим в дальнейшем, эта двойственность природных свойств атома легла в основу всех наших современных представлений о строении вещества.

Далее из того же положения вытекала возможность изобразить наметченную закономерность на некоторой плоскости в виде таблицы с двумя координатами — горизонтальными периодами и вертикальными группами. В этой системе двух координат, как в обычных наших графических построениях, каждый элемент получил свое определенное место, занял свою клетку таблицы. Это место определяло не только чисто пространственное положение элемента в таблице, но оно тем самым определяло и свойства элемента и его соединений и его взаимоотношения с другими элементами таблицы. Такое толкование роли места элемента в периодическом законе было принято самим Менделеевым, но внутренний смысл «клетки» был открыт значительно позже: почти четверть века ушло на углубленное изучение и уточнение отдельных деталей, из которых таблица сложена.

Основные шаги в понимании места были сделаны физиками на грани нашего столетия, когда идеи, выдвинутые Дж. Томсоном, привели Рёзерфорда в Англии (1911 г.) и Нильса Бора в Дании (1913 г.) к новой концепции строения атома: эта концепция была заимствована из аналогии с нашей солнечной системой и заключалась в том, что всякий атом состоит из некоторого положительного ядра и отрицательно заряженных электронов, вращающихся по сложным орбитам вокруг этого ядра. Чисто математически решалась задача, как должны быть расположены эти электроны: по каким орбитам, в каких ячейках, в каких плоскостях, — но так, чтобы сумма свободной энергии системы в целом была минимальной. Таким образом поставленная задача привела к созданию новой модели атома. По существу, эта модель родилась из самого периодического закона, но, будучи проверенной путем анализа оптических спектров, она в свою очередь послужила гениальным обоснованием периодического закона.

Оказалось, что эта модель позволяет с достаточной точностью говорить о строении атома. Довольно сложно построенная на четырех так называемых квантовых числах, она не только разгадала в точности природу как сверкающих, так и не видимых невооруженным глазом линий спектров элементов, но и раскрыла физическое содержание периодического закона: место определялось строением. Очевидно, смысл этого положения заключался в том, что природа в каждом данном случае как

бы выискивала такую систему, которая была бы более устойчивой, т. е. содержала бы меньше свободной энергии. Количественно и качественно это неизбежно приводило к закону периодичности, как наилучшему выражению энергетической устойчивости атома. Решающей становилась величина заряда ядра.

Надо было сказать это последнее слово. Его в виде гипотезы высказал голландец Ван-дер-Брёк, к нему подходил Нильс Бор в своих исканиях, но настоящим образом сформулировал в 1913 г. новое построение только молодой англичанин Мозли, погибший в первую империалистическую войну.

Блестящее решение задачи заключалось в необычайно простой мысли: порядок расположения элементов в менделеевской системе есть последовательность величин зарядов ядра атомов; следовательно, эта система должна следовать ряду простых чисел от единицы до 92. Мозли даже вывел эти числа из очень простого уравнения. Оказалось, что не атомный вес определяет положение элемента в системе, даже не строение атома, а величина заряда ядра. Правильное распределение элементов в таблице Менделеева (за некоторыми исключениями), хотя и построенной на не совсем точной исходной идее, объясняется тем, что атомный вес в общем увеличивается одновременно с самим зарядом.

Оказалось, что место элемента в таблице определяется не атомным весом, не комплексом химических свойств атома¹, даже не строением атома, а зарядом его ядра, простым числом, названным номером элемента. Гениальная простота придала математическую точность всей менделеевской таблице; это число выводилось экспериментально, являясь квадратным корнем из частоты колебаний характерных линий рентгеновского спектра. Так поразительно просто была решена задача.

Внутреннее содержание менделеевской таблицы постепенно эволюционировало. Ее фундамент начал закладываться в период господства ньютоновских идей и идей Лавуазье, в связи с механическими представлениями об инерции и массе, которые постепенно заменялись новыми представлениями о некоторой сложной электромагнитной системе, и, наконец, сейчас она вырисовывается в свете современных идей волновой механики во всех своих деталях, во всей своей стройности и вместе с тем во всей сложности еще не решенных проблем.

Подшли ли мы к последнему этапу в понимании содержания менделеевской таблицы? Конечно, нет.

Представление об атоме как о планетарной системе, состоящей из ядра и вращающихся вокруг него электронов, есть также лишь упрощенное представление; сами ядра, и электронные оболочки, и вся эта грандиозная «пустота», лежащая между маленьким ядром и далеко затерянными в окружающем его пространстве и все же неизменно кружащимися вокруг него электронами, — все это лишь первое, еще довольно грубое приближение к действительности; таким же приближением являлись наши представления о планетах, вращающихся вокруг Солнца. И Солнце, и планеты, и весь звездный мир вырисовываются сейчас во всей сложности их состава и свойств; точно так же уже сейчас оказываются весьма сложными и те отдельные единицы, из которых построен атом, по современным представлениям. Попытки упростить схему строения атома привели лишь к ее усложнению.

Так, в ходе исторического анализа законов природы появляются все новые и новые успехи в понимании природы. Постепенно, шаг за шагом

¹ В настоящее время установлено, что химические свойства атома связаны с положением элемента в таблице. — *Ред.*

приближается наша мысль к пониманию причин природных явлений, и нужна еще большая и напряженная исследовательская работа, чтобы подняться на новый, но опять-таки не последний этап в представлениях о природе вещества. Такова диалектика научной работы.

ЭВОЛЮЦИЯ ФОРМЫ

«Периоды элементов... это — точки, числа, это — скачки массы, а не ее непрерывные эволюции».
(Д. И. Менделеев. Избр. соч., т. II, стр. 353, 1934).

Мы рассмотрели выше эволюцию внутреннего содержания закона, рассмотрим теперь и внешнюю форму его выражения. Она, как и внутреннее его содержание, переживала в течение последних 70 лет свою эволюцию.

Как мы говорили, внешним выражением периодического закона Менделеева была таблица, т. е. распределение всех изучаемых объектов, а в данном случае химических элементов, по двум координатам на плоскости. Помимо чисто внутреннего изменения содержания самой таблицы, исправления ее структуры и даже коренных дополнений, например новой нулевой группы, эта таблица в течение прошедших 70 лет пережила около 80 различных попыток вариаций, стремившихся отобразить внешне в более совершенной форме выражаемые ею основные закономерности периодического закона. Среди этих многочисленных, иногда очень остроумных, попыток, сделанных в разных странах мира, были попытки перейти от двух координат к более сложным — трехмерным системам: от плоской спирали — к винтовой нарезке на поверхности конуса, от плоскости — к пирамиде, к цилиндру, к двум связанным между собой спиральям и т. д.

При всей изобретательности некоторых авторов этих попыток ни одна из них, по существу, не внесла ничего принципиально нового. В отдельных, частных случаях они оказывались более удобными для выражения тех или иных периодических свойств. Для нашего изложения общих физических и геохимических проблем мы ограничиваемся обычно лишь одним современным типом таблицы — таблицы, развернутой на длинные периоды. В этом развернутом виде таблица намечалась еще Д. И. Менделеевым, хотя более обычной, вошедшей в обиход нашей высшей и средней школы является таблица двоянная (короткая), имеющая ряд положительных сторон при преподавании химии, но, по мнению физиков, не вполне отвечающая современным представлениям об электронном строении атома.

Попытаемся взглянуть в структуру нашей таблицы. Как видно, она состоит из большого количества отдельных клеток: их около 100. Как мы говорили выше, во времена Менделеева, достоверно известно было 60 элементов и кроме того 7, положение которых не было вполне выяснено за отсутствием достаточных фактических данных. В настоящее время мы знаем, что реально в этой таблице может быть занято 92 без 14, т. е. 78 клеток. Я не буду останавливаться на объяснении этого. Из этих 78 клеток оставались до последнего времени незаполненными клетки № 85 и 87 и одно из мест редкоземельных элементов, отвечающее № 61. В результате исследований последних лет как будто заполнены и эти клетки, особенно первые две, так как удалось искусственно получить из других элементов, в частности из висмута, не очень долговечные, но,

повидимому, вполне реальные атомы с порядковыми номерами 85 и 87. Летом 1940 г. радиологу В. Миндеру в Берне как будто удалось доказать наличие № 85 в продуктах распада актиния.

Разбор любой таблицы, состоящей из какого-либо ряда чисел, предполагает прежде всего рассмотрение начала и конца этого ряда. В менделеевской таблице первое место занимает водород с атомным номером 1, так как электрический заряд его ядра равен единице, следовательно, до водорода могла бы стоять лишь частица с зарядом, равным нулю. Рёзерфорд еще 20 лет тому назад предсказал возможность открытия такой частицы и подчеркнул, что она должна обладать сказочными свойствами: быть настоящей материальной частицей и свободно проникать внутрь вещества. В своих предсказаниях Рёзерфорд был гениально прав: эта частица была открыта, получила название нейтрона; вместе с такими частицами, как квант и электрон, она не находит места в менделеевской таблице и является одной из так называемых элементарных частиц, из которых строится вещество. Нейтрон поэтому лишь условно может считаться как бы нулевым элементом менделеевской таблицы.

Более сложен вопрос об ее конце. Работы итальянского радиолога Ферми как будто открыли возможность существования трансуранов, т. е. элементов, расположенных вправо от урана (№ 92), в конце ряда элементов менделеевской таблицы¹. Современные данные о радиоактивных и искусственно получаемых радиоактивных веществах до последнего времени как будто ничего не говорили против того, что при известных условиях возможно возникновение таких атомов, которые будут располагаться непосредственно за ураном, может быть, № 93 и 94, и которые мы, по аналогии с терминами Менделеева, могли бы назвать экауранием и экаосмием. Однако новые идеи о расколе атомов урана и тория, повидимому, противоречат этому представлению, тем более, что все наши знания о веществе говорят о том, что, начиная примерно с № 84, устойчивость атомов является недостаточной для длительного существования их на Земле. Чем больше усложняется строение самого ядра, чем больше электронных облаков окружает громоздкие ядра, тем менее вероятными являются и реальность, и устойчивость, и долговечность такой системы. Это не значит, что она невозможна при каких-либо других термодинамических условиях, далеких от исследуемой нами части природы, но все же пока несомненно, что менделеевская таблица в условиях окружающей нас природы заканчивается № 92.

Таким образом, сейчас таблица может считаться состоящей из 78 клеток, в одной из которых помещается 15 номеров, всего 92 химических элемента, с четким началом и с менее четким концом.

Пойдемте дальше в анализе нашей таблицы. Что сейчас представляет собой клетка? Понятие о клетке было необычайно простым и ясным во времена Менделеева. В каждой клетке, за исключением только клетки редких земель, располагается один элемент с определенными свойствами, со строго определенным атомным весом, со всей индивидуальностью, которая ему присуща. В клетке, например, обозначенной на таблице номером 50, помещен один элемент—олово. Его атомный вес, по определению самыми тщательными методами лучших химиков, равен 118,7, его основные физические константы измерены с точностью до трех и более десятичных знаков. Сама клетка характеризует собой природу элемента, его свойства, его положение в системе, его соотношения с соседями справа и слева, сверху

¹ В 1952 г. стало известно число заурановых элементов с № 93 по № 100 включительно.— *Ред.*

и снизу. Вопрос казался совершенно ясным и как будто не подлежал никакому изменению. А между тем оказалось, что все это совершенно не так.

В клетке содержится не одна, строго определенная атомная постройка, а несколько разновидностей,— общим для всех них является только заряд ядра; внутренняя же группировка сил, а также масса, или атомный вес, могут быть довольно различными. Следовательно, клетка объединяет в себе группу сходных между собой построек, тождественных по своему заряду, так называемых и з о т о п о в. Количество этих изотопов растет с каждым годом и в настоящее время достигает 300 для природных и гораздо большего числа (до 700) для известных искусственных атомов.

Вместо единого элемента в каждой клетке получается п л е я д а р а з н о в и д н о с т е й а т о м о в; так, в нашем примере олова в клетке № 50 содержится 10 разновидностей атомов с массой: 112, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 122 и 124, причем числовые соотношения изотопов в смеси оказываются в общем строго определенными; так, на долю изотопа 120 приходится больше 28%, 118—22,5%, 116—15,5%, а на долю 115 — только 0,4% и т. д.

Таким образом, усложнилось формально и по существу понятие о клетке в таблице Менделеева: открытие изотопов показало, что одно место объединяет целую плеяду атомов с различными атомными весами, а те атомные веса, которые были положены в основу самой менделеевской таблицы, оказались лишь некоторыми средними числами из большого количества разных атомных весов.

До последнего времени считалось, что для химика, в сущности, это новое представление о клетке, например, о многочисленных разновидностях олова, не представляет значения, ибо химические свойства определяются в первую очередь лишь самой клеткой, т. е. ее номером. Однако и этот концентр представлений стал разрушаться на наших глазах: так, прежде всего постоянство соотношений изотопов в плеяде оказалось лишь первым приближением. Тончайшие анализы, проведенные в разных областях, показали, что в некоторых случаях колебания достигают 5% для обычных элементов, а в частных случаях, например свинца или стронция, могут встречаться коренные отклонения от среднего обычного состава смеси; так, могут быть почти чистые разновидности свинца одного атомного веса в одном месте и почти чистые разновидности другого атомного веса — в другом. Значит, точность понятия о постоянстве среднего атомного веса смеси изотопов поколеблена, и мы увидим дальше, какие огромные изменения это вносит в наши представления о химических процессах природы.

Одновременно изменились и наши представления о независимости химических свойств от массы изотопов. Открытие дейтерия, т. е. изотопа водорода с атомным весом 2, выявило целый новый мир химических реакций, резко отличный от реакций легкого водорода. Оказалось, что атомный вес изотопов в известной мере налагает свой отпечаток и на химические и на физико-химические свойства вещества,— и эта идея легла в основу методов разделения изотопов, при которых то применяется длительный электролиз многих тысяч кубометров воды, то используются законы тепловых движений в трубках длиной в десяток метров. Оказалось, что изотоп, как разновидность элемента, наделен своими специфическими чертами. Судьбы атомов в мире различны, различные пути их миграции в природе, различна их роль в живой клетке, особенно чутко реагирующей на мельчайшие изменения того среднего состава атома, который мы считаем обычным. Носамое замечательное из того, что наметилось в последнее время,— это то, что состав элемента, соответствующего каждой

клетке таблицы, не только изменчив и непостоянен в разных областях космоса, но в ряде случаев этот состав зависит и от времени.

Однако об этой новой координате менделеевской таблицы речь впереди!

Так отпали старые представления о постоянстве и математической точности самого понятия элемента и отвечающего ему понятия места в таблице. И мы сейчас, в окружающей нас природе, в блестящих завоеваниях современной техники, в намечаемых путях использования внутриатомной энергии, уже не можем больше говорить о постоянстве каждого элемента: для нас каждое место периодической системы есть целый сложный мир, изменчивый в пространстве и во времени, мир, разгадка которого еще в будущем.

Я должен был бы сейчас в моем освещении самой природы таблицы перейти к анализу ее геометрических направлений, но этот анализ завел бы нас в самые глубины химии и не мог бы раскрыть вопрос без детального его освещения. Я укажу лишь, что именно в анализе трех направлений: горизонтального, вертикального и диагонального, которые разбивают таблицу на отдельные поля и блоки, определяют вокруг каждого элемента «звезду» его соседей, — именно при этом анализе вскрывается вся диалектическая сущность периодического закона, тесная связь непрерывности и прерывности в изменениях свойств элементов, двойственность каждого элемента, носящего в себе всегда признаки металла и неметалла, плюса и минуса. В каждом последующем элементе как бы нарастают свойства, противоречащие предшествующему. Постепенное изменение этих свойств прерывается скачком через инертные газы, и затем начинается новый ряд в том же порядке. В этом заключается самая сущность химических свойств элементов, выражающая направление химических реакций, законы сочетания атомов в кристаллической решетке, — словом, всю современную химию...

Надо помнить, что в основе менделеевского закона лежит не только общая идея периодичности, но и закономерность в изменении свойств элементов в каждом отрезке последовательного ряда, в каждом его периоде (по горизонтали). Это замечательное свойство таблицы нередко забывается, хотя в нем заложена одна из важнейших сторон самого закона.

Сказанное не только дает специальное химическое освещение системы Менделеева, но и открывает путь к ее философскому толкованию.

НОВЫЕ ПРОБЛЕМЫ

«Периодический закон Менделеева является истинным компасом для исследователя».

(Химик В. Рамзей, 1903).

Выше мы пытались наметить путь к новому толкованию и к новой формулировке менделеевского закона.

Мы не в состоянии детально остановиться на тех новых проблемах, которые открываются перед нами в свете новых представлений об атоме и его месте в менделеевской системе, — мы ограничимся поэтому лишь несколькими отдельными мыслями.

Современная наука изучает свыше 100 различных свойств отдельного вещества: для каждого элемента, точнее, простого вещества, она устанавливает примерно 100—120 различных констант; сопоставляя их между собой, она пытается установить их связь в свете системы Менделеева и установить те кривые, которые характеризуют изменения свойств в зависимости от расположения элементов в менделеевской таблице. Для некоторых свойств (таких, как удельные объемы, температуры плавления

и кипения, потенциалы ионизации и многие другие) эти кривые давно получены; они точно показывают периодический ход изменения свойств.

Но задачей естественных наук является не только установление отдельных констант, не только выявление закономерных соотношений между отдельными элементами; их задача — гораздо более глубокая, имеющая и общеполитическое значение — установить взаимную связь между всеми элементами и их свойствами и свести их разнообразие к единой причине и, если только возможно, выразить количественную сторону этой связи в виде математической формулы или уравнения.

В исторической перспективе в данном случае повторяется с точностью то, что переживало понятие самого элемента за последние столетия: сначала шло установление основных понятий как таковых, потом открытие связующих взаимоотношений между ними и, наконец, вывод обобщающих законов, которые связывают разрозненные факты в единую картину. На этот путь, проделанный менделеевской системой по отношению к в е щ е с т в у в целом, становится современная наука и в более глубоком анализе как внутреннего строения атомов, так и их к а ч е с т в е н н ы х п о к а з а т е л е й. Если те 100—120 изучаемых современной наукой свойств веществ принять за некоторые константы, то встает задача — найти между ними ту закономерную связь, которая связывала бы их не только с менделеевской таблицей, но и между собой в виде уравнений. При этом одни из свойств (их подавляющее число) оказываются полностью во власти периодичности их изменений: они зависят от периодически меняющегося строения наружных электронных оболочек атома, и все черты этих оболочек отражаются на их свойствах. Энергетические показатели атомов и явления вырывания самих электронов составляют этот сложный мир, в котором изменениями свойств управляют ничтожные доли энергии — ее кванты, доли электрон-вольта. И тем не менее именно эти свойства лежат в основе всей красоты их, всего разнообразия окружающей нас природы и технической деятельности человека.

И наравне с этим, как резкий контраст, выдвигается совсем другой мир свойств, пока еще загадочных в своей природе. Он связан с ядром, с его энергетикой в миллионы электрон-вольт. Тайственные пока еще силы связи между протонами, нейтронами и другими элементарными частицами лежат в основе этого мира — мощных конденсаторов мировой энергии, которые мы называем ядром; к миру этих свойств относятся атомные веса, масса, всемирное тяготение, количества атомов в мире, их стойкость. Долго казалось, что нет ничего общего между этими двумя мирами: между миром электронной оболочки атомов и миром атомного ядра, радиус которого выражается величиной во многие миллионы миллионов раз меньше 1 см. Но и эта резкая грань исчезает в свете новой науки, так же как она уже исчезла из наших представлений об окружающем мире, ибо мы на каждом шагу все резче и конкретнее ощущаем взаимную связь между нашей планетой и Солнцем. Пятна на поверхности Солнца и связанные с ними магнитные бури, его излучение и флуктуации, потоки различного рода лучей — все это приносится к нам от Солнца из более далеких космических систем, иногда через многие световые годы, перемещает в Земле и на Земле воздушные, жидкие, расплавленные массы, нарушает равновесие атмосферы, препятствует ходу радиоволн, вмешивается в развитие всей жизни земной поверхности. Так же рождаются в новой физике и новые связи между миром ядра атома и миром его поверхности. Нет двух независимых понятий — ядра и оболочки, как нет двух независимых друг от друга единиц природы — вещества и энергии. Есть только единая система, о которой так остро писал В. Гете:

«Всю жизнь об этом мне твердят без толку,
Я ж негодую — хоть и втихомолку;
На скорлупу и на ядро бесцельно
Делить природу: все в ней нераздельно...»

И наравне с этой новой проблемой будущей физики становится вторая проблема — энергетика атома, в новом понимании постоянства суммы вещества и энергии. Мы наблюдаем здесь все переходы, начиная от тончайших изменений электрических полей, не превышающих долей электрон-вольта, и кончая изменениями порядка миллионов электрон-вольт. Рассмотрим несколько картин из этих представлений.

Вот электронное облако, окружающее атом; оно несколько переменило свое место в оболочке и в поисках нового равновесия потом снова отхлынуло назад, освободив ничтожный квант энергии; острая линия спектра сверкнула, как мимолетный результат этого физического процесса. Еще более сильное электромагнитное поле вырывает из системы атомной оболочки одно—два—три или более наружных электронных облака. Из нейтрального атома образуется то, что мы называем и о н о м, — заряженная действующая частица. Ее свободный заряд небольшой: он связан всего лишь с единицами, десятками, реже — сотнями электрон-вольт, и тем не менее именно ион управляет непосредственно окружающим нас миром, создает всю сложность химических соединений Земли и других планет. Именно он создает тот мир, который подчинен закону Менделеева, мир, который мы должны по праву называть м е н д е л е е в с к и м м и р о м.

Но вот еще более сильные электромагнитные поля начинают действовать на атомную постройку. Они вырывают не 2—3—4 электронных облака из его оболочки, — они снимают все. Перед нами раздетый атом, голое ядро ничтожных размеров, в десять тысяч раз меньшее, чем обычный атом. Эти ядра лишены тех индивидуальных черт атома, которые вызываются электронной оболочкой. Они лишены разнообразия и сложности почти всех тех 100 свойств, которые, как мы видели, определяют собой всю глубину и яркость, все разнообразие и красочность менделеевского мира природы. Создается свой, особый мир, как мы говорим, мир сильно ионизированных частиц, который свойственен звездным глубинам. Если эти голые ядра, которые в тысячи раз меньше самого атома, сблизятся между собой, может родиться новая, более тяжелая система и новое вещество, непохожее на вещество нашей Земли, в десятки тысяч раз более плотное, чем самые плотные атомы платины и золота!

И, наконец, в еще более могучих электромагнитных полях распадается и самое ядро: то при медленном вековечном процессе радиоактивного распада, измеряемого миллиардами и десятками миллиардов лет, то при быстром превращении в лучах несущихся материальных частиц могучих циклотронов, то при бурном разрушении, взрывах ядер с освобождением многих десятков миллионов вольт электрической энергии...

Так в огромном интервале электромагнитных полей изменяются атомы, и трудно сказать, где кончается власть менделеевского закона, где начинается власть законов ядра, где и как сплетаются эти взаимно различные влияния двух отдельных частей единой постройки.

Но на этих новых путях новый фактор врывается в явления природы и в менделеевскую таблицу. Я говорю о в р е м е н и. Время является одной из важнейших координат природы. В последние годы в константы химических справочников впервые входят ранее совершенно непонятные и ненужные для химика показатели времени существования, вернее, времени полураспада элемента: 6 месяцев, 10 минут, миллиард лет, 44 се-

кунды. Время существования атома в данной клетке превращается в показатель огромного значения, говорящий об устойчивости данной системы атома, о ее свободной энергии, о ее способности существовать и участвовать в создании новых веществ. На наших глазах идет борьба за уточнение методов измерения сроков жизни атомов. И в то время как в природных процессах диапазон жизни отдельных атомных систем или отдельных частиц колеблется от 10^{-11} до 5×10^{17} секунд, т.е. от тысячи миллиардных до сотен миллиардов лет, — наши искусственные методы разрушения атома говорят пока о доступности измерения полупериодов жизни атома при эксперименте от 10^{-5} секунды до одного года.

Таким образом раскрывается совершенно новая сущность не только элементов, длительно живущих в условиях окружающей нас природы и благодаря некоторому энергетическому барьеру сохраняющих свою устойчивость, но и целого мира других, вечно изменяющихся, кратковременно существующих элементов, находящихся все же свое место в тех же клетках менделеевской таблицы. И здесь для нас делается совершенно ясным, что не мистические, скажем словами Менделеева, метахимические представления о непостижимости мира кладут предел нашему пониманию менделеевской таблицы, а самый метод исследования и точность наших измерений определяют предел современного понимания природы. Совершенно очевидно, что постоянное расширение пределов измерения свойств и сроков жизни вещества делает процесс взаимного превращения атомов не специфической чертой только небольшого круга элементов таблицы, а общим свойством материи в целом.

Таким образом, менделеевская таблица меняется во времени. Не ее толкование, а сама таблица, само внутреннее содержание клетки, сами величины, лежащие в основе характеристики атомов, изменяются во времени, внося тем самым в таблицу новую координату, как новую проблему в глубоком диалектическом понимании неразрывности времени и пространства, равновесия и движения.

Я кончаю на этом мою главу о новых проблемах, еще, пожалуй, только маячащих в будущих представлениях о менделеевской таблице.

Сейчас мне нужно на время уйти из области этих физических представлений и окунуться в совершенно другой мир понятий — для того чтобы показать, как менделеевский закон идет не только в глубину и наиболее кардинальных вопросов природы, но как он развивается и в ширину, проникая во все течения научной мысли, подчас неожиданно внедряясь в самые разнообразные области науки.

НОВЫЕ ОБЛАСТИ НАУКИ

«В противоположность метафизике диалектика рассматривает природу не как состояние покоя и неподвижности, зстоя и неизменяемости, а как состояние непрерывного движения и изменения, непрерывного обновления и развития, где всегда что-то возникает и развивается, что-то разрушается и отживает свой век».

(И. С т а л и н., «Вопросы ленинизма», 11-е изд., стр. 537).

Мы говорили о веществе, его строении и энергетике. Мы выявили в нашем рассмотрении менделеевской таблицы координату времени, но все же мы пока не вышли из заколдованного круга статических представлений. Между тем есть целые области знания, которые связаны именно с активной деятельностью атома, как мы сейчас говорим, с его поведением.

Ведь атом, в сущности, не только интересен сам по себе, даже не так он интересен во всей своей «семейной» обстановке, с соседями и прародителями: гораздо более интересен вопрос, как из него строится окружающий нас реально существующий мир, как сочетается атом с другими атомами, образуя химические соединения. Какими силами, по каким законам, количественным и качественным, изменяется его поведение в той или иной обстановке, одинакова ли его судьба в холодных растворах земных вод и на поверхности Солнца с температурой в 6000°? Нас привлекает поэтому проблема судьбы каждого элемента, его история на всем пространстве и во всем разнообразии космических миров, нас интересуют странствования, как мы говорим, миграции элемента на Земле, в ее глубинах и в доступной воздействию техники земной коре, его поведение в кристаллах каменной соли, его судьба в металлической оси автомобиля, в живой клетке сложного органического вещества. Каждый атом имеет свое поведение, и законы этого поведения вытекают из законов строения ядра и менделеевской таблицы, где бы ни проявлялись его роль и его силы: в грандиозной исторической перспективе, измеряемой отрезком времени примерно в десяток миллиардов лет, в пространстве ли необозримых галактик и солнечных миров, в рамках ли реальной земной действительности сегодняшнего дня, в горящей перед нами свече, в сложном мире еще не понятых реакций зеленого растения, в каждом явлении окружающего нас мира.

Немногим более ста лет тому назад, во время расцвета научной деятельности скандинавских химиков Митчерлиха и Берцелиуса и смотрителя королевских маяков великого Фарадея в Англии, в 1838 г. ба-зельский ученый-химик Шёнбейн писал, что «...мы должны иметь новую науку — геохимию!»

Его близкий друг, знаменитый М. Фарадей, поддерживал его в своих письмах, подтверждая значение этого нового широкого пути мысли.

Берцелиус уже тогда в своей классической химии тесно связывал химические идеи с горным делом, а молодой друг Шёнбейна Юлиус Либих выводил из органической химии проблемы воздействия на растения, впервые научно применяя в земледелии фосфорные и азотные удобрения.

И, тем не менее, надо было, чтобы прошло почти 100 лет, пока геохимическая мысль получила более широкое признание. Теперь наша страна сделалась одним из виднейших очагов этого научного движения, все еще борющегося за глубину и широту этих идей.

Но если 100 лет тому назад впервые было произнесено самое слово «геохимия», то идеи геохимии, как истории химических элементов в земной коре и их поведения при различных термодинамических и географических условиях, коренятся в глубокой древности, и мы видим, что они развивались на протяжении всей истории науки и истории культуры.

Эти идеи появляются у арабских писателей на основании опыта эксплуатации рудников далекого Туркестана и в испанской Кордове. Мы видим их еще раньше у Плиния при описании руд железа, серебра и ртути, когда древний Рим в борьбе за металл посылал свои легионы на завоевание недр Галлии, Иберии, Британии и Карфагена. Мы находим эти идеи у средневековых алхимиков с их замечательными чисто геохимическими открытиями, понятыми и расшифрованными лишь в самые последние годы в работах Липпмана и Руски.

Мы следим в начале XVI века за геохимической мыслью Георга Агриколы — врача и минералога горного саксонского центра. Замечательный труд Агриколы «De natura fossilium», рожденный из практики горного дела, говорил о том, как ведут себя металлы в тайниках земных недр: как одни из них любят друг друга и потому нераздельны; как другие,

подобно подземным духам «никелей и кобальтов», враждебны серебру и золоту; как воюют между собой несогласные металлы: золото и цинк или олово и серебро.

Корни геохимической мысли надо искать в истоках горного дела: в глубине рудников в старой Саксонии рождалась идея о законах поведения элементов в земной коре.

С тех пор прошло много лет; идея геохимии вышла за рамки, наметченные Шёнбейном, даже за рамки самого понятия химии Земли. Геохимия постепенно стала превращаться в новую широкую науку о судьбах и путях распределения и сочетания химических элементов в природе. Она тесно сплетается в своей методике и идеях с химией и физикой, минералогией и кристаллохимией, астрофизикой и геофизикой. Она выделяет отдельные течения, — создает новые научные дисциплины: радиогеологию и биогеохимию, — внедряется в область чисто геологических наук, в горное дело, в изучение полезных ископаемых, вносит свои методы и выводы в технику и металлургию.

Первый вопрос, который стоял перед геохимией, заключался в следующем: сколько же в доступном нашему изучению мире содержится атомов отдельных элементов, каковы абсолютные и относительные их количества, как мы сейчас говорим, — каковы их кларки? В сущности, этот вопрос необычайно прост. Он невольно возникал всегда, когда человек искал золото и металлы, когда в горном деле он встречал всюду обилие простых солей и земель, но с трудом отыскивал капли ртути или блески золота. Эта замечательная проблема о количестве элементов сейчас превратилась в одну из важнейших научных задач, поставленных геохимией, и несмотря на долгое и упорное непонимание, игнорирование ее и даже борьбу против нее она выросла в огромной важности научную и теоретическую проблему не только об относительном количестве элементов в мироздании, но и об устойчивости вещества, ибо количество было поставлено в зависимость от прочности данной атомной постройки.

Я не буду рассказывать, как шла эта огромная и сложная работа, как в нее включались — и особенно в нашей стране — самые светлые умы химиков и геологов. Сейчас получены достаточно точные цифры количеств отдельных элементов в земной коре, в атмосфере Солнца и звезд. Эти цифры — кларки — являются новыми константами природы, и в каждую клетку менделеевской таблицы мы можем сейчас вписать некоторое определенное число. Эти числа показывают, что более распространенных элементов содержится в окружающем нас мире примерно в 10^{13} раз больше, чем более редких, даже если не говорить об атомах радиоактивных рядов.

Эти нанесенные на таблицу Менделеева кларки, являющиеся замечательным показателем относительной прочности элементов, обнаружили ряд закономерностей. Сам Менделеев в первом своем докладе о периодическом законе указывал на основную черту этих величин: самые распространенные в природе вещества (как водород, кислород, углерод, натрий или кремний) относятся к верхней части таблицы, к самым начальным, более легким элементам. Скоро выяснилась и другая закономерность. Оказалось, что ход кларков обнаруживает некоторую периодичность, но она не отвечает периодичности менделеевской таблицы: прежде всего — и это является самым замечательным — четные элементы оказались более распространенными, чем нечетные, причем через каждые 6 и 12 элементов (в порядке их расположения в системе Менделеева) нарастали максимумы и минимумы их количественной распространенности.

Закон кларков, таким образом, оказался законом ядер, показывающим, что не наружные оболочки атома, не электроны определяют общее количество атомов в мироздании, а устойчивость самих ядер... и вот на фоне этого положения стали выявляться совершенно замечательные выводы, которые как будто шли вразрез с установившимися представлениями.

Ведь мы знаем, что не ядра, а наружные электроны определяют в основном перемещение, миграцию элементов, всю их судьбу в сложных путях нашей космической системы. Именно они приводят к рассеянию одних элементов в одних частях мироздания, к концентрации—в других, они мешают равномерному распределению атомов. И углубленный анализ кривых кларков для отдельных областей мира научил нас отличать в каждой космической системе те отклонения от среднего, которые вызваны ролью химических сил согласно менделеевскому закону.

Эти отклонения от первичного кларка стали открывать нам глубочайшие и важнейшие законы перераспределения веществ в окружающей нас природе и во всем мире, и нам сделались тогда понятными звезды с оболочками из неона и аргона, мы начали понимать роль подвижных, нечетных, заряженных атомов водорода, натрия и кальция, наполняющих несветящимися частицами все космическое пространство между звездами и туманностями. Мы начали понимать историю наших планет: образование на малых, подобных Венере, атмосферы, богатой угольной кислотой; образование углеводородов, аммиака и воды—на больших, типа Урана. Переход материи от мира, подчиненного закону ядра, на высшую ступень, в мир, управляемый электронными оболочками, предопределил судьбы космических тел, сделал возможным зарождение жизни в сложном эволюционном процессе охлаждающейся системы. Голые ядра атомов при переходе из звездных глубин к холодным областям космоса стали одеваться в наряд из электронных облаков и постепенно превращались в заряженные «ионы», в странников, которые строят окружающий ближайший к нам мир. Мы говорим сейчас о кларках рассеяния, т. е. о судьбах одних элементов таблицы, нечетных, активных, пронизывающих все вещество, постоянно странствующих между остывающими космическими системами. Мы говорим о кларках концентрации, когда устанавливаем законы накопления других атомов—четных, прочных, строек, быстро находящих свое равновесие и очень скоро умирающих в новых системах, которые рождаются в менделеевском мире, где из отдельных атомов с их эллиптическими орбитами движения рождаются геометрические системы кристаллов. Эти системы, эти новые формы равновесия могут родиться только в области господства электронных оболочек, в мире более холодных поверхностных условий со слабыми электромагнитными полями.

От глубин звездного мира мы последовательно переходим к нашей планете, к недрам, раскрываемым геофизикой, к земной коре с ее ископаемыми богатствами. И здесь, в борьбе за металл, в практике горного дела великие идеи Менделеева нашли свое конкретное выражение и свое освещение и помогли открыть новые закономерности явлений природы. Но корни всякого открытия уходят глубоко в прошлое. Они подобны волне, бьющейся о берег: так часто и человеческая мысль плещется около почти созревшей идеи, пока не придет девятый вал...

Изучив в геохимии историю отдельных атомов, мы можем подойти к общей концепции химии мира, хотя еще многих звеньев недостает в пепи явлений, вечно сплетающихся и расплетающихся и в своей бесконечной смене образующих вселенную.

В глубинах звезд, при температурах в 40—50 миллионов градусов, при давлениях порядка 10^{28} атм., мы встречаем первые химические элементы, мы почти не знаем их природы: они лишены наружных оболочек, лишены почти всякой химической индивидуальности! Разрушение тяжелых атомов идет наряду с их созданием. Легкие, неустойчивые элементы разлагаются мощными излучениями материальных частиц. Идет дифференциация веществ по стойкости ядра.

Переходя к поверхности звезд космических систем, мы видим дифференциацию газов в условиях температур порядка десятка тысяч градусов и пониженных давлений, доходящих до сверхрассеянного состояния. Атомы в значительной степени еще раздеты, еще лишены своих наружных оболочек, еще не приобрели специфических химических черт. Законы Лапласа, а не Менделеева направляют здесь процессы миграции; давление лучистой энергии перемещает их в мировых галактиках.

Следуем дальше. На охлаждающихся космических телах типа Солнца и холодных звезд с температурами поверхности в 5—8 тысяч градусов и красных звезд с температурой их атмосфер, опускающейся до 1800° , ядра постепенно одеваются наружными оболочками электронных облаков. Начинается химический процесс разделения элементов по типу строения, влияние менделеевского закона все усиливается, происходит первое разделение вещества на устойчивые четные постройку и на дисперсное вещество межкосмических пространств.

Следующую по степени охлаждения космическую систему представляет великий менделеевский мир; здесь берет начало кристаллизация, эта новая форма энергетического равновесия. Происходит накопление вещества по отдельным уровням энергии, образуется зональное строение планет с более устойчивыми энергетическими системами глубин и с накоплением подвижных, с большей внутренней энергией атомов на поверхности Земли; выявляется их роль в создании жизни, в творческой деятельности человека и развитии техники. Закон Менделеева определяет направление этих процессов.

Так в анализе химических процессов космоса вырисовывается растущая роль закона Менделеева, в котором законы энергетики и уровни энергии управляют отдельными клетками, перемещая элементы и сочетания их во времени и пространстве.

Но в этой картине менделеевского мира есть еще две области, без которых наш обзор значения закона Менделеева для новых областей знания будет не полон. Я говорю о живом веществе и творческой производственной деятельности человека.

Проблемы биогеохимии за последние годы дают нам огромный материал фактов о составе, распределении и роли отдельных элементов при постройке живой клетки. Блестящие обобщения и работы академика В. И. Вернадского и А. П. Виноградова доказали, что живое вещество использует для своей постройки свыше 60 химических элементов таблицы, но что главную роль при этом играют ее верхние элементы, обладающие признаком нечетности: усиливается роль более подвижных систем, особенно тех шаровых ионов, которые обладают особой подвижностью. Самые прочные, самые устойчивые элементы четных рядов и четных групп идут на постройку плотного скелета и прочной защитной раковины; другие, наиболее подвижные, нечетные элементы, с малой устойчивостью, с легкой изменчивостью электронных оболочек, идут на постройку тех сложных, но необычайно гибких систем, которые мы называем содержанием живой клетки и которые составляют основу физиологических растворов организма.

Мы видим, далее, что в основе процессов жизни лежит накопление энергии, что в них проявляется борьба против ее рассеяния в мировом пространстве. Здесь, на другом полюсе мира, по закону борьбы противоположностей, вновь возникают мощные конденсаторы мировой энергии, но они иные, чем те, которые мы видели в ядрах атомных систем: их сила не в миллионах электрон-вольт энергии ядра, а в рождении новых подвижных систем мозговых клеток человека. Здесь начинается область человеческого творчества, его завоевания природы, подчинения себе ее законов, в том числе и закона, выраженного в менделеевской таблице.

Менделеевская таблица определяет новые направления технического прогресса, она открывает закон распределения металлов в земной коре, рассеяния их и концентрации. Она помогает поискам и разведкам, подсказывает свойства соединений элементов, толкает техническую мысль вперед. Уже намечается новая технология, являющаяся неизбежным выводом из анализа менделеевской таблицы и положения каждого элемента в ее клетках. Именно она навела молодого американского техника Томаса Миттлей, на основе вдумчивого анализа менделеевской таблицы, на открытие того вещества фтористого углерода, которое революционизирует все холодильное дело. Открытие нашими металлургами связи менделеевской системы с ролью и поведением отдельных элементов в специальных видах стали подсказывает новые пути в решении самых основных и самых важных проблем создания прочного металла. Но все же техническая мысль еще не обосновала теоретически ту огромную роль, которую сыграет менделеевская система на ее дальнейших путях, и мы верим, что именно у нас, в нашей стране, новая технология будет построена не столько на эмпирических данных, сколько на глубокой теории, вытекающей из менделеевской системы в целом.

Новые завоевания рождаются всюду, где вдумчивая мысль ученого пытается применить законы Менделеева к анализу природных явлений.

ОБЩИЙ АНАЛИЗ

«...Набор на службу чистой науке молодого поколения пусть не страшит тех, кто понимает настоятельную необходимость родины в практических деятелях в области сельского хозяйства и всяких промышленных дел. Лишь тогда, когда узнаются истины сами по себе, в их абсолютной чистоте, они могут самостоятельно прилагаться к жизни...»

(Д. Менделеев. Предисловие к 6-му изд. «Основ химии», стр. VI, 1895).

Мы переходим к общему анализу менделеевской таблицы в свете современной научной мысли. Рассмотрим периодический закон в целом в его научно-философском освещении.

Сначала несколько слов о двух основных чертах, характеризующих все крупные законы природы: первая—это способность закона к дальнейшему развитию, эволюции, и вторая—это его приближенность, обусловленная тем, что он охватывает огромное количество самых различных фактов и явлений.

Действительно, великие законы природы — не законы чисел с их математической четкостью, абстрактностью абсолютного числа, как фетиша и догмата. Законы природы — это выражение сложнейших реально существующих соотношений в природе, сложного сплетения явлений во

времени и пространстве. В них кажущиеся исключения и отклонения столь же обязательны, как обязательны те противоречия, из которых складывается мир, как результат борьбы противоположностей притяжения и отталкивания, плюса и минуса, кислотности и щелочности, прерывности и непрерывности материи и ее изменений. Не идея натурального ряда чисел, сверкавшая в предвидении Марне в конце XVIII в.¹, не абстрактные выводы из уравнений квантовой механики, а реальная сущность окружающего мира нашла свое четкое выражение в законах эволюции Дарвина, в законе тяготения Ньютона и в законе вещества Менделеева.

Но, с другой стороны, великие законы и идеи никогда не являются готовыми и законченными догмами: они развиваются в своем внутреннем содержании и в своих формулировках, во всем охвате фактических соотношений и выводов из них, и развиваются они одновременно со всей историей научной мысли. Только в этом историческом понимании больших идей обнаруживаются их жизненность, их рост и развитие.

Между первой таблицей 1869 г. и современной таблицей Менделеева — не только целый мир научных работ, но и целое новое мировоззрение, чуждое и самому Менделееву и всем последователям Лавуазье, сторонникам формальной химии.

Закон Менделеева велик именно тем, что он не мертвая догма — он живет и развивается. Что же нового дал периодический закон на современных путях научной мысли?

1. Он показал на фактах связь отдельных атомов между собой и решительно порвал с понятием самостоятельности и независимости отдельных элементов.

2. Он связал все элементы природы в естественную систему, показав зависимость качественных показателей от количественной характеристики.

3. Он связал свойства атома с его строением из одинаковых единиц, открыв дорогу вопросам превращения элементов и их взаимных переходов.

4. Он доказал всю внутреннюю противоречивость свойств элемента, диалектическое сочетание в нем противоположных начал.

5. Он поставил в зависимость химические и физические свойства атома от электрической природы вещества, чем неразрывно связал вещество и энергию и показал невозможность их самостоятельного существования.

Устанавливая таким образом глубочайшие связи между химическими и физическими явлениями, Менделеев осуществил знаменитые слова Ломоносова: «Химик без знания физики подобен человеку, которой всего искать должен ошупом. И сии две науки так соединены между собою, что одна без другой в совершенстве быть не могут...»²

Глубина приведенных положений вытекает логически из самого закона, но вытекает она, в известной мере, вопреки желаниям Менделеева, который, пожалуй, в первые годы решительно бы восстал против большинства вышеуказанных пунктов. Блестящий анализ этих пунктов в свете современных представлений об элементе дан в специальном исследовании Б. М. Кедрова³.

Но то, что мы сейчас отметили, в сущности, является уже пройден-

¹ У Н. Марне в 1786 г. мы находим следующую замечательную фразу: «...Все простые творения в природе могут быть сравниваемы с числами... каждый элемент будет иметь свое истинное или предполагаемое место в лестнице природы...» Более глубоко развил эту же мысль Шанкуртуа; он писал, что свойства тел суть свойства чисел.

² М. В. Ломоносов. Новое примерное расположение и учреждение С.-Петербургской Академии Наук, 1764, § 7.

³ Часть этой работы опубликована в «Философском сборнике», 1946, № 1, под заглавием «Понятие «химический элемент» и его логический анализ». — *Ред.*

ным этапом. Сейчас мы должны анализировать менделеевскую таблицу и дальше и глубже. Все то, о чем мы выше говорили, являлось лишь статической картиной мира, между тем все наши новые идеи, все наше новое понимание менделеевской таблицы находится в резком противоречии со статическими представлениями о природе. И чтобы перейти к этому более высокому по внутреннему содержанию этапу, современная наука рассматривает не только равновесную систему неподвижного нейтрального атома, — ее интересует главным образом поведение каждого данного элемента в разных условиях природы, энергетическая сторона его поведения, как заряженной, действенной системы электромагнитных полей. И изучение поведения заряженных частиц во всех областях мироздания, начиная с глубин космических тел и кончая холодными биосферами нашей планеты, открывает нам грандиозные картины истории элемента в мироздании, его перемещения, миграции в космосе, земной коре, живой клетке, в живом организме. И всюду открывая новые горизонты, периодический закон вносит свою закономерность и в область человеческой деятельности, начиная с технологии металлов и кончая тончайшими реакциями фототехники, являясь всюду и всегда надежным компасом для исканий.

Но и этот новый путь, на который стала современная наука в своем толковании периодического закона, — путь углубленного понимания элемента, как динамической системы, — является только новой ступенью в развитии открытия Менделеева. Мы еще только начинаем понимать новый этап развития системы элементов во времени, в истории космических превращений. Самое содержание клетки¹ элемента изменяется во времени и в пространстве в разных термодинамических условиях мироздания: и состав изотопов в самой клетке, и количественное соотношение между изотопами, и судьба каждого из них в отдельности и всех изотопов данного элемента, т. е. самого элемента, и переход радиоактивных атомов из одной клетки через две клетки налево или к следующей клетке направо, наконец, в результате раскола ядра — скачки атомов далеко вверх, налево по системе, с тем, чтобы найти свое новое равновесие через последовательный ряд превращений, идущих горизонтально слева направо.

Таковы те своеобразные пути, которые открыла современная наука о радиоактивности и превращениях элементов.

Целый мир, еще только начинающий раскрываться перед нами в грандиозных интервалах времени, протекает в условиях мощных магнитных полей в десятки и сотни миллионов гауссов, в условиях тепловых колебаний в сотни миллионов градусов, где самое понятие тепла получает новое качественное толкование. И именно этот мир является предметом изучения будущей науки. Там, в этом новом мире, в котором грандиозные эксперименты пытаются соревноваться с реально наблюдаемыми в космосе явлениями и масштабами, — там родится новая периодическая система, которая логически вырастает из самого закона Менделеева и из чисел Мозли как новый, еще более общий динамический закон мира: не абстрактные представления, в которые пытаются облечь глубокие методы и уравнения квантовой механики, а та, может быть, еще гораздо более сложная математическая зависимость, которая не управляет миром, а является формой выражения реально существующих в природе соотношений между материей и энергией в их неразрывном единстве. Так родится в науке будущий новый закон, о котором мечтал Рёзерфорд, когда он ждал прихода нового Менделеева для разгадки строения ядра, — не современная упрощенная модель скорлупы атома Бора, но еще более новая и совершенная модель новой электромеханики атома в целом.

¹ Периодической системы, в которой помещается данный элемент. — *Ред.*

Я кончаю свой анализ. Я заострил отдельные моменты новых представлений о периодическом законе Менделеева именно те, которые так тесно соприкасаются с диалектической концепцией Маркса—Энгельса—Ленина—Сталина. Я не пытался в сегодняшнем докладе шаг за шагом связать каждое отдельное положение с бессмертными идеями Ф. Энгельса. Я хотел нарисовать общую картину современных представлений, считая, что она в своем грандиозном целом есть лучшее выражение гениального провидения Энгельса.

Мы не должны забывать, что переживаем сейчас критические революционные годы в наших представлениях. Сменяются веки старых классических теорий, опровергнуты, казалось, незбылемые представления о неизменности и неделимости атома, отошли в прошлое законы независимого существования вещества и энергии. Динамически развивается новое мировоззрение, и диалектическая мысль причудливо сплетает воедино внешнее равновесие отдельных материальных систем с вечным их изменением, с постоянным и сложным вращением и движением элементарных частей материи.

В этот период совершенно исключительной ломки старых понятий, изменившейся картины звездного мира и земных глубин одна руководящая идея осталась на месте, и не только осталась как надежный маяк человеческих исканий, но еще ярче стала освещать запутанные пути человеческой мысли. Это — периодический закон Менделеева.

Казалось бы, что он должен был также разрушиться во время кризиса классических представлений химии и физики, казалось бы, что и он не должен был уцелеть, когда в корне изменилась идея атома или молекулы как простого упругого шарика, когда понятие валентности превратилось в представление о числе оторванных наружных электронов, сам элемент явился сочетанием десятка изотопов и в масштабах геологическо-космического времени потерял свое постоянство. И, тем не менее, периодический закон не только уцелел, но и превратился в гораздо более могучий рычаг и орудие научной работы, ибо из области химии его влияние распространилось на физику, на минералогию и геохимию: законы агрономии и технологии, с одной стороны, законы астрофизики — с другой, оказались связанными с периодическим законом Менделеева.

Почему же так случилось? Почему он сыграл, играет и будет играть столь незаменимую роль в истории науки? Я думаю, что ответ может быть достаточно определенный: закон Менделеева — не вымысел, а результат глубоких теоретических обобщений природных фактов, правильно сопоставленных друг с другом в определенной пространственной, хронологической и, как мы сейчас считаем, энергетической и генетической связи между собой. В нем ничего не придумано: в нем сама природа, в нем ее диалектика.

Окружающий нас мир вещества есть грандиозная менделеевская таблица, развернутая по своим периодам, разбитая на отдельные отрезки, согласно периодическому закону.

Будут появляться и умирать новые теории, блестящие обобщения будут сменять наши устаревшие понятия, величайшие открытия будут сводить на нет прошлые и открывать невиданные по новизне и широте горизонты — все это будет приходить и уходить, но периодический закон Менделеева будет всегда жить, развиваться и совершенствоваться!

Но при всей заманчивости этих перспектив я не могу на этом закончить свой доклад. И самый атом, и менделеевскую таблицу, и весь окружающий нас мир мы понимаем в свете учения о вечно изменяющейся природе. Мы требуем от нашего доклада не фотографии современных путей перио-

дического закона и не спокойно-эпического анализа путей эволюции, а воинствующей борьбы за эти новые идеи, призыва к беспощадной борьбе против косности старых представлений, призыва к новым, смелым, революционным подходам.

И на этом пути, который, по примеру Ломоносова, мы можем назвать «выявлением вечной ночью помраченных вещей и деяний на солнечную ясность», мы должны прежде всего поставить перед собой вопрос: на высоте ли мы в этой борьбе? Боремся ли мы за наследство Менделеева, за его новые пути с той страстностью и горячностью, с которой боролся сам Менделеев за свои выводы, боролся и огромной кропотливой будничной работой, боролся и постоянными исканиями новых выводов и новых идей? Я боюсь, что ответ на этот вопрос будет отрицательный.

В этой борьбе за новую науку, за новый взгляд на мир мы, химики и физики, натуралисты и техники Советского Союза, должны поднять знамя борьбы за научное наследство Менделеева как одно из величайших выявлений диалектического материализма, как могучий метод овладения природой, веществом и энергией.

Я не могу не кончить свой доклад призывом к этой борьбе не на словах, а на деле, к борьбе за этот светоч, освещающий наш путь вперед!

ПРИКЛАДНАЯ ГЕОХИМИЯ

ИНСТИТУТ ИМЕНИ М. В. ЛОМОНОСОВА И ЗАДАЧИ ЕГО УЧРЕЖДЕНИЙ¹

ВВЕДЕНИЕ

Настоящая книжка по своему изложению и самой постановке проблем обращена не к истории и прошлому, а к будущему; она должна пробудить новую мысль активной творческой работы в области интереснейших научных течений, перебрасывающих мост между химией и физикой, геологией и минералогией, между кристаллографией и химией, между химией Земли и астрономией, с одной стороны, и химией процессов жизни — с другой. Она имеет целью заострить ряд новых научных моментов, выросших в ходе работ академических институтов, и эти достижения и мысли вылить в конкретную форму больших проблем и определенных планов.

Но, будучи устремлена вперед, на строительство новой науки, новых институтов и новых форм их организации, она основывается на прошлом, на твердом сознании, выкованном в процессе 15 лет научной работы, что именно этот научный путь ведет к большим открытиям и достижениям в области выявления, изучения и использования нашего минерального сырья и что на большом и нелегком пути хозяйственного строительства на началах социализма, именно в подведении глубокой научной теоретической базы под основу хозяйства — его рудное и минеральное сырье — лежит одна из величайших и почетнейших задач нашей науки.

И поэтому мы считаем уместным издание этой книжки приурочить к празднованию пятнадцатилетия советской власти и к этому же сроку приурочить начало организации и самого Ломоносовского института, как выразителя этого нового течения, выросшего именно за последние 15 лет в Советском Союзе.

Вместе с тем это объединение научных учреждений мы хотим связать с именем М. В. Л о м о н о с о в а, первого мыслителя, внесшего свежую струю физики, химии и математики в старые геологические схемы и в рудное дело и ровно полтора столетия тому назад положившего начало идеям, осуществление которых мы видим только сейчас.

Что касается организационных форм Ломоносовского объединения, то автор лишь бегло намечает их в этой книге, поскольку этот вопрос находится в стадии обсуждения.

Ленинград
сентябрь 1932 г.

¹ Печатается по тексту, опубликованному в Трудах Инст. им. М. В. Ломоносова серия общая, 1932, в. 1.— *Ред.*

1. СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ГЕОХИМИИ, КРИСТАЛЛОХИМИИ И МИНЕРАЛОГИИ

В период перестройки целых научных школ, революционных построений идей физики и химии, в период полной переоценки ценностей в области наук гуманитарных ломаются границы между старыми дисциплинами, на их месте создаются новые научные течения, старые безжизненные схемы схоластики и морфологии сменяются динамически развивающимися представлениями о природе и ее судьбах в отдельных ее частях.

Такую коренную ломку переживает сейчас старая описательная минералогия, и из нее самой, из огромного накопленного ею материала, из законов природных кристаллов, еще недавно бывших просто «*lusus naturae*» [игрой природы], вырастают сейчас новые научные течения, которые врываются в химию, создавая кристаллохимию, в физику, намечая новые законы атомной физики, в геологию, открывая в ней целые области новых химико-геологических явлений, наконец, в науку о живом веществе, проводя новые методы и новый материалистический подход; рождается новая химия земной коры, и несколько неожиданно ее достижения и методы сближаются с проблемами геофизики и астрофизики, сливая весь космос с Землей и земной корой в геохимическое единое целое и распространяя законы земной коры на все мироздание (космическая химия).

И, охватывая таким образом самые глубокие проблемы строения вещества и распространения атома в мировом пространстве, эта новая научная мысль, пользуясь данными геофизики, метеорологии, почвоведения, геологии, физиологии, радиоактивности и самых разнообразных отраслей физики и химии, подходит и уже подошла к коренному пересмотру старого учения о полезных ископаемых, к разрешению ряда сложнейших и важнейших проблем горной промышленности, отвечая на вечно юный и старый вопрос, поставленный еще Агриколой в XVI столетии: «где какая руда?», наконец, она подошла к новым точным, математически оформленным законам, которые вносят новую мысль в технологию, в металлургию и препаративную химию, заменив старые эмпирические подходы строгими законами современной науки.

Вот об этих новых течениях минералогии и кристаллографии, рожающих геохимию и кристаллохимию, я буду говорить в нашей первой главе, но говорить лишь краткими отдельными мыслями и отрывками из истории современных идей.

Нам следует прежде всего достаточно широко осветить те большие проблемы, которые вскрываются перед современными науками геохимического цикла, и наметить основные линии их развития и то практическое значение, которое они имеют.

Идеи современной геохимии родились постепенно за последние годы и вылились в новую революционную дисциплину, постепенно отвоевывавшую все шире область знания. Если в былое время одна определенная наука могла объединять самые широкие проблемы, не распадаясь на отдельные части, если еще 100 лет тому назад наука о Земле объединяла в одно целое то, что она называла землями и камнями, и если потом она распалась на отдельные научные дисциплины: на минералогию, изучающую минералы; на геологию, изучающую комплекс природных геологических явлений, на петрографию, изучающую закономерные сочетания минералов, — то сейчас настало время еще более углубить эту дифференциацию нашей мысли и поставить в основу всех наших геологических и геохимических представлений еще меньшие

единицы, чем те, о которых мы говорим сейчас. Это должна быть такая единица, которая единым масштабом измеряла бы все процессы, происходящие в земной коре, которая лежала бы в основе всех природных явлений, которая объединяла бы геологические судьбы Земли и те явления, которые носят сейчас название геотектоники или геотектогенеза.

Действительно, настало время объединить все это единым масштабом, единым мышлением, одну единицу положить в основу всех наших представлений. Эта единица — атом, который при настоящем состоянии нашего познания природы мы считаем лежащим в основе всех наших природных тел. Вот судьбой этого атома и разных его типов в земной коре в условиях окружающей нас природы и занимается в первую очередь геохимия. Именно атом, таким образом, устанавливает связь между разнородными явлениями, ибо он, как основная единица, одинаково входит в разные части окружающей нас природы, одинаково строит и мертвый минерал и живую клетку, одинаково составляет нашу Землю как космическое тело и звезды, и поэтому наука о судьбах и поведении атома в природе является широчайшей дисциплиной, охватывающей целый ряд современных научных течений.

Я не буду развивать всех путей современной геохимии, ибо об этом надо было бы прочитать целый курс, вскрывая последние достижения этой научной дисциплины.

Я попытаюсь только выхватить несколько отдельных, более ярких примеров крупных геохимических проблем и на этих проблемах постараюсь заострить внимание и из них сделать выводы практического характера.

Я уже сказал, что задача современной геохимии — изучение атома в его перемещениях (миграциях) в земной коре как в природных естественных процессах, так и в тех процессах, которые лежат в основе деятельности самого человека. Отсюда намечается мост, который перебрасывается между природными геохимическими процессами и процессами технологическими, между самой природой, технологией и промышленностью. Мы изучаем в наших исследованиях не только самый атом и его свойства, но «изучаем законы его перемещения, законы совместного нахождения, законы рассеяния», т. е. процесса, обратного накоплению; а мы знаем, что именно процесс накопления или концентрации давно лежит в основе горного дела и образования рудных месторождений.

Я не буду останавливаться на том, что такое атом. Мы рассматриваем его как электромагнитный клубок определенного строения, в котором различаем внутреннее ядро и наружные электроны. Мы знаем, что количество отдельных атомов в земной коре определяется, во-первых, природой ядра, т. е. положительным электрическим зарядом этого ядра, во-вторых, как я показал в последнее время, и наружными электронами, которые тесно связаны с ядром, но целиком определяют и предопределяют его судьбу при геохимических перемещениях и перегруппировках. Внешние электроны и особенно электроны самых наружных орбит, так называемые валентные, определяют химические и геохимические черты и особенности атома, и от них зависит ход химических реакций. Отсюда мост между химической и геохимической проблемами.

Наша задача поэтому прежде всего сводится к тому, чтобы попытаться расшифровать поведение атома в отдельных природных явлениях, которые изучает человеческая мысль.

Среди многообразных явлений миграции атомов мы возьмем три отдельных примера. Во-первых, мы попытаемся просмотреть поведение атома в кристаллической решетке и сделаем из этого выводы практического

характера. Во-вторых, попытаемся посмотреть, каково поведение атома в охлаждающемся очаге расплавленной массы земной коры и, наконец, проанализируем, что делает этот атом на земной поверхности и каковы законы его распределения на поверхности.

Мы представляем себе каждый кристалл, каждую кристаллическую решетку как состоящую из атомов, расположенных в пространстве по строго определенным геометрическим законам. Таким образом каждый узел решетки определяется свойствами атомов и электростатическим равновесием между силами их электромагнитных полей, что и создает ту устойчивость, которую мы считаем особенно характерной для кристаллов. Совершенно естественно, что раз кристалл строится как равновесная система, то узлы всей системы должны быть в равновесии друг с другом. Если бы мы попытались извлечь из него одну точку, то мы нарушили бы равновесие и могли бы его восстановить только, если бы вместо старой точки *A* поставили новую точку *B*, которая справилась бы со своими задачами и установила бы такое же или сходное с прежним равновесие. Значит, атомы могут друг друга замещать в решетке, но на известных условиях. Совершенно понятно, что если атом *B* похож на атом *A*, то, вынув первый, мы легко поместим второй. В сущности из этого соображения вытекает вся современная геохимия в новом ее построении со всеми серьезнейшими выводами практического характера. Совершенно ясно далее, что в решетку мы сможем поставить вместо *A* атом *B* только в том случае, если последний обладает близкими размерами с первым. Если *B* значительно больше, чем тот кирпич *A*, который мы вынули, то этого нам не удастся сделать. Если же новое вещество *B* одинаково по свойствам с *A* и если, как мы сейчас говорим, радиусы их ионов близки, а влияние на общее электростатическое поле сходно, то мы легко эту замену можем произвести; все зависит от радиуса воображаемого вокруг атома шара — сферы действия электрического поля; таким образом в геохимии совершенно естественно появляется новое число — радиус иона, который в значительной степени определяет все законы нашей практической жизни, так как радиус иона в первую очередь намечает законы совместного нахождения отдельных химических элементов в земной коре. Если мы имеем решетку с радиусом двухвалентного иона железа $0,83 \text{ \AA}$, то совершенно понятно, что цинк, радиус иона которого немного меньше, чем $0,83 \text{ \AA}$, прекрасно уложится в эту решетку, сможет заместить закись железа, войти в тот же кристалл и создать столь же равновесную постройку. Труднее будет с магнием, радиус иона которого $0,78 \text{ \AA}$, но он тоже войдет в эту же решетку. Но не только эти металлы, принадлежащие к одной вертикальной линии менделеевской системы, но и совсем чуждый им металл, ничего общего не имеющих с ними по химическому составу, обладая сходным радиусом иона — литий (радиус $0,78 \text{ \AA}$), оказывается, тоже сможет заместить двухвалентное железо. Отсюда делается понятным целый ряд важнейших явлений, которые мы хотя и знали раньше, но не понимали. Мы давно знали литиевые слюды в рудных жилах, знали, что они всегда железистые, даже добывали этот циннвальдит для извлечения лития, но не знали, почему именно в рудных месторождениях образуется циннвальдит, а не другие литиевые соединения.

Таким образом, сама кристаллическая постройка определяет характер тех элементов, которые она может в себя включить; если некоторые элементы, которых вообще довольно мало, обладают абсолютно сходным радиусом иона с другими более важными элементами, то они не будут образовывать самостоятельных ячеек, а должны как бы обезличиться. Таковы, например, скандий и галлий — абсолютно обезличенные элементы; по

радиусу иона они близки — первый к магниевой, а второй к алюминиевой решетке, и поэтому совершенно понятно, что они всегда будут встречаться только в небольших количествах в минералах магния и алюминия, и мы не знаем таких условий, которые заставили бы их атомы соединиться вместе и образовать собственные решетки. Больших месторождений галлия, которые так нужны физикам, мы ожидать не можем, ибо это обезличенный элемент, у которого нет тех черт, которые нужны для его концентрации, и теперь мы знаем, почему это происходит.

Таким образом, законы решеток во многих отношениях определяют характер рассеяния и характер концентрации элемента. Больше того, законы решеток, вытекающие из размеров радиусов ионов, определяют ход самих химических реакций, и сейчас мы можем говорить, что кристаллохимические процессы больше регулируются объемами электрических полей ионов или атомов, чем их химическими и физическими свойствами.

Но возьмем примеры несколько более сложные и углубленные. Представим себе, что имеется сложная система из нескольких атомов: a , b , c , d . Она находится в равновесии, определенным образом улеглась в пространстве; выведем из нее один атом a ; мы этим нарушим электростатическое поле, и нам нужно это чем-то компенсировать. Как мы можем это сделать? Мы можем вместо a поместить вещество b , но близкое к a по объему поля, но мы можем также взять и вещества c и d , из которых c будет больше a , а d меньше a , и этим путем снова достигнем равновесия¹.

Я возьму в этом направлении один пример — апатит, который представляет равновесную систему между кальцием, фосфором и кислородом. Два основных вещества Са и Р как бы даны, они полностью насыщают друг друга и образуют равновесную систему, в которой $+$ и $-$ нейтрализованы.

Начнем замещать. Замещаем кальций, радиус иона 1,06 Å, и фосфор, радиус иона между 0,3 Å и 0,4 Å. Можно ли заместить кальций каким-либо другим веществом близкого радиуса? Можно; например, его можно заменить редкими землями, у которых радиус ионов доходит до 1,2 Å. Но чтобы уравнивать при этом поле, помещая такой большой атом, мы должны одновременно поместить атом поменьше, только тогда все выйдет гладко; для этого возьмем некоторое количество натрия, так как радиус иона натрия 0,98 Å. Теперь такую общую схему легче построить, так как мы скомпенсировали разницу в размерах ионов и одновременно с введением редких земель ввели и немного натрия. Отсюда разгадка одного до сих пор непонятного явления, о котором говорил Замбонини в целом ряде своих работ и которые мы хорошо знали по хибинским апатитам, где как раз мы видим одновременно с большим количеством редких земель и повышенное содержание натрия. А может быть, мы можем заменить и фосфор, или одновременно с введением редких земель компенсировать поле не по линии катионов, а анионов? Если мы возьмем радиус катиона больше, то нужно расширить сферу деятельности другого связанного с ним иона — аниона, т. е. фосфора. Возьмем вместо него ванадий. Какое получится соединение, если мы одновременно заменим в апатите кальций редкими землями, а фосфор ванадием? Мы получим редкоземельный ванадат — соединение, которое, оказывается, существует и которое, вероятно, можно получить искусственно. Таким образом, просто логически рассуждая, имея всегда в основе приведенную схему, необычайно легко себе представить строение ряда более сложных неорганических соединений.

¹ Этим путем мы приходим к очень интересным явлениям кристаллохимической компенсации, при помощи которой мною объяснен ряд геохимических и агрохимических явлений.

Совершенно так же решала раньше свои вопросы и органическая химия, предсказывая, какие можно получить новые соединения; вся современная органическая химия, и особенно красочная химия, создавала путем синтеза новые соединения на основе известной теоретической схемы. Сейчас в области неорганической химии мы переживаем такой же момент, и ныне можно предсказывать те минеральные соединения, которые кристаллохимически будут устойчивы. В одной из своих последних работ Гольдшмидт говорит о том, какие теоретически возможны германиевые соединения, которые он выводит из аналогии германия с кремнием, на основании совершенно аналогичных элементарных расчетов, которые я выше произвел для одного конкретного случая апатита. Оказывается, что действительно можно получить целый ряд новых германатов различных металлов наподобие силикатов. Больше того, можно заранее предсказать, какими они будут обладать свойствами, и еще больше, можно задаться определенными свойствами и для них подыскать соответственное новое устойчивое соединение сначала на бумаге, а потом получить его и экспериментально. Таким образом, этим путем не только дается логическое объяснение природным процессам, не только природные процессы анализируются на основании закона строения атома, но дается новая руководящая мысль, которая позволяет вести синтез неорганических соединений, синтез чисто технологический, так же, как органики вели его до сих пор исключительно в области органической химии. Отсюда, путем анализа электрических свойств атомов, мы получаем необычайно интересную методику по отношению к целому ряду технологических процессов, и несомненно, что технология сейчас должна решать свои задачи на основании учета внутренней структуры и внутренних законов вещества. Так, например, мы работаем над нефелином, над очень сложной кристаллической решеткой, которая состоит из щелочей, алюминия и кремния. Алюминий ведет себя в ней весьма своеобразно: $\frac{2}{3}$ атомов алюминия лежат особым образом и связаны скорее со щелочью; $\frac{1}{3}$ ведет себя иначе и связана с кремнеземом. Когда вы подходите к разрушению нефелина, т. е. к тому процессу, при котором используется данное соединение в технологии, тогда вы должны прежде всего встретиться именно с разными свойствами атомов алюминия; так это и оказалось: Н. И. Влодавцу, разрабатывавшему заводской метод получения из нефелина глинозема, удалось необычайно легко извлечь 66—70% атомов алюминия из нефелина; гораздо труднее оказалось это сделать со следующей третью, которая иначе расположена в этой решетке. Когда вы действуете на нефелин слабыми кислотами, вы заранее можете сказать, что $\frac{2}{3}$ глинозема будут легко извлекаться, а одну треть, может быть, даже не всегда удастся отнять от кремнезема и перевести в раствор.

Таким образом, самая элементарная методика технологии должна в будущем основываться на детальном, углубленном анализе строения вещества и на геохимическом и кристаллохимическом его анализе.

Технологическая мысль должна основывать свои новые методы на изучении свойств атомов, на изучении распространения в данном соединении различных примесей; они приводят к возможности предсказывать получение таких новых соединений, о которых мы до сих пор совершенно и не думали.

Но не будем уходить далеко в эту очень сложную и трудную область, которая сейчас развивается в самостоятельную научную дисциплину — кристаллохимию, а подойдем к более простым понятиям в области геохимии и остановимся на второй проблеме, проблеме поведения атома в условиях охлаждения земной коры.

Среди разнообразных природных процессов миграции, постоянного

перемещения атомов, одно явление представляет особый интерес и значение — это явление постепенного охлаждения расплавленной массы, или застывающей в глубинах, или вырывающейся на поверхность. Исключительно важные циклы геохимического перемещения атомов вызваны им, и оказывается, что большая часть минералообразовательных процессов, протекающих в твердой земной коре, связана именно с этой характерной реакцией постепенного охлаждения расплавленных очагов. Сами очаги очень различны: одни состоят из гранитных магм, другие из тяжелых базальтовых; химически они довольно разнообразны, но мы знаем, что природа и здесь идет в сторону более простого единообразного решения и что среди всех охлаждающихся очагов на земной поверхности 95 % по весу, приблизительно столько же, немного меньше, по числу занятых ими атомов, принадлежат к гранитным магмам. Гранитные магмы — кислые магмы — в сущности определяют в значительной степени судьбы миграции химических элементов на земной поверхности, и не будет ошибкой, если мы скажем, что больше 80 % всех природных минералов связано как раз с явлениями охлаждающейся гранитной магмы.

Вот эта охлаждающаяся гранитная магма и дает начало самым разнообразным ассоциациям природных химических соединений, и закон распределения в пространстве и во времени атомов, связанных с охлаждающейся магмой, является тем законом громадного геохимического значения, который определяет распространение главнейших металлов.

Я пытаюсь обрисовать этот процесс и указать те основные последствия геохимического характера, которые из него вытекают.

Когда охлаждается расплавленная масса под покровом каких-либо окружающих пород, то она делится на две части: часть расплава остается внутри его самого, сохраняя при этом известное количество летучих соединений, — это первая часть, называемая пегматитовым остатком, или попросту пегматитом. Другая часть объединяет значительное количество летучих соединений, которые выделяются из магмы, проникают в окружающие породы, поднимаются вверх, постепенно охлаждаются и дают начало целому ряду отдельных струй источников и газовых выделений. Первая, как бы нижняя, более тяжелая часть более тесно связана с самой магмой; верхняя часть носит летучий характер и образована летучими газами. Совершенно ясно, что если какой-либо элемент или какое-либо вещество обладает большей летучестью, т. е. большей упругостью пара, то при том давлении, которое господствует в изучаемом очаге, он будет раньше других и больше других стремиться вверх, выйти из обстановки расплава. Если же, наоборот, упругость пара невелика, он будет в ней оставаться. Значит, упругость паров будет одним из характерных свойств, определяющим характер миграции атомов при охлаждении выделяющегося магматического вещества. Таким образом, в зависимости от величины давления (ибо внешнее давление мешает его выделению) и от сочетания давления и температуры мы получаем характер распределения элементов вокруг охлаждающегося очага. Еще в 1847 г. Эли де Бомон нарисовал картину охлаждающегося гранитного очага. Он говорил о целом ореоле (*aurea granitica*), который окружает охлаждающийся очаг, и, не имея еще возможности точнее анализировать источники магмы, рисовал замечательно верную картину на основе большого опытного материала. Сейчас, благодаря исследованию Ингерзоля, мы знаем распределение температуры вокруг каждого очага расплава, а зная распределение температуры, знаем и распределение давлений, которые создаются для данного участка земной коры. Раз мы знаем эти две величины, знаем третью — величину упругости пара химических соединений данного элемента, то мы приходим к довольно

определенной и ясной картине. Оказывается, что химические элементы вокруг каждого охлаждающегося очага располагаются в закономерной зависимости, и их распространение совершенно определенно и следует определенным геохимическим законам. Именно, если мы начнем с более глубокой части охлаждающегося очага, то последовательно будут отлагаться: редкие земли, бериллий, торий, фосфор, фтор, литий; выше следуют: молибден, олово, вольфрам, золото, медь, цинк, свинец, серебро, кобальт, сурьма, ртуть и мышьяк.

Этот ряд является, с одной стороны, рядом эмпирическим, выявленным на основании громадного количества наблюдений; с другой стороны, он может рассматриваться и как ряд теоретический, устанавливаемый по данным анализа упругости пара тех основных соединений, которые образуются в условиях данного комплекса.

Этот ряд говорит о том, что химические соединения распределяются вокруг нашего очага с определенной зональностью; в вертикальном направлении эта зональность следует в определенном порядке, и на различных глубинах, на различных расстояниях от этого очага мы будем встречать преобладание тех или иных химических соединений.

Таким образом, возникает первый закон: вокруг каждого охлаждающегося очага образуется так называемый **г е о х и м и ч е с к и й** **к о н ц е н т р**.

Но не так обстоит дело в боковых частях охлаждающегося массива. Боковые части обладают несколько иными свойствами, и их довольно легко выявить, если перейти к физико-химическому анализу всей системы.

Начиная от верхней границы между магматическими расплавами и летучими пневматолитами, по направлению в сторону очага постепенно начинают выпадать средние члены. Сначала выпадают олово и литий, остаются бериллий, вольфрам — хорошо известное нам сочетание. Когда мы идем еще дальше книзу и в сторону, — исчезает фтор, пропадают олово и вольфрам, остается золото, — мы имеем слюдяные и золотые жилы (например, сибирские месторождения). Еще дальше остается бор, он соприкасается с медью и получают борно-медные месторождения, тот борно-медный комплекс, который нас давно интересовал и который характерен, например, для боливитских месторождений. Наконец, пропадают остальные средние члены рядов и остаются редкие земли, иттрий, фосфор, свинец и другие наиболее крайние правые члены нашего ряда.

Получается чрезвычайно интересная схема; она показывает, что два элемента — литий и олово — связаны исключительно с апикальной, верхней частью охлаждающихся расплавов. Вольфрам частично связан с верхами, фтор связан с той же точкой; золото, накапливающееся по сторонам массива, будет отсутствовать наверху, где накапливается олово, и т. д.¹

Мы можем, таким образом, нарисовать схему концентрации элементов вокруг охлаждающихся очагов и из нее сделать ряд выводов. Представим себе, что очаг размывается, и в зависимости от степени размыва мы имеем дело на поверхности Земли с той или иной глубиной, тем или иным центром, например, центром лития и олова. Когда размыв пойдет глубже и литий и олово окажутся снесенными, мы попадаем в более глубокие зоны — пегматитов, к корням процессов, где уже нельзя рассчитывать встретить все вышележащие концентры.

Больше того, если рассматривать эту схему в плане, наш расплав или массив представится или в виде кружка на поверхности Земли, или чаще

¹ Не нужно забывать, что одновременно с дифференциацией элементов идет и дифференциация пород, и мы получаем параллелизм между обоими рядами, объясняющий большие масштабы некоторых поясов.

в виде целого ряда горных хребтов, которые протягиваются вдоль тектонической линии, а геохимические концентры при этом или получаются в виде концентрических кругов (например, вокруг Блэк-Хиллс в США), или вытягиваются вдоль этой линии. Получаются громадные пояса вроде Хинганского или Южно-Китайского, где элементы следуют в определенном порядке и где, в зависимости от характера интрузий, отдельные месторождения связаны между собой определенными геохимическими законами.

Сейчас эта теория геохимических концентров получает весьма широкое развитие, причем она прорабатывается в настоящее время как по отношению к основным, так и щелочным магмам. Она позволяет совершенно определенно вести анализ рудных полей и делать те выводы, которые столь необходимы, когда мы работаем над анализом определенного месторождения или изучаем какой-либо целый природный комплекс. Но нашу задачу мы ставим не только качественно: цифры Ингерзоля дают возможность подсчитать количественно расстояние между вероятными концентрирами отдельных химических элементов. Получается так называемый *г е о х и м и ч е с к и й г р а д и е н т*, который я ввожу в наши геохимические представления. Благодаря ему мы можем говорить о масштабе расстояний между отдельными элементами при условии знания характерных черт нашего массива. Эти расстояния определяются сотнями, сравнительно редко тысячами метров и дают возможность установить довольно точное изменение рудного тела по мере направления как в глубину, так и по поверхности.

При громадном масштабе горных выработок, когда старые масштабы в сотни метров отошли в прошлое, когда отдельные месторождения разрабатываются на глубине 1000—1500 м, вопрос изучения химизма рудных тел в связи с глубиной делается совершенно необходимым. Возьмем один из самых глубоких рудников — Пршибрам в Чехословакии, где нахождение олова в рудах глубин объяснялось попаданием жести из коробок рабочих, и лишь позднее выяснили, что олово здесь получается из глубинного пинко-свинцового комплекса, который по своему концентру ближе к очагу. То же самое наблюдается в Садонском месторождении, где до глубины в 700 м наблюдается изменение в соотношении меди, цинка и свинца, с усилением первых двух.

Приведенный выше закон геохимических концентров имеет очень большое значение при изучении месторождений по вертикали, но еще большее значение он имеет по отношению к горизонтальному направлению. Когда мы не понимали указанного выше пропуска элементов, нам казалась непонятной та последовательность, которая, например, рисуется в Монголо-Охотском геохимическом поясе в работах С. С. Смирнова, где выпадает целый ряд элементов, а на западе выявляется золото. При этом параллельно распределению элементов идет и дифференциация пород, благодаря чему понятие геохимического центра оказывается применимым не только к отдельному магматическому массиву, но к целой магматической области. В сущности этот закон определяет пространственное распределение ряда элементов на земной поверхности и дает возможность гораздо глубже подойти к поискам отдельных рудных месторождений, особенно если геохимически дифференциация элементов будет увязана с дифференциацией магм, что очень тесно связано между собой общей первопричиной *о х л а ж д е н и я о ч а г а*.

Я на этом закончу вторую часть моего изложения проблемы анализа геохимического распределения атомов вокруг охлаждающегося очага. На основании физико-химических законов равновесной системы мы наметим картину распределения определенных элементов, дающую возмож-

ность вести разведочные работы с определенным учетом изменения комплексов элементов с глубиной и в горизонтальном направлении.

Третья проблема, которой я хотел коснуться и особенно заострить на ней внимание, — это проблема поведения атомов элементов в земной коре в связи с ее геологической и геотектонической историей.

Пользуясь вышеприведенными соображениями, мы сделали попытку проанализировать с точки зрения законов геохимии всю территорию нашего Союза и разбили его поверхность на районы в зависимости от тектоники и глубины концентрирования. Мы можем закрасить нашу карту разными цветами, в зависимости от этих идей, отмечая переходы от более высоких температур к более низким, от коренных процессов глубины к наиболее дистальным, отдаленным от очага, от расплавленных магм к более холодным или почти холодным растворам.

Бурый тон на наших картах пусть будет изображать наиболее глубокие корни процессов, серый тон — несколько меньшие глубины, зеленый тон будет характеризовать среднерудный комплекс, синяя краска наметит переход к свинцовому комплексу, что как раз отвечает моменту появления олова в пневматолите, красная краска изобразит наиболее высокие процессы, связанные с наиболее удаленными от центра частями нашей схемы, наиболее холодную часть, богатую летучими соединениями мышьяка, сурьмы и ртути.

О чем будет говорить такая таблица? Она покажет, каковы те наиболее вероятные природные комплексы, которых мы можем ожидать в каждом из отдельных районов. Если в Фенноскандии, на Кольском полуострове мы имеем преимущественно корни процессов, то соответственно нашей таблице мы можем сказать, что здесь наиболее вероятным будет тот комплекс, который характеризуется слабым развитием пневматолита.

Совершенно другую картину мы будем иметь, например, на Урале. Центральная часть Урала представляет собой металоогеническую провинцию, на основе которой строится крупная уральская промышленность. Это часть довольно глубинная, но не очень большой глубины, с металлами, мало дифференцированными, магматического генезиса, с преобладанием меди.

При движении к югу уральские процессы продолжают в район Тяньшанской системы, чем намечается как бы наружная дуга, огибающая с запада громадную область современного Казахстана, с развитием медного комплекса. После прекрасного анализа В. А. Обручева мы знаем, что далее к востоку проявляются свинцовые руды с серебром — благодаря чему наблюдается переход к более высоким концентраторам.

Но если мы таким образом характеризуем южные уральские дуги, то такая же концепция характерна и для металоогенеза северной части Урала, где вырисовывается полярный конец этой грандиозной дуги с аналогичным переходом к верхнему концентру. Когда два года тому назад на Восточно-Сибирском съезде я рисовал эту схему, я сделал предположение, что в северном своем конце уралиты будут напоминать полиметаллы Западного Алтая. Сейчас нам совершенно ясно, что вся система уралитов вырисовывается как совершенно симметричная правильная система, которая не только уже сейчас определяет горнопромышленную деятельность, но которая в значительной степени позволяет дать прогноз о тех промышленных центрах будущего, в которых мы будем строить тяжелую цветную металлургию будущего Урала.

От Урала мы переходим к Сибири, резко разделяющейся по линии Енисея на два совершенно разнородных мира, из которых западный отно-

сится к Атлантике и связан с атлантическими магмами, перебрасывая мост к породам Канады и Гренландии, и другой мир — тихоокеанский, уже с другими рудами, с другой металлогенией. Это деление не просто орографическое, это деление геохимическое глубочайшего значения, которое связывает Чукотский край с Аляской и по реке Мак-Кензи делит Канаду на две такие же резко отличные части.

Я не буду останавливаться на отдельных частях необычайно сложной картины геохимии Сибири. Я только хочу указать, что в том споре, который идет между двумя геологическими школами относительно Прибайкалья, «древнего темени» Азии, как говорил Зюсс, мы, геохимики, занимаем такую позицию: для нас совершенно очевидно, что байкальский комплекс пород глубинный, связанный с процессами большого давления и высоких температур, — пусть геологи примут это как один из факторов для решения своей задачи.

Для нас совершенно очевидно, что дальше за Верхнеудинском начинается новый геохимический мир; эта область молодых движений опоясывает с юга нашу территорию, врывается отдельными языками в отдельные части подстилающей ее платформы. Это район наиболее поверхностных процессов, в котором все глубинные части геохимических концентров скрыты в глубинах и господствуют лишь элементы наиболее холодных растворов: сурьма, ртуть, мышьяк. Мы знаем эти же молодые поверхностные концентры и в других местах: Закавказье с его характерными мышьяковыми соединениями, с ртутными месторождениями, молодой металлогенез в южной Фергане с сурьмой и ртутью, — все это области того же типа; с ними связаны в самих гранитах оловянно-вольфрамовые комплексы, которые характеризуют их с постепенным переходом к еще более молодому процессу Камчатки и побережья Тихого океана. Весьма вероятен загиб Монголо-Охотского пояса к северо-западу, в виде Верхоянской дуги, которая опоясывает большой Сибирский щит с северо-востока; с ней будет связан комплекс оловянно-вольфрамовых, мышьяковых, серебро-свинцовых соединений, которые сейчас мы можем предсказать на основании все той же схемы.

Попытка в широких мазках нарисовать физико-химическую схему Союза — это вместе с тем попытка предсказать линию наших поисковых работ, линию нахождения тех или иных химических элементов, ибо каждый элемент имеет свою собственную геохимическую историю и определенное место в сложном комплексе природных геотектонических явлений.

Конечно, в этой схеме, как и во всякой схеме, имеется ряд осложняющих моментов, имеются повторные процессы, которые видоизменяют старые, налагают на старые отложения, восстанавливают их по-новому, видоизменяют структуру. На всю эту схему ложится новая зональность земной поверхности, климатическая — послетретичная и отчасти, может быть, третичная, со всеми геохимическими процессами широтных поясов. Совершенно очевидно, что там, где несколько отдельных геохимических систем пересекаются или налагаются друг на друга, там возникает наиболее сильное и разнообразное оруденение, там накапливаются те или иные химические соединения и там оказываются наиболее интересные центры минерального сырья. Такие центры определяются прежде всего наложением двух или нескольких разнородных поясов с различной металлогенией. Отсюда понятная является чрезвычайный интерес к таким узловым точкам, где пересекаются, например, медно-сульфидные зоны с соляным поясом с его богатством солей натрия, магния и кальция, т. е. комплексом, позволяющим комбинировать два совершенно разнородные геохимические мира в единый промышленный комбинат.

Я не буду дальше останавливаться на выводах из такого геохимического анализа территории Союза. Я хочу указать, что поисковая деятельность должна строиться целиком на анализе таких геохимических схем; но мы должны прилагать эти идеи не только в широком аспекте общих построений, но и к анализу отдельных месторождений.

Новые геохимические идеи есть лишь способ диалектического мышления. Это — способ химического осмысливания природы, претворения застывших форм в динамические формы, изучение природы как сложной системы равновесия тех электромагнитных клубков, которые мы называем атомами. Нужно пытаться разгадать природу этих систем и их сочетаний и этим путем найти законы геохимии, из которых вытекает целый ряд крупнейших законов развития промышленности и хозяйства.

Таковы те идеи, которые нас сейчас увлекают. Я думаю, что нужно принять все меры, чтобы развить эти идеи, — а Советский Союз в этих вопросах является пионером. Каждый год меня убеждает в большом практическом значении этих идей, ибо геохимический метод позволяет экономить и время, и деньги, и силы, позволяет предсказывать, а в истории науки предсказание, умение из существующих фактов предугадать факты будущего, является одним из ее величайших достижений.

ВЫВОДЫ

Мы изложили последовательно три отдельных цикла идей. В первом — говорили о поведении элемента (атома) в кристаллической решетке, во втором — о поведении элемента в процессах земной коры и в третьем — о том, как распределены сейчас на территории земной поверхности отдельные элементы и образующиеся из них устойчивые земные постройки, т. е. минералы.

И этими тремя примерами, вырванными из сложного многообразия природных процессов, мы в сущности наметили основные пути в тех трех научных дисциплинах, которые сейчас нас интересуют и которые в сумме составляют единую химию земной коры: геохимию, кристаллохимию, как часть кристаллографии, и минералогию.

Нам осталось лишь очень кратко очертить области изучения этих трех дисциплин.

Геохимия изучает атом и его судьбы не только в земной коре и в Земле, как космическом теле, но частично и за ее пределами. Ее задачи — выявить основные черты тех 92 типов атома, которые мы называем элементами и которые составляют в разных сочетаниях природу и космос, во всем их многообразии. Количественное и качественное распространение отдельных элементов в средних числах для земной коры и для отдельных ее оболочек и процессов; законы перемещения (миграции), рассеяния или накопления элементов с образованием тех мест концентраций, которые мы называем месторождениями и на которых построено все наше горное дело; законы сочетания элементов между собою в различных условиях земной коры, ее оболочек и областей земной поверхности; законы участия элементов в построении почвы, горных пород, живого вещества и, наконец, законы использования вещества самим человеком — таковы основные задачи геохимии, как науки об истории элемента (атома) в земной коре.

Кристаллохимия и связанная с нею *кристаллография* имеют целью изучение строения кристаллического вещества путем установления законов поведения атомов в кристаллической решетке и законов связи между физическими свойствами вещества и его химическим составом. Являясь

в общей форме частью современной физики твердого вещества, кристаллохимия и кристаллография черпают свои основные эмпирические данные и факты из самой природы, по преимуществу из исследований минералогии, но, исходя из них, сейчас строят общие законы кристаллохимии, при их помощи решают новыми приемами технологические задачи и на основе новых представлений ставят опыты синтеза не путем эмпирического подыскивания подходящих условий и систем, но путем заранее обдуманной и подготовленной кристаллохимической комбинации; и что особенно ценно при этом, так это то, что, намечая получение новых синтетических соединений, кристаллохимик может, учитывая определенные свойства синтетической системы, искусственно получать вещества определенных технических качеств. И вместе с тем эти же идеи кристаллохимии и ее совершенно новые законы вновь прилагаются к законам распределения атомов в пространстве, объясняют распределение различных элементов в сложных путях природной кристаллизации и, таким образом, дают ключ к пониманию важнейших вопросов горного дела и учения о полезных ископаемых.

Кристаллография превращается в кристаллологию с двумя подразделениями — кристаллохимией и кристаллофизикой, и в конце концов именно ее законы — законы упорядоченной, закономерно рассеянной в пространстве материи определяют судьбы 99 процентов окружающей нас природы. В кристаллической решетке атом нашел еще более высокую форму своей организованности, и если в нем самом законы подвижных равновесий определяются планетарными системами эллиптических орбит электромагнитных клубков, то здесь статическое равновесие достигается прочной постройкой из сферических полей этих атомов, расположенных в пространстве по законам прямолинейной геометрии.

Наконец, третья наука, исторически первая и лишь последняя по характеру своего объекта — *минералогия* — изучает химические соединения земной коры, молекулы, кристаллические решетки, коллоидальные обломки этих решеток или аморфные тела, но в конкретных условиях земной коры. Много раз приходилось слышать о том, что минералогии больше нет и не будет, что ее заменит новая геохимия с ее широкими перспективами¹. Я хочу остановиться на этом заблуждении, так как нет никакого сомнения, что, наоборот, именно сейчас химия минерала получает совершенно особенное и теоретическое и практическое значение.

Мы имеем в природе совершенно определенную систему: атом — соединения атомов — закономерное сочетание этих соединений; первый — э л е м е н т — изучает геохимия, второе — м и н е р а л — изучает минералогия и третье — г о р н ы е п о р о д ы — изучает петрография. В то время, как старая описательная петрография перестроилась в обновленную живую науку — петрологию, подчинив свои явления законам физической химии, минералогия еще не сумела произвести внутри себя такую перегруппировку идей и методов, и, может быть, поэтому она кажется несколько устаревшей среди живых течений геохимии и петрологии. Но разве возможно из выше отмеченного ряда выкинуть центральное звено — молекулу — соединение — минерал, который неизбежно, как таковой, должен одинаково интересоваться и геохимию, ибо именно ее законы образуют минералы и из сочетания минералов создают породу. Но какую ошибку сделали бы мы, если бы решили выкинуть самостоятельное и углубленное изучение этого, как мы видим, центрального объекта, того минерального тела, точные законы строения и состава которого только и дают возможность понимать геохимические явления природы во всей их широте!

¹ Есть и обратные мнения, правда отсталых геологов, о том, что «геохимия есть испорченная минералогия».

Минералогия была до сих пор наукой описательной; только благодаря точности ее достижений, тонкому и детальному изучению свойств минералов, благодаря успехам систематики и изучения каждого отдельного минерального вида мы подошли сейчас к новым геохимическим проблемам. И мы не должны и впредь забывать роль и значение этого точного факта, так как именно он и только он, в сопоставлении с другими, двигает вперед научную мысль, и не должны умалять и в будущем огромное значение этого описательного подхода, столь часто в наши дни не признаваемого за науку. Но в минералогии, на фоне ее основных задач изучения минерала во всех его свойствах, начиная с кристаллических, физических, механических и кончая химическими, на фоне его изучения не как самодовлеющего тела, а как части единого неразрывного целого земной коры, мы сейчас намечаем целый ряд интереснейших и глубочайших законов.

Ведь минерал образуется из сочетания нескольких из 92 элементов Земли: почему же таких сочетаний нам известно всего лишь около 2000, да и из них обычными являются лишь 300 или 400, тогда как мы могли бы из 92 элементов получить такое число сочетаний, которое потребовало бы 28 нулей для его написания? Очевидно, что есть какие-то законы минералогии, которые ограничивают это число и которые вызывают в лаборатории земной коры строго определенные комбинации. Но пойдемте дальше. Минералы не разбросаны без системы или без порядка; подобно тому как есть законы геохимического распределения элементов, так есть законы распределения минералов. Законы сочетания и совместного нахождения минералов носят не только пространственный, но и хронологический характер и определяют ряд явлений, которые имеют кардинальное значение для использования и поисков полезных ископаемых.

Сейчас, благодаря применению ряда законов физической химии в сочетании с законами кристаллохимии и энергетического учения о кристалле, мы подходим к необычайно важной задаче: каждую природную систему элементов при данных условиях мы сможем скоро разгадать, предсказав те минералы, на которые она при кристаллизации распадется. Трудно даже оценить огромное техническое значение такого прогноза.

Наконец, из минералогии сейчас рождается особая ее ветвь — *генетическая минералогия* или *химия геопроцессов*. Здесь, путем применения законов геофизики и физической химии, создается настоящая точная наука о генезисе минералов, о законах их образования, накопления и распада, т. е. наука об истории химических соединений, аналогичная геохимии, как науке об истории атома.

Я не буду развивать дальше эти идеи, но уже из сказанного ясно, что и перед минералогией стоят проблемы огромного значения.

Итак, химическая мысль начинает пронизывать все дисциплины — минералогию, кристаллографию, геологию, геофизику, и в применении к Земле и земной коре эта химическая мысль делается *геохимической*, и ее идеи начинают подчинять себе установившиеся, казалось бы, уже понятия и разгаданные факты. *Геотектоника* вырисовывается как следствие геохимических и радиохимических процессов; *петрография* подчиняется геохимической мысли в широких постановках эволюции горных пород Боуэна, *геология* земной поверхности — старая динамическая геология, которая всегда читалась как занимательный роман, должна перестроиться на новых течениях точной химической мысли... Геохимическая мысль, словом, есть *метод мышления*, *врывающийся в самые разнообразные дисциплины*. В этом его огромное историческое значение на новых путях геологической работы, в этом его роль обобщающей единой мысли, объединяющей разнообразные научные тече-

ния и вливающей свежую теоретическую струю в те еще слабые научные течения, которые изучают вещество в его применении к промышленности и хозяйству.

Мы кончаем наше краткое изложение идей современных наук о химии Земли. Мы хотим снять заборы, которые отгораживают минералогию от химии и физики, от горного дела и геологии, и невольно вспоминаем прекрасные слова М. В. Ломоносова в книге «О слоях Земных» 1763 г. (стр. 220):

«Вот каковы земные недра; вот слои, вот прожилки других материй, кои произвела в глубине натура (т. е. землетрясения и огнедышащие горы.—А. Ф.). Пускай примечают их разное положение, цвет, тягость, пускай употребляют в размышлении совет от математики, от химии и обще от физики!»

И эта мысль о необходимости внесения в геологию точного мышления физика и химика, а в химию точной методики физика и математика—была руководящей идеей Ломоносова, которой он вносил чисто революционную мысль в старые мертвые схемы линнеевской науки.

«Ломоносов был велик не только идеями, которые опередили века, и синтезом, связанным с правильным объяснением тех или иных явлений природы; он был велик и тем, что стремился к точному познанию фактов и их тщательному и ясному утверждению» (Вернадский, 1914).

И сейчас именно с именем Ломоносова мы хотим сочетать то новое объединенное научное учреждение Академии Наук — Ломоносовский институт, где изучение недр нашего Союза будет строиться на гармоническом сочетании законов химии, физики, кристаллографии и минералогии.

К изложению задач этого Института я и перехожу в следующей главе.

II. ОРГАНИЗАЦИЯ ОТДЕЛЬНЫХ УЧРЕЖДЕНИЙ¹

Мы подошли к конкретным выводам. Исходя из современных течений минералогии, кристаллографии и геохимии, переплетающихся между собой по методам работы, по задачам и по области применения, и одновременно все более и более дифференцирующихся на отдельные дисциплины, по отдельным целям и идейным установкам, мы подошли к вопросу о необходимости в Академии Наук связать таким образом эти три дисциплины, чтобы найти в гибкой и вместе с тем единой их форме постоянные пути для углубления развития этих дисциплин не в оторванных от природы и жизни установках, а в тесном единении с проблемами горнопромышленного и технологического порядка. Мы считаем, что именно объединение трех выше указанных дисциплин, т. е. трех институтов—минералогического, геохимического и кристаллографического, вместе с обслуживающим их общим музеем, как орудием работы естествоиспытателя и живым вещественным памятником основных достижений и проблем геохимии, минералогии и кристаллографии, поможет удовлетворительно разрешить эту задачу, однако при непрепяном условии тесной увязки этих учреждений между собой и общей единой организации целого ряда обслуживающих учреждений.

Геохимический институт

В порядке намеченного развития понятий—атом и электрон—кристалл и химическое соединение — минерал — мы должны начать с Геохимического института, который, начиная с 1906 г., существовал как Минера-

¹ В свете современных проблем геохимии, кристаллохимии и минералогии. — Ред.

логическая лаборатория при музее Академии Наук, потом с 1922 г. был преобразован в Геохимическую лабораторию Минералогического музея, а с 1930 г. существует как самостоятельное учреждение Академии Наук.

Основные проблемы геохимии и те большие задачи, которые связаны с их разрешением, были уже освещены в первой главе; детальный обзор намечаемых работ, связанных с пятилетним планом развития культуры и промышленности, будет дан в следующей главе; здесь же мне необходимо остановиться на намечаемой нами структуре Института и на схеме его построения.

Мы делим паш Институт на два больших отдела: отдел теоретической геохимии и отдел геохимии прикладной. Нет никакого сомнения, что в сущности работа этих двух отделов переплетается необычайно тесно в их исследованиях, и потому обслуживание этих отделов нередко проходит через одни и те же лаборатории.

Первый отдел — теоретической геохимии — можно разделить на четыре отдельные составные части, а именно: 1) изучение отдельных элементов и их миграции как в самой земной коре, так и в тех условиях промышленности и хозяйства, в которых этот элемент принимает участие, 2) изучение ассоциации отдельных химических элементов в породах, минералах и отдельных месторождениях и законы распределения этих ассоциаций, 3) изучение поведения элемента в кристаллическом веществе и в решетке с выявлением тех законов, которые определяют поведение элемента в земной коре, 4) синтез новых соединений на основе законов кристаллохимии.

Для обслуживания этих основных проблем должен быть создан в составе Геохимического института целый ряд отдельных лабораторий и кабинетов. Мы перечислим эти кабинеты и лаборатории в порядке их расположения в том новом здании, в котором намечается развитие деятельности Геохимического института.

Химические лаборатории разбиваются на несколько групп: с одной стороны, мы выдвигаем массовую аналитическую лабораторию, которая давала бы большое количество точных, достаточно тонких анализов природных тел и могла бы таким образом давать ответы на те запросы о химическом составе тех объектов, которые изучаются отдельными лабораториями и институтами.

Вторая лаборатория химического характера должна быть посвящена тонкому химическому анализу в области совершенно определенных химических элементов. Здесь необходимо применение самых усовершенствованных современных методов химических исследований, и изучение аналитических вопросов в области таких элементов, как ниобий, ванадий, тантал, редкие земли, титан, должно составлять одну из важнейших задач этой лаборатории, совмещающей как практическое разрешение аналитических задач, так и теоретические методы научного исследования.

Третья лаборатория должна охватить проблемы физико-химического характера. Для нас совершенно ясно, что проблема геохимии в части поведения элементов в земной коре, распределения их в сложных коллоидальных системах поверхности и миграции их, особенно в коре выветривания, находится в зависимости от физико-химических условий, в которых элемент мигрирует и в которых мы можем найти ряд необычайно важных законов, до сих пор не изученных и в достаточной степени не учтенных. Как на пример проблем физико-химического характера можно указать на изучение роли pH при различных термодинамических условиях земной поверхности и влияния этого pH на осаждение отдельных химических элементов. Столь же значительным является

вопрос о роли коагуляции отдельных веществ и абсорбционных систем, в которых вещество следует специфическим законам, еще далеко не изученным.

Таким образом, весь цикл физико-химических работ при низких температурах должен быть поставлен в этой третьей химической лаборатории Геохимического института.

Четвертое место в области лабораторий химического характера должно принадлежать лаборатории синтетической. Новая методика, предложенная Гольдшмидтом для получения нового минерального соединения, уже сейчас дает в руки Геохимического института необычайно сильное средство для получения ряда новых веществ, значение которых в промышленности еще совершенно не оценено. Законы геохимии подсказывают те наиболее вероятные комбинации, в которых можно будет получать эти новые вещества, и создание такой синтетической лаборатории, в которой приходится работать, применяя водные растворы и используя действие высоких температур, является совершенно необходимым, как логический вывод из всех исследований геохимического и кристаллохимического характера.

Физические лаборатории. К физическим лабораториям мы относим прежде всего кабинет спектрального анализа. Эта лаборатория, уже имеющаяся в настоящее время в Геохимическом институте, должна быть всемерно развита и расширена, и опытно-спектроскопические работы должны занять видное место как в области качественного анализа природных соединений, так и в количественном учете ряда элементов путем применения новых методов количественного спектрального анализа, которые в настоящее время получили столь значительное развитие.

Второй физический кабинет должен быть связан с областью явлений радиоактивности и должен носить подсобный характер для выявления некоторых свойств разложения и миграции радиоактивного вещества, которые полностью изучаются в Радиовом институте.

Наконец, третьей физической лабораторией совершенно исключительного значения должна быть рентгеновская. В этой лаборатории должно проводиться рентгеноскопическое изучение, имеющее целью качественный и количественный учет распределения различных элементов в различных минеральных и геологических телах, а с другой стороны — рентгенометрический анализ, имеющий своей задачей выявление решетки с точки зрения поведения в ней отдельных элементов и выяснения структур тех геохимических объектов, которые изучаются в настоящее время в Геохимическом институте. Постановка этой задачи представляет совершенно исключительное значение, и поэтому укрепление рентгеновского кабинета, как части Геохимического института, совершенно необходимо. Но вместе с тем надо указать, что рентгеновский метод, делаясь одним из важнейших методов геохимического анализа, не должен явиться монополией Геохимического института. Мы настаиваем на том, что применение этого метода должно войти в задачу всех институтов Ломоносовского объединения, поэтому считаем правильным, чтобы Кристаллографический институт, а в будущем и Минералогический обладали своими собственными рентгеновскими установками, но с другими задачами и другой методикой.

Третий отдел лабораторий Геохимического института составляют *исследовательские кабинеты собственно геохимического характера*. В этих лабораториях должны составляться сводки минерало-геохимических данных по отдельным вопросам и по отдельным территориям; они должны быть связаны с работами отдельных научных работников Института и должны, таким образом, являться местом, где будут концентрироваться и дальше

обрабатываться литературно, графически и теоретически те данные, анализы и определения, которые выйдут из вышепоименованных химических лабораторий.

Но вместе с тем, отмечая эти три группы отделений, кабинетов и лабораторий в Институте, мы обобщили один из исключительно важных вопросов, который для геохимии представляет особое значение и который связан с подготовкой материала. Дело в том, что геохимия, имеющая дело с огромным количеством различных элементов, нуждается в колоссальных запасах исходного материала и в переработке этого исходного материала на более конденсированный концентрат, из которого возможно дальнейшее выделение определенных химических элементов; поэтому до того момента, пока природный материал поступит на геохимическое обследование отдельных лабораторий, он должен пройти долгий путь и должен быть определенным образом подготовлен для дальнейшего геохимического исследования.

Начнем с поступления материалов: прежде всего поступающий материал должен быть взят минералогически и геохимически грамотно, что далеко не всегда наблюдается и чем грешат наши лаборатории химического характера. При старой постановке определения, иногда необычайно детальные и сложные (химические и физические), нередко проводились на случайном материале, природа которого не давала правильного освещения самого процесса, не позволяла сделать правильный вывод. Необходимо, чтобы взятие проб для больших геохимических работ не носило такого кустарного характера, который был до сих пор, когда геолог или геохимик отказывал от обнажения маленький случайный кусочек горной породы, который не мог охарактеризовать процесс, происходивший в данном участке земли. Далее этот случайный кусочек поступал на измельчение, и на нем строились случайные выводы. Необходимо, чтобы поступающий в Геохимический институт материал брался в поле по всем правилам взятия средней пробы, выработанным современной геолого-разведочной службой, и чтобы для испытания в Геохимический институт поступали не отдельные кусочки, а большие количества, сотни килограммов или даже тонны материала. Этот материал должен соответственным образом дробиться, распыляться, обогащаться на установках в самом Институте, и на нем в дальнейшем должна основываться вся работа. Таким образом, мы подошли к четвертой группе лабораторий в недрах Геохимического института, а именно, к *ряду крупных установок политехнического и механического характера*, в которых можно было бы дробить, просеивать, отделять, обогащать, флотировать и всякими способами разделять природный материал. Это не требует создания целого Механобра, но необходимо, чтобы в самом Институте была небольшая мельница, сита, столы и небольшая флотационная установка для того, чтобы можно было всегда разрешить поставленную задачу в самом Институте.

Второй большой цикл вопросов Геохимического института, составляющий второй его отдел — *практический или промышленный*, всецело вытекает из работ вышепоименованных теоретических лабораторий и не требует длительного специального описания.

Прикладная геохимия складывается в настоящее время из четырех основных линий: первая — изучение геохимии отдельных элементов, имеющих практическое значение, в целях выяснения законов их распределения и концентрации рудных месторождений. Эта задача имеет свой специфический характер. Когда исследование касается строго определенного месторождения, где вопросы подсчета запасов сводятся к выяснению законов распределения элементов в известном пространстве на поверхности и в глубине,

тогда практика геохимической мысли требует применения всех законов теоретической геохимии, и несомненно, что в целом ряде случаев изучение отдельных месторождений на основе этих законов поможет разрешить ряд практических проблем.

Вторая задача прикладной геохимии связана с изучением геохимии отдельных территорий, т. е. с изучением распределения различных химических элементов в какой-либо области, во-первых, с целью нахождения мест их концентрации, т. е. мест возможной добычи, и, во-вторых, — с целью выяснения совместного нахождения различных элементов и возможности их комплексного использования. Эта огромная область изучения еще совершенно не охвачена теоретически отдельными институтами; она тесно примыкает к проблеме тектонических и топоминералогических работ и, таким образом, требует выработки совершенно специальных и специфических навыков поисково-геохимического характера. Именно в этой области Геохимический институт за последние годы не только создал специальные кадры геохимиков-разведчиков нового типа, но и добился весьма крупных результатов путем применения к определенной местности, к определенным тектоническим условиям законов миграции элементов. Блестящие результаты работ Д. И. Щербакова открыли целый ряд новых страниц в истории горной промышленности Ферганы и исследования А. Ф. Соседко в Кызыл-Кумах показали, что именно применение геохимических методов к изучению областей может принести совершенно исключительные результаты. Поэтому развитию именно этого отдела Геохимического института и его топоминералогическим исследованиям мы придаем совершенно особое значение, и, вероятно, именно в этом прикладном отделении Геохимического института мы сосредоточим главные новые кадры и новые силы.

Третья группа вопросов, связанных с прикладным отделением Геохимического института, это вопросы *технологического характера*. Конечно, мы определенным образом должны резко подчеркнуть, что задачей Геохимического института не является технологическое разрешение проблемы минерального сырья, и поэтому он ни в коем случае не должен брать на себя выполнение такого рода работ, которые выполняются прикладными институтами, как, например, Институт прикладной химии, Институт им. Карпова и т. д. На Геохимическом институте лежит совершенно определенная обязанность — внедрить новые методы геохимии и на конкретных примерах проработать применение геохимических законов для направления технологических процессов.

В моей «Геохимии» я излагаю длинный цикл вопросов, которые могут совершенно наново построить химическую технологию и поставить ее на почву точных математических законов, заменив ими до сих пор господствующие старые эмпирические. На примере нефелина и оливина мы видим, какое огромное значение для понимания направления технологических процессов играет кристаллическая решетка, и поэтому совершенно очевидно, что именно такого рода технологические работы, в особенности в области изыскания новых веществ или изыскания применения некоторых природных веществ к новой области промышленности, должны делаться не случайно, а на основе именно геохимического и кристаллохимического анализа. При этом мы подчеркиваем, что не только сама кристаллическая решетка определяет направление технологических работ, — в сущности процесс миграции данного элемента в земной коре нередко подсказывает то направление, которое должен получить данный элемент в промышленности, и поэтому в самом широком смысле применение законов геохимии может дать иногда совершенно неожиданное направление применению различных веществ.

Мы вместе с тем должны подчеркнуть и значение изучения промышленных процессов и миграции в них отдельных элементов, так как оно может дать пояснение ряда природных явлений, а также подсказать правильный взгляд на генезис целого ряда месторождений. Так как область новой геохимической технологии еще очень мало проработана, то совершенно очевидно, что на Геохимическом институте должна лежать проработка методики этой новой работы и, в частности, методики синтеза веществ с определенными свойствами, так как это вытекает из теоретических законов, о которых мы говорили выше.

Такова схема построения самого Института. Мы видим, таким образом, что сама работа строится путем комбинирования двух принципов: теоретического и прикладного. Она должна основываться, с одной стороны, на коллективной обработке материала, по конвейерной системе, с другой — на принципе химической и физической специализации отдельных кабинетов и лабораторий; только путем весьма согласованной работы отдельных частей этого сложного Института и возможно достижение тех больших результатов, которые являются совершенно очевидными при правильной постановке геохимических исследований.

Отмечая основные черты Геохимического института, мы не можем не отметить одну его характерную черту, которая заставляет несколько особым образом построить его прикладную часть. Речь идет о той связи Геохимического института, которую он должен иметь с ленинградской промышленностью и, в частности, с минеральным сырьем Ленинградской области и Карельской республики. Нет никакого сомнения, что если геохимические институты Урала, Средней Азии и Восточной Сибири в первую очередь будут обслуживать интересы своего собственного края в изучении геохимических проблем, то на Геохимическом институте Академии Наук лежит громадная работа по изучению прежде всего Ленинградской области, Карельской республики и Мурманского края. Исторически совершенно очевидно, что укрепление существующей геохимической ячейки произошло благодаря ближайшему участию Академии в разрешении апатито-нефелиновой проблемы Хибин и учету нужд ленинградской промышленности.

Отсюда вытекает ряд специальных проблем, что заставляет выделить вопросы геохимии Ленинградской области в самостоятельный отдел.

Здесь на очередь должно быть поставлено прежде всего глубокое геохимическое изучение самой территории на основе увязки законов геохимии с законами минералогии, метаморфизма, петрографии и тектоники древнего Фенноскандинавского щита.

С другой стороны, должно быть поставлено исследование геохимико-технологических проблем, связанных с новым сырьем, в частности с такими химическими веществами, как шунгит, дистен, диатомит, которые до сих пор еще недостаточно вошли в ленинградскую промышленность.

Наконец, Институт должен взять на себя внедрение геохимических идей в область геолого-разведочных исследований Ленинградского края и широкое установление связи между научным изучением сырья и его применением в промышленности.

Заканчивая изложение задач и структуры Геохимического института, мы должны подчеркнуть, что на нем, помимо указанных выше проблем и экспериментальных исследований, должна лежать большая задача литературного и идеологического характера. Речь идет не о печатании трудов Института, что должно быть само собою понятно, а о создании совершенно нового типа сводок и сводных материалов, которые мы объединяем под именем «Геохимии Союза». Вопрос создания «Геохимических справочников по

Союзу» является задачей не столько теоретического, сколько прикладного значения; она должна заключаться в составлении детальных очерков распределения и поведения отдельных 92 химических элементов в различных условиях земной коры на территории нашего Союза, и, конечно, такого рода описание должно вытекать из общей характеристики геохимии данного элемента, законов его миграции и поведения как в кристаллическом веществе, так и в разных условиях земной коры и земной поверхности. Издание монографий такого характера представляет необычайно важную и серьезную задачу, которая должна дать для каждого химического элемента его полную геохимическую характеристику и таким путем вложить в руки исследователя как бы руководство и для поисков элемента, и для разведок, и для прогнозов его распространения в глубину, и для разрешения технологических проблем искусственного получения из него тех или иных продуктов и т. д., и т. д. С другой стороны, изложение фактических данных о распределении того или иного элемента на территории Союза должно дать ценнейший материал для выяснения законов его распределения в отдельных типах горных пород в связи с отдельными тектоническими и минералогическими процессами Евразии. Эта задача должна неизбежно вытекать из экспериментальной работы, и мы надеемся, что в ближайшие годы Геохимический институт сможет выпустить несколько таких монографий, посвященных тем элементам, исследование которых входит в его пятилетний план.

Кристаллографический институт

Второй институт Объединения — кристаллографический.

Как видно из предыдущего изложения, проблемы кристаллографии частично очень близко подходят по своим задачам к вопросам геохимии; так же, как эти последние, они должны обслуживать интересы и минералогической науки, но вместе с тем в них самих заключено такое огромное количество новых установок и новых проблем, что необходимо их совершенно конкретно перечислить, указав характер этих задач и те отдельные лаборатории, которые должны входить в состав Кристаллографического института.

Основные проблемы, выдвинутые на ближайшие годы руководителями Института, следующие:

1. Изучение методики измерения кристаллов и, в частности, изменения внешнего вида кристаллов в зависимости от тех процессов, при которых шел его рост.

2. Изучение свойств кристаллов и в частности зависимости этих свойств от химического состава; в этом направлении необходимо поставить изучение электромагнитных свойств кристаллических веществ, приобретающих все большее и большее значение, изучение оптических свойств, наконец, изучение свойств геометрических и т. д.

3. Проблемы, связанные с экспериментальными работами по выращиванию кристаллов и изучению законов роста и растворения кристаллического вещества. Кристаллогенез приобретает в области практических проблем совершенно исключительное значение, и не только искусственное получение крупных кристаллов, но и методика получения вообще кристаллических образований в водных и неводных растворах, уничтожение теми или иными физическими методами двойниковых природных кристаллов и вообще воздействие на рост кристаллического вещества со всеми вытекающими отсюда последствиями — такова та огромная область экспериментальной кристаллографии, которая должна найти свое место

в стенах Кристаллографического института. Совершенно очевидно, что в этой области ему придется выйти из рамок исследовательской лаборатории и в нижнем этаже своих помещений создать условия возможно постоянной температуры для специальных установок по выращиванию крупных кристаллов.

4. Четвертая проблема, которая увязывается с вопросами прикладного характера, — это вопросы, связанные с природой кристаллических решеток. Этот вопрос приобретает доминирующее значение для объяснения структуры веществ, с одной стороны, и для объяснения равновесных систем из нескольких компонентов, с другой. Экспериментальное и теоретическое изучение кристаллической решетки есть одна из ближайших задач нашего Института.

5. Пятая проблема, вытекающая непосредственно из всех предыдущих, состоит из ряда вопросов прикладной кристаллографии. Область прикладной кристаллографии за последние годы необычайно широко развивается. Сюда входит не только задача получения монокристаллов, но и сложная задача изучения пьезокристаллических свойств, которые до сих пор были связаны исключительно с кварцем, но должны быть распространены и на другие минеральные объекты, как, например, топаз и т. д. Таким образом, изыскание новых пьезоминералов, получение монокристаллов особенных оптических и технических качеств, проработка новой методики использования кристаллов в разнообразных областях тонкой техники и механики составляют основную задачу этого важного отдела Кристаллографического института.

6. Наконец, последним отделом, тесно связывающим все предыдущие, является отдел рентгенометрии, который уже в настоящее время блестяще налажен в кристаллографической лаборатории Академии Наук и имеет целью разрешение самых разнообразных задач рентгеноскопической техники. Трудно сказать, каково будет и каково должно быть направление рентгенометрического кабинета Института, ибо здесь проблемы меняются с каждым годом; методика рентгенометрии, рентгеноскопии, рентгенографии разрастается, а широта проблем изучения строения вещества при помощи рентгеновского метода не позволяет даже предсказать те многообразные направления, в которых будет развиваться рентгеновская методика.

Из больших проблем, которые ставит Кристаллографический институт на первое место в ближайшие годы, является проблема изучения решетки кристаллического вещества, в частности некоторых специальных кристаллических объектов, изучение новых сплавов и законов равновесия металлических решеток и, наконец, применение рентгенометрии в различных областях прикладной минералогии.

Исходя из вышеприведенной тематики основных проблем Кристаллографического института, мы можем вкратце перечислить те учреждения, из которых он должен состоять:

1. *Кристаллографическая лаборатория.* Лаборатория гониометрии и изучения внешнего вида кристаллов. В этой области проблемы частично перекрываются проблемами минералогического кабинета.

2. *Оптический кабинет,* имеющий целью изучение как самой методики оптических исследований, так и применение этой методики к различным задачам кристаллографии и минералогии.

3. *Экспериментальный кабинет генезиса* с большой лабораторией постоянных температур для опытов кристаллообразования.

4. *Рентгенографический кабинет* с соответствующими фотографическим, спектроскопическим и вычислительным кабинетами.

5. *Кабинет прикладной кристаллографии*, где, очевидно, в ближайшие годы на первом месте будет стоять прикладное изучение электромагнитных свойств кристаллов.

К этим основным кабинетам нужно присоединить специальные мастерские по методике обработки камня. Хотя они имеют свою особую задачу — изучение методики техники обработки камня, тем не менее они непосредственно связаны с нуждами самого Института, так как попутно им придется изготавливать необходимые пластинки, призмы, шары, различные кристаллические вещества. В задачи подсобных мастерских входит как приготовление объектов для исследований, так и создание новых упрощенных аппаратов, на которых Кристаллографический институт строит свои исследования.

Таким образом Кристаллографический институт мыслится как учреждение, методологически и теоретически объединяющее соответственные работы в Геохимическом и Минералогическом институтах и вместе с тем ведущее работы по разрешению коренных вопросов о строении природных соединений и связи отдельных физико-химических и химических свойств кристаллов с кристаллической решеткой.

На этом мы кончаем описание структуры и задач Кристаллографического института; в его тематике мы подчеркиваем определенную связь кристаллографии с физикой и химией, и в основу построения Института кладется кристалл, как независимая система, которая закономерно построена «из телесных частичек — атомов». В этих словах М. В. Ломоносова намечено впервые слияние физики твердого вещества, химии и математики в единый научный комплекс.

Минералогический институт

Минералогический институт в составе Ломоносовского объединения должен в значительной степени изменить существующую ныне структуру и развить свои исследовательские и экспериментальные работы, которые до сих пор не могли в достаточной степени развиваться вследствие непосредственной связи Института с Минералогическим музеем.

Как и в других институтах, мы перечислим сначала те большие проблемы и задачи, которые лежат на этом Институте, а затем перейдем к выяснению его структуры и схеме организации его лабораторий и кабинетов.

Первой задачей Минералогического института является *изучение самого минерала как природного химического соединения*. Надо сказать, что за последнее время, вследствие увлечения теоретическими дисциплинами и новыми теоретическими проблемами, изучению минералов не уделялось внимания в достаточной степени, а между тем совершенно ясно, что все успехи современной геохимии и кристаллографии вытекают из того, что за 200 лет существования минералогии был накоплен огромный точный описательный материал, а сам минерал был охарактеризован точными математическими выражениями его свойств; сейчас мы знаем, что законы генезиса минералов и законы строения и связи свойств с решеткой, — все это вытекает из точного знания, не качественного, а количественного, его свойств. Поэтому мы придаем огромное значение правильной постановке в Минералогическом институте изучения и описания минерала как такового, и для этой цели считаем необходимым отвести целый ряд специальных кабинетов, которые позволят изучать свойства отдельных минералов, с одной стороны, и описывать минералы в их естественной обстановке, т. е. изучать минерал в определенной среде, — с другой. Опыт изучения минералогии Хибин показал, как сложно и долго протекает такое точное изучение данного тела, а вместе

с тем выяснил, что только благодаря детальному минералогическому анализу, например нефелина, удастся подойти к разрешению целого ряда проблем большого практического значения.

Второй цикл вопросов Минералогического института связан с изучением месторождений: исследованием природных сочетаний минералов на определенных территориях нашего Союза, изучением парагенезиса минералов, их совместного нахождения или взаимного исключения в отдельных частях изучаемой территории, т. е. целым циклом вопросов, который дает нам понимание процесса, положившего начало накоплению минералов в данной области. Необходимо детальнейшее топоминералогическое изучение определенных территорий, и в этом отношении основные проблемы уже заострены в моей «Геохимии России», т. I (1922).

Третьей задачей минералогии является изучение процессов образования минералов как вообще данного минерального вида, так и всего комплекса минералов, характерных для какой-либо определенной территории.

Совершенно ясно, что эта отрасль современной химии земной коры, носившая до сих пор название генетической минералогии, имеет совершенно исключительное значение и направлена на разрешение ряда проблем, особенно важных при оценке месторождения и прогнозе распространения полезных ископаемых.

В задачи этой отрасли минералогии входит изучение физико-химии каждого месторождения, описание и выявление всей минералогической ассоциации и сравнение ее с общими законами геохимического сочетания минералов, выяснение вероятной температуры и давления, господствовавших в данном районе, динамики развития минерального тела и всего последовательного хода физико-химических процессов, который позволяет на основе законов физико-химии дать каждому минералу точное толкование во времени и в пространстве и связать его с тектоническим прошлым, с одной стороны, и с геохимией месторождения, с другой.

Если таковы задачи в области минералогии отдельных территорий, то столь же разнообразны и сложны они по отношению к отдельным минеральным видам, где задача минералогического изучения сводится к выяснению равновесия данного минерального вида в природных и искусственных условиях и где, таким образом, на основе знания свойств и генетических условий каждого данного минерала должна быть дана его история в условиях земной коры.

Особое внимание в этих областях, очевидно, должно быть уделено Минералогическим институтом, с одной стороны, изучению мало исследованных процессов как в основных, так и в щелочных магмах, а с другой стороны, специальному минералогическому изучению районов Урала, Прибайкалья, Кольского полуострова и Закавказья.

Экспериментальная минералогия. К этому отделу мы относим тот цикл вопросов, который связан с изучением влияния на минерал различных внешних факторов, особенно температуры, давления, действия воды, угольной кислоты, а также целую группу процессов искусственного воспроизведения минерального тела путем применения как водных растворов, так и расплавов.

Экспериментальная минералогия за последнее время получила свое развитие скорее в области сочетания минералов горных пород, т. е. в интересах петрографических исследований, но совершенно очевидно, что ее необходимо поставить как интересную и важную область самой минералогии, открывающую ряд интересных промышленных проблем искусственного получения ряда природных веществ.

Составление минералогии Союза. Минералогический институт совместно с другими минералогическими организациями Союза должен взять на себя во всей широте составление столь нужной серии работ под названием «Минералогия Союза». В «Минералогию Союза» войдут, с одной стороны, монографические сводки по отдельным минералам, которые должны дать правильную характеристику данного минерала вообще и, в частности, описание его месторождений на территории нашего Союза. Такие сводки совершенно необходимы для дальнейшей работы по изучению полезных ископаемых, этой основной базы, на которой должно строиться применение минералов нашего Союза, и нужно со всей решительностью выступить за срочность составления такого рода изданий, которые до сих пор не были в распоряжении работников Союза. Совершенно очевидно, что этот вопрос должен быть коренным образом пересмотрен в ближайшее время, и сводки по минералогии должны быть составлены, изданы и даны в руки всех минералогов, практиков минерального дела, строителей нового горнопромышленного хозяйства, химиков, геохимиков, металлургов и т. д. Мы, конечно, мыслим себе составление такой сводки как работу научного характера, ибо она должна быть связана с продуманным собиранием всего разрозненного материала, критическим его анализом и оценкой и должна оттенить не только достижения в области исследования данного минерального тела, но и те проблемы, которые должны быть поставлены на очередь.

Вторая серия того же цикла должна быть посвящена изучению минералогии и геохимии отдельных территорий. Здесь должны быть сводки в районном разрезе, и Институт уже сейчас подготавливает ко второй пятiletке составление сводок по минералогии Урала, Закавказья, Средней Азии, Кольского полуострова и Прибайкалья, и в этом случае составление сводок он мыслит не как просто литературно-техническую работу, а как работу научно-исследовательского характера, связанную с описанием фактического материала, находящегося в Музее, и с организацией целого ряда специальных экспедиций¹.

Исходя из этого положения, мы можем наметить следующую схему построения Минералогического института:

1. *Кабинет кристаллографии* должен разрабатывать, главным образом, вспомогательные кристаллографические методы по изучению морфологии и строения природных кристаллов, гониометрию кристаллов и т. д.

2. С ним должен быть тесно связан второй кабинет — *кабинет оптических методов изучения минералов*, т. е. изучения микроскопического, в поляризованном свете, изучения коэффициентов преломления, двойного преломления и т. д. К этому кабинету относится очень сложная и интересная область изучения цвета минералов, которая еще совершенно не подвинулась вперед не только вследствие отсутствия методики оценки свойств цветности минералов, но и из-за отсутствия продуманных работ, посвященных анализу цветов минеральных тел.

3. Третий кабинет, который должен быть разбит на целую группу отдельных кабинетов, — это кабинет, посвященный изучению *отдельных свойств природного вещества*, а именно: твердости, весовых, магнитных, электромагнитных свойств, механических свойств и т. д. В этих лабораториях с помощью специальных тонких методов физического характера должно во всей широте проводиться изучение свойств различных мине-

¹ В этом отношении знаменательны слова Ломоносова: «Искусство показывает, что почти всякие земли свои особливые руды имеют и в повосысканных рудниках новые руды находят; о чем наши Российские, а особливо Сибирские рудные места свидетельствуют» («Первые основания металлургии», 2-е изд., 1794 г., стр. 35).

ральных тел, а также и выяснение их взаимной связи и вычисление точных коэффициентов физических констант природных веществ.

Наравне с этой группой кабинетов, посвященных изучению чисто физико-химических свойств природных кристаллов, должна быть построена группа химическая, состоящая из следующих кабинетов:

4. *Кабинет спектроскопический* не для целей детального спектроскопического анализа, что входит в задачи Института геохимии, но для быстрого разрешения ряда текущих вопросов относительно химического состава минеральных тел.

5. *Кабинет паяльной трубки*, т. е. быстрого метода анализа минерального тела и качественного его определения. Этот метод, огромное значение которого особенно интересно сейчас, дает возможность, не прибегая к сложному анализу, путем применения ряда специальных органических реактивов разрешать проблемы нахождения в данном веществе того или иного элемента.

6. Наконец, к химической группе учреждений должна быть отнесена *химическая лаборатория* не для тонкого химического определения, а для общего химического анализа минералов, количественного учета заключенных в них веществ и для предварительного определения некоторых наиболее сложных минеральных тел.

Таким образом, намечается целая группа кабинетов и лабораторий, которые составляют основу Минералогического института, к каковым должны быть присоединены, согласно вышеуказанной схеме, еще нижеследующие:

7. *Кабинет синтетической минералогии*, состоящий из отдельных помещений для синтеза водного и для синтеза при высоких температурах.

Затем ряд кабинетов для научно-исследовательского персонала, работающего по изучению отдельных минералов и отдельных минеральных видов, и, наконец, кабинет минералогии Союза, в котором должна быть сосредоточена основная картотека по минералогии Союза и отдельных его территорий и где должны концентрироваться все материалы по изучению минералогии Союза.

Нет никакого сомнения, что работы Минералогического института в области химико-минералогических задач должны быть тесно увязаны с исследованиями Геохимического института, а в области самой минералогии — с Музеем, с которым Институт должен быть близко связан как территориально, так и по тематике своих работ.

Мы видим, таким образом, что основная задача Минералогического института заключается в изучении минералов, с одной стороны, и изучении минералогии Союза, с другой. Такая задача была поставлена ровно 170 лет тому назад Ломоносовым, и, как видим, не разрешена до сих пор; невольно вспоминаются те резкие слова его записки 1765 г., когда он призывал царскую власть помочь ему в срочном выполнении этой задачи, и ставил ее, перед самой своей смертью, как первоочередную работу Академии Наук; среди сложной подготовительной работы он занимался не только выработкой систематики минералов, руд и земель для этой задуманной им «Минералогии России», но и выработкой русского научного языка и минералогической терминологии!

Завет Ломоносова не был выполнен, он должен быть выполнен сейчас Минералогическим институтом совместно со всеми друзьями минералогии — учеными Союза.

Музей

На первой Музейной конференции, почти 14 лет тому назад мне пришлось выступать 14 февраля (1919 г.) с докладом о характере и задачах на-

шего Музея. Тогда в бурно кипевшей деятельности по переустройству музеев, в новое идейное строительство вовлекались не только архаические по форме и по содержанию художественные музеи, но и музеи естественно-исторические, и в ряде докладов по Горному музею (проф. В. В. Никитин), по Музею Геологического комитета (П. И. Степанов) и Музею Академии Наук мы освещали задачи наших собраний и пытались наметить основные линии развития каждого из них. Сначала при настойчивом стремлении к переустройству и слиянию нам и самим не были ясны наши конкретные задачи, но в ходе конференции в порядке обсуждения наметилась ясная отчетливая формула, которая и сейчас, по-моему, должна явиться для нас руководящей.

Г о р н ы й м у з е й — для школы, для учебы, для развития знаний в массе молодежи и работников горного дела; **М у з е й Г е о л о г и ч е с к о г о м у з е я** — музей полезных ископаемых и, в частности, ископаемых богатств Союза; **М у з е й А к а д е м и и Н а у к** — музей научный, посвященный минералу и элементу вообще и построенный на основе минералогии и геохимии Союза. Вне этой формулы — долой параллелизм и повторение собраний, по этой формуле должно идти переустройство Музея!

И мы начали работать с того времени над внутренней организацией Музея, хотя и помещались тогда в одном небольшом зале и в двух-трех комнатках лабораторий. Со всею решительностью мы стали углублять установку этой конференции; уже в 1925 г. из 70 м² музей вырос в 500 м² с восемью залами, а сейчас ставится задача создать большой Всесоюзный Музей с полным отражением в нем минерала, с полной характеристикой бурно идущих процессов геохимии в динамическом анализе химической жизни одной шестой земной суши. И строя на этих принципах Музей, мы неизбежно и определенно должны были углублять и второе положение, возложенное на него конференцией, — быть музеем научным.

Эта связь с научным институтом, который органически вырос из Музея в истории нашего учреждения и который сейчас при новой постановке геохимических идей развивается в крупнейшее и самостоятельное учреждение, — эта связь налагает и будет всегда налагать на него определенные, своеобразные и специфические черты; его работа и даже его выставка должны быть тесно связаны с исследовательской работой, с ее исканиями, борьбой за новые идеи и проведением их в жизнь и в науку. А новые идеи геохимии должны именно с борьбой пробиваться в среду старого описательного научного мировоззрения геологов-формалистов! Без связи, и самой тесной, с научным институтом, без непосредственного выражения идей последнего мы не мыслим себе Минералогического музея, в противном случае он сделался бы мертвым учреждением, никому не нужным, какие бы изменения или улучшения мы ни хотели в нем провести.

Мне вспоминаются картины из прошлого нашего Музея — картины, красочные для характеристики той борьбы, которую нужно было вести за новые идеи.

4 сентября 1716 г. в то время еще не всесильный в Академии Шумахер просил об отводе двух каморок для прибывших из-за границы, по поручению Петра I, раритетов. Этим было положено начало кунсткамере, как первому общему музею России XVIII в. Но дело с кунсткамерой долго не ладится; спирт, нужный для нее, немилосердно крадут, с другой стороны, сгорает (в 1741 г.) алмазная мельница¹, связанная с нею; нужна была сильная рука, чтобы не дать развалиться новому делу и

¹ Организация алмазной мельницы была связана с получением «ясписов и цветных камней из Сибири». Из нее выросла Петергофская гранитная фабрика.

специально поставить отдел «каменной и змесь». Это был М. В. Ломоносов, который взялся за минералогические собрания, составил в 1745 г. их особый каталог и задумал составить минералогию России.

Но после смерти Ломоносова Музей лишь кратковременно оживал при акад. Георги (1785) и Севергине (1800), чтобы постепенно сойти почти на нет под влиянием чисто геологического направления исследований.

Проходит XIX век, и лишь в начале XX века Минералогический музей снова начинает оживать и при энергичной работе погибшего на ледниках Кавказа В. И. Воробьева, под руководством академика В. И. Вернадского вступает в новую полосу: с одной стороны, в нем самом закладываются те новые геохимические и генетические идеи, о которых мы говорили, с другой, при Музее начинается создаваться Исследовательский институт, сначала только маленькая лаборатория в 20 м², потом специальная радиевая лаборатория, как зачаток будущего Геохимического института.

С началом советской власти, т. е. 15 лет тому назад, проблема полной реорганизации Музея ставится во всю широту, огромное развернувшееся экспедиционное дело влияет в Музей ежегодно многие тонны научного материала; потребности хозяйства и необходимость подвести под него новую научную базу выдвигают и новые задачи перед музейным делом...

Если мы несколько отклонимся в сторону, вернемся к истории и посмотрим, как создавались и создаются минералогические собрания, то, может быть, тогда яснее будут для нас та роль и те задачи, которые должен преследовать наш Музей сейчас и в будущем.

Несомненно, после того периода, который пережили все музеи отдельных государств, периода накопления объектов по разным отраслям естествознания, наступил момент расчленения их по специальности, связанный с той постепенной дифференциацией научного познания, которая падает на середину и конец XVIII столетия. К этому времени и относится развитие минералогии.

После трудов Валлиериуса в Швеции минералогия постепенно становится самостоятельной наукой, с определенной систематикой, и это систематическое ее направление продолжалось и продолжается отчасти до настоящего времени. Уже к концу XVIII столетия был выработан определенный тип музеев, и если мы посмотрим на собрания конца этого периода или если возьмем каталоги отдельных музеев, например Британского или других, то увидим огромное сходство в их построении. Эти музеи отвечают общему систематическому порядку, по которому линнеевская школа располагает все мертвые объекты природы. И до настоящего времени все крупные минералогические собрания, включая новые американские, расположены по какой-либо определенной минералогической системе, которая является осью каждой минералогической коллекции, превращаясь в мертвые, безжизненные и мало понятные каталоги природы.

В то время как минералогия переживала так много различных изменений и развивалась в самых разнообразных направлениях, сами минералогические собрания оставались построенными по этому основному типу.

С 1910 г. в область минералогии вносятся новые течения. Эти течения, связывавшиеся раньше с вопросами горного и рудного дела, в настоящее время выливаются в более широкие проблемы, для которых минералогия вырастает за рамки описательной науки и превращается в науку исторического характера, изучающую не только объект, как известный результат идущих в природе процессов, но и самый ход этих процессов, то постепенное химическое превращение, которое изменяет земную кору и в результате которого получаются минералы, как определенные объекты процессов Земли. Эта новая постановка вносит новую струю во внутрен-

нее содержание минералогии и в то же время ставит новые задачи, значительно их расширяя, и перед минералогическим музейным делом. Именно с этой точки зрения необходимо посмотреть на характер существующих музейных собраний и попытаться наметить те характерные черты, которые должны носить такое минералогическое собрание.

До сих пор минералы привлекали к себе внимание своими внешними качествами, и я не ошибусь, если скажу, что в сущности среди частных собраний минералогические коллекции являются наиболее обычными, что любителей камня и ценителей, которые собирают камни, больше, чем любителей окаменелостей или любителей геологических или палеонтологических собраний. Эта любовь к камню является одним из условий, необходимых для создания больших государственных минералогических собраний и изучения самой минералогии, как основы горной промышленности.

Но большие минералогические собрания не столько должны отвечать задачам изучения природы, они должны прежде всего соответствовать последним научным течениям и быть их выражением. С этой точки зрения вопрос нового геохимического подхода к изучению земной коры требует своих собственных методов, своего собственного систематического расположения, иной оценки тех объектов, которые должны находиться в минералогическом музее, музее химика Земли, а не просто любителя камня, музея, отвечающем не мертвым формам, а динамически развивающимся процессам природы.

Возможно изучение распространения того или иного минерального вида совершенно независимо от его яркости и внешних качеств с целью выяснения, где и при каких условиях данный вид в природе существует. Для нас безразлично, что это невзрачный маленький кристаллик, который мы видим только в лупу, если он является отражением важного геохимического, а может быть, и целого геологического процесса. Еще недавно ничтожный порошок ратовкита из окрестностей Москвы привел к широким обобщениям в работах академика А. П. Карпинского.

Геохимическая постановка заставляет ценить ничтожный обломок углекислого никеля из известняков Поволжья, который лежит в музее в Казанском университете. Для систематического собрания этот кусочек углекислого никеля не играет роли, но кто вникает в историю процессов Русской платформы, в геохимическую историю никеля, для того такая находка открывает целый ряд новых интересных научных горизонтов.

Но при собирании тех или иных минеральных видов, тех или иных элементов природы, как элементов геохимического характера, мы встречаемся с большими трудностями — надо охарактеризовать во всей широте такого рода задачу, охватить химический процесс Земли во всем его разнообразии. Надо выделить известные топографические единицы и надо попытаться построить геохимическую схему, ограничив поле изучения определенным районом. Таким районом для нашего Музея является Советский Союз, и сообразно с этим в Минералогическом музее Всесоюзной Академии Наук представлены в первую очередь минералы Союза и сопредельных стран, т. е. те минеральные тела, которые находятся в том или ином виде на всей огромной территории нашей страны. Следовательно, при возможно полном выявлении минералов Союза достигается постепенно правильное решение нашей основной задачи — накопления материала для тех или иных геохимических выводов; в связи с этим находится и обработка такого рода материала, а подбор материала диктуется этими основными идеями. В этом направлении должно идти наше музейное строительство.

Но, вместе с тем, такое построение имеет еще гораздо более глубокий смысл: мы направляем все научные силы на подведение научной базы под хозяйственное строительство; даже наши теоретические идеи и проблемы в конечном итоге, иногда лишь в процессе длительного развития, мы подчиняем идее большого хозяйственного строительства страны на новых социалистических основах. И хотя наше музейное дело не преследует непосредственной цели систематического выявления наших полезных ископаемых, тем не менее в основе геохимической установки заложены те общие теоретические идеи и проблемы, которые во всей широте и глубине подводят фундамент под советское горное дело и его минеральную сырьевую базу.

Таковы те основные идеи, которые должны лежать в основе нашего Института и которые я приблизительно в таком же виде развивал почти пятнадцать лет тому назад в большом Малахитовом зале Зимнего Дворца, только что открытого советской властью для науки и искусств. Кончил я свое выступление следующими словами, которые цитирую по стенограмме:

«И мне кажется, что такого рода соображения позволяют в значительной степени смотреть спокойно на будущее нашего учреждения, так как в его основе лежит глубокая научная идея, и как бы ни складывалось ближайшее будущее, как бы ни тяжели были те условия, в которых в настоящее время это учреждение находится, тем не менее правильно взятая научная идея, если она действительно правильна, не может погибнуть и при всяких условиях найдет свою форму осуществления».

Действительно, значение основных установок оправдалось на деле, и уже сейчас мы подошли к тому моменту, когда можем и должны в своей работе принять новые организационные формы, так как старые оказываются недостаточными и узкими, не отвечающими масштабам и темпам хозяйственного строительства страны.

На этом я кончаю свое изложение истории Музея и намечаемых путей его развития. Мы считаем, что эти пути совершенно необходимы и диктуются самим ходом развития минералогических дисциплин и ходом развития нашей горной промышленности.

Музей Горного института — Музей Академии Наук — Музей Геологического комитета (сейчас ЦНИГРИ) — это не три случайных и конкурирующих между собой музейных учреждения, это последовательные этапы, следующие друг за другом и постепенно приводящие от общих понятий к минерале к пониманию химического процесса, который положил ему начало, и кончающиеся изучением тех результатов этих процессов, которыми пользуется в своей промышленности и в своем хозяйстве человек. Такое идейное построение должно быть проведено в жизнь не формально и внешне, а после глубокого продумывания существа имеющихся коллекций и распределения их в музеях согласно изложенным идеям. Академическое собрание должно вырасти в крупнейший научный музей минералогии и геохимии Союза, и он не должен стремиться сохранять у себя такие коллекции, которые не отвечают его основной идее — характеристике минерала и элемента от космоса до хозяйственной деятельности человека. Равным образом и другие музеи, в том числе и музеи наших высших школ (например Университета), должны были бы коренным образом пересмотреть свои собрания.

Таковы основные задачи Музея, как четвертой самостоятельной единицы нашего Ломоносовского института. Может быть, именно здесь, в области камня, мы ближе всего подходим к великим идеям Михаила Васильевича Ломоносова, который в последние годы своей жизни поставил одной из крупнейших государственных задач собирание и изучение минералов России.

Еще в 1740 г. он начал хлопотать о начале таких исследований:

«Собирать могут малые дети — рудоискателей во всякой деревне довольно, все не требуют никакого воздаяния, ни малейшего принуждения, но натуральным движением и охотой все исполняют, и только от нас некоторого внимания требуют», — писал он в Сенат при своем представлении¹. Идея не была им осуществлена, хотя он в 1763 г. снова писал: «Намерен для общего знания и приращения рудных дел во всей Российской Империи сочинить описание руд и других минералов, находящихся на всех Российских заводах; из чего б составить общую систему минералогии Российской и показать по физическим и химическим основаниям в предводительство правила и приметы рудным местам для прииску, много точнее, нежели по ныне известны, а печатание начнется в Генваре 1765 г.»².

Но этому великому плану смерть Ломоносова положила предел. И сама задача, блестяще поставленная Ломоносовым, осталась неисполненной.

Схема построения музея

Построение Музея не может представлять застывшую схему старых классификаций минерального мира, а должно отвечать той идее эволюции вещества и перемещения отдельных атомов, т. е. тех грандиозных явлений миграции элементов, которые приводят или к рассеянию вещества, или к его накоплению, называемому месторождением и используемому в горном деле. За последние семь лет Минералогический музей уже окреп и выработал свою схему и начинает выявление минерала и элемента с тех доступных частей космоса, которые устанавливают связь Земли с другими космическими телами, т. е. метеоритов (*первый отдел*).

Второй отдел посвящен самому минералу, но не в скучном систематическом порядке старых минералогий, а в живом показе разных стадий образования минерала, процессов его возникновения, начиная с глубинных магматических очагов и кончая его изменением в холодных водах поверхности или в живом веществе организмов. Каждый минеральный вид оживает в своей истории, и в таком динамическом показе минерал является не оторванным от природы телом, а частью единой и сложной в своих процессах природы и ее химических превращений.

Отдел третий вводит нас в понятие самого процесса, тех разнообразных и изменчивых форм, которые минерал принимает, тех процессов его роста и разрушения его прекрасных кристаллов или коллоидальных смесей, которые характеризуют разные условия земной коры.

Четвертый отдел, один из наиболее новых и интересных в своем построении, должен последовательно дать картину отдельных месторождений Союза, но расположенных опять-таки в определенном порядке эволюции геохимических процессов, начиная с образования месторождений в самих расплавленных магмах и кончая процессами земной поверхности с ее осадками солей в озерах, конкреций в морях и т. д.

Но и в каждом отдельном случае мы не даем сухого перечня минеральных тел: иллюстрируя картами, разрезами, photographиями и картинами, мы даем посетителю полное изображение минерала в его естественной обстановке, с породами, в которых он встречается, иногда даже и с

¹ Записка М. В. Ломоносова в Сенат в 1760 г. об исследовании России в минералогическом отношении. (Пекарский И. История Акад. Наук, II, СПб., 1863, 747—748).

² Воззвание к русскому обществу. «Известие о сочиняемой российской минералогии», 1763. Напечатано в кн. Билярского «Материалы для биографии М. В. Ломоносова». СПб. 1865, 625.

найденными старыми орудиями добычи и картами современной эксплуатации. Второй отдел уже сейчас занимает два обширных зала, но должен в новом помещении занять четыре зала, соответственно большим группам образования минералов: расплавленной магмы, пегматитов, горячих водных и газовых растворов и образований земной поверхности (гипергенной оболочки¹).

Далее минерал из природных условий попадает в руки человека в его хозяйственной и промышленной деятельности; если Музей Геологического комитета должен полностью отразить эту сторону в истории химических соединений земной коры, то мы должны лишь кратко наметить путь процессов, завершающих судьбу элемента в его истории, т. е. дать использование камня в разрезе прежде всего двух процессов: чисто механического (драгоценный и цветной камень, твердый и технический камень, декоративно-строительный) и чисто химического, с его превращением в новые соединения в различных отраслях промышленности (химической, металлургической, керамической и т. д.).

На этом кончался наш старый план Музея, давая вполне законченную картину миграции химических элементов от космоса до человека, исходя из анализа природных химических соединений. Но в новом построении мы к этому плану должны дополнительно наметить еще два музейных зала огромного значения, которые мы будем называть Менделеевским и Ломоносовским. Первый, как это можно заранее догадаться, должен дать картину периодической системы в природе, т. е. для каждого элемента в отдельности путем соответственной выставки отобразить его историю, начиная с глубин магм и кончая процессом не только его использования, но и рассеяния в руках человека — это должен быть зал геохимический по существу. До сих пор ни в одном музее Союза, Европы или Америки нет такого зала, оборудованного по такому принципу, между тем его значение очень велико не только для ученых химиков, которые реально, а не по книге, могут видеть сложные пути миграции данного элемента, но особенно для учащейся молодежи, которая, изучая химию, геохимию и геологию, в сущности совершенно не знает, как сложны судьбы и как многообразны типы соединений тех 92 химических элементов, из которых сложена не только наша Земля, но и весь космос.

Второй новый зал мы посвящаем имени Ломоносова — того, кто в замечательном предвидении особенно резко выделял самостоятельность и реальность атома и из него выводил идеи тех «телесных частиц», которые мы называем кристаллическими ячейками. Таким образом, впервые в истории науки зарождались проблемы кристаллохимии, и поэтому понятно, что мы должны посвятить зал Ломоносова кристаллохимии и кристаллографии, т. е. законам атома в природе. Здесь по разработанному нами плану вся сложность строения вещества, все формы расположения элементов, ионов и атомов в пространстве должны найти свое отражение в моделях, диаграммах, фотографиях и реальных объектах природы и химической промышленности. И не даром мы сопоставляем рядом два имени — Менделеева и Ломоносова, ибо прав был П. И. Вальден, говоря:

«Оба физико-химики, научные интересы которых сосредоточивались на вопросе о растворах. Оба философы-мыслители, с возвышенной точки зрения излагающие свою науку; оба, однако, практики-патриоты, всю душу стараящиеся приложить науку к реальной жизни, на пользу

¹ К этим залам присоединяются еще залы невыставочного характера, но содержащие коллекции, преимущественно подлежащие обработке.

родине»... «По объему трудов оба являются титанами, по силе научных идей — ясновидцами, опередившими свой век» (1911).

Такова схема построения Музея. Мы можем смело сказать, что среди всех минералогических музеев Запада и Америки нигде новые принципы минералогии и геохимии не будут проведены столь ярко и определенно, как в нашем Музее. Мы несомненно являемся новаторами в музейном строительстве и можем смело защищать огромное научное и просветительное значение музея нового типа, мы подчеркиваем «научное», ибо такой музей, тесно связанный с научной работой, не только должен отражать ее, но и идейно направлять научную мысль, должен быть не складом или архивом, а живым орудием, толкающим и возбуждающим научную мысль, путем сопоставления и сравнения намечая новые идеи, согласно старому выражению знаменитого натуралиста конца XVIII века Бюффона: «собирайте факты, из них родится мысль». Я говорю вместе с тем, что Музей должен быть просветительным, ибо он в своем построении от космоса до человека служит для проведения идеи диалектического материализма и на фоне показа динамики природы в самых, казалось бы, неподвижных ее частях ведет к новому диалектическому и динамическому ее пониманию.

Но Музей не есть просто ряд выставочных зал, Музей есть очень сложный научно-исследовательский организм и даже, если не говорить о научно-исследовательских институтах, с которыми он должен быть органически связан, с Музеем должен быть связан целый ряд вспомогательных и дополнительных учреждений.

Прежде всего Музей не может и не должен ограничиваться своими постоянными выставками, перемена и обновление которых хотя и должны систематически проводиться в жизнь, по все же не могут иметь временного и акцидентного характера. Между тем жизнь на каждом шагу выдвигает новые задачи и новые запросы: то прибывают новые коллекции из каких-либо местностей Союза, то в связи с работой над тем и с иным химическим элементом возникает необходимость выставить все его соединения, освещая их с новой, геохимической точки зрения, то проблема хозяйственного строительства в отдельных районах выдвигает необходимость выставки всех тех минеральных тел и их ассоциаций, которые встречаются в данной области и по которым можно сделать вероятный прогноз относительно всех полезных ископаемых района.

Такие частные задачи большого научного и практического значения могут осуществляться лишь путем устройства в р е м е н н ы х в ы с т а в о к в специальном помещении.

Далее, постоянные и временные выставки могут охватить лишь самые ничтожные части имеющихся коллекций, и по долгому опыту нашего музейного дела мы считаем нужным их подразделить на следующие типы:

1. Основное собрание, с выделением из него выставочных образцов.
2. Минеральный архив.
3. Дублетные фонды.

В основу Музея должно быть положено правильно географически и минералогически расположенное основное собрание, в котором должны быть подобраны минералы из всех известных в Союзе и наиболее важных зарубежных месторождений, и только часть его должна быть выделена для выставок постоянной и временных.

Но наравне с этим собранием должны быть при Музее организованы два крупных фонда, один — для научно-исследовательских работ, другой для обмена с другими музеями и учреждениями.

Первый фонд, который мы будем называть минеральным архивом, имеет целью создать запасы основных минералов Союза в

количествах десятков или даже сотен килограммов, а не граммов, с точным обозначением месторождения или места взятия образцов. Такой материал, минералогически точно охарактеризованный, должен быть в Музее всегда под рукой для исследований и испытаний в разных институтах Объединения. Важность такого архива можно иллюстрировать хотя бы тем фактом, что когда в 1932 г. понадобилось разрешить некоторые вопросы относительно кремневых гелей на примере оливина, то в нашем громадном Музее не только не оказалось возможным выделить несколько сот граммов этого минерала, но даже пришлось взять образец из монгольских, очень трудно доступных месторождений — и это при наличии почти чисто оливиновых пород на Урале и на Кольском полуострове.

Второй фонд — д у б л е т н ы й — имеет назначением обмен с другими музеями, составление коллекций учебных и специальных и вообще должен представлять очень крупный фонд, правильно организованный и достаточно мощный количественно и качественно.

Чтобы закончить наше изложение схемы Музея, мы должны еще остановиться на одном вспомогательном учреждении при Музее — о т д е л е к а т а л о г о в. Каталог Музея не есть только инвентарная книга для регистрации и проверки государственного имущества: это — могучее орудие научной работы и вспомогательное средство для охвата ряда научных и практических проблем. И тем более это важно во Всесоюзном Минералогическом музее, задачи которого сводятся к выявлению минералов и составлению «Минералогии Союза», как основы изучения его ископаемых богатств. Каталог должен не только давать точную справку о каждом данном минерале, связывать его с историей горного дела, со старыми каталогами собраний или с определенными экспедициями, он не только должен служить документом и оригиналом исследовательской работы, он должен дать возможность работать над минералогией Союза и сопредельных с ним стран. Для этой цели в специальных картотеках по минералогии и по месторождениям каждый желающий должен получить ответ о всех месторождениях данного минерала или о всех минералах данного месторождения, округа, района, республики. Наш Музей может гордиться тем, что за 20 лет работы именно эти каталоги служат блестящим орудием для научной работы и что вместе с картотекой литературы по минералам Союза мы в нашем Музее накопили ценнейший материал, доступный всем желающим охватить те или иные минералогические проблемы в нашем Союзе.

Общие и вспомогательные учреждения Ломоносовского института

Крупное исследовательское учреждение в области минералогических, кристаллографических и геохимических проблем не может идти вперед без хорошо обставленных и очень продуманно организованных вспомогательных учреждений. Больше того, именно в науках новых, с бурно развивающейся техникой исследования, совершенно необходимо двигать вперед не только реальные достижения данной дисциплины, но и методику исследования, так как мы знаем, что очень часто продвигают вперед науку не столько глубокие теоретические мысли, сколько новые методы овладения природой и ее частями.

Между тем методика современных работ, особенно в области рентгеноскопии и рентгенометрии, настолько бурно развивается, что исследователь рентгенолог должен иметь у себя под руками все технические

средства, чтобы во время эксперимента видоизменять аппаратуру и создавать и проверять новые методы.

Если таким образом технические вспомогательные учреждения делают сейчас важнейшей составной частью институтов, то столь же крупную роль в них начинает занимать и ряд чисто научных вспомогательных учреждений, которые развиваются нередко очень широко.

Мы можем следующим образом охарактеризовать ту сеть вспомогательных учреждений, которая должна быть в распоряжении Ломоносовского объединения для обслуживания всех его институтов и Музея¹.

1. **Н а у ч н а я г р у п п а:** чертежная, фотографическая, издательство (редакционный совет), научный кружок, библиографическое бюро.

Я не буду останавливаться на первых двух, общее значение которых вполне очевидно, тем более, что вопросы точного черчения являются необходимыми не только для нанесения уже готовых результатов, но и для решения ряда кристаллографических, кристаллохимических и геохимических задач графическим путем, нередко достаточно точным и вместе с тем очень быстрым. Что касается фотографии, то она должна быть связана с микрофотографией, с проекционной фотографией, специальной съемкой на киноплёнку отдельных моментов кристаллизации и созданием миперального архива наиболее интересных снимков объектов горного промысла.

Третий вопрос связан с редакционной техникой аппарата по издательству, который должен быть органически связан и содействовать Издательству Академии Наук в целом. Совершенно очевидно, что издание научных работ институтов, монографий и отдельных исследований должно вылиться в ряд серий трудов Ломоносовского объединения по геохимии Союза и в новый орган — живой, боевой и активный Вестник, который должен иметь целью быструю информацию об отдельных достижениях, работах в западноевропейских и американских журналах, о новых находках геохимического характера в Союзе и т. д. Издание такого органа 4 раза в год по 4—5 печатных листов совершенно назрело, и Геохимический институт уже подготовил в настоящее время программу столь необходимого издания, которое должно, таким образом, широко осведомлять о тех научных исследованиях по геохимии, которые в настоящее время имеются, давать библиографические сведения о новой западноевропейской литературе и характеристику бурно развивающейся геохимической научной жизни в самом Союзе.

Особенное значение мы придаем дальнейшему расширению в составе Института Библиографического бюро, которое за последние 10 лет уже создало блестящую картотеку, содержащую 100 тысяч карточек литературных работ, связанных с минералогией Союза, и в настоящее время дает за каждый год полную библиографию научно-исследовательских работ, касающихся минералогии Союза и отдельных его территорий. Это Бюро, во-первых, с успехом prepares «Минералогию Союза», во-вторых, дает возможность следить за текущей литературой и, в-третьих, по каждому району Союза дает справочную библиографию по годам. Значение такой работы оценено уже за границей, и в настоящее время на основе работ нашего Библиографического бюро составляются рефераты минералогических работ в Союзе для наиболее распространенного и важного минералогического органа за границей «Neues Jahrbuch f. Mine-

¹ Я не касаюсь чисто административно-хозяйственной и научно-организационной стороны, что предусматривается особым положением о Ломоносовском институте, которое ныне находится в проработке.

ralogie» и специальная сводка по годам выпедших в Союзе работ для «Mineralogische und Petrographische Mittheilungen».

Наконец, одним из живых и важных учреждений научного характера при Ломоносовском институте должен быть научный кружок, который, превратившись в кружок Ломоносовский, должен попрежнему носить несколько учебный характер, где можно было бы делать доклады о текущих работах, делиться впечатлениями о новых работах за границей и в Союзе, демонстрировать новые минералы и новые поступления и в жпвой бесхитростной беседе, чуждой официальных приемов наших больших научных обществ, готовить научную смену.

2. Ко второму отделу учреждений Института необходимо отнести просветительную деятельность, каковая должна быть значительно расширена по сравнению с тем уже значительным масштабом, который она приобрела при существующем Минералогическом музее. Эта просветительная деятельность должна охватывать руководство осмотром музея, к которому необходимо добавить организацию специальных докладов на основе музейного материала, характеризующих отдельные большие проблемы или актуальные вопросы геохимии и минералогии; вместе с тем она не должна ограничиваться осмотром только самого музея, но должна вводить посетителя и в научную работу институты, показывая те приемы, которыми ведется научное исследование, знакомя с отдельными сторонами геохимических, минералогических и кристаллографических работ, вводя его таким образом в самую гущу научных исследований. Наконец, просветительная деятельность не должна ограничиваться и этим кругом вопросов: на просветительном отделе лежит задача организации периодических съездов и конференций для переквалификации научной молодежи с устройством цикла лекций наиболее крупных представителей минералогической науки. С этим циклом лекций и конференций должны быть связаны совершенно забытые в последние годы геохимические и минералогические экскурсии, представляющие особый интерес и являющиеся прекрасной школой для молодых научных сил; таковой может быть экскурсия с соответствующей организацией лекций и демонстраций в Хибины, на Урал, в окрестности Москвы и т. д. Во всяком случае просветительное дело должно сделаться одной из живых организаций, и на нем должна лежать также задача издания путеводителей по музеям, институтам, кратких популярных изданий, касающихся вопросов геохимии и минералогии, и каталогов различного типа, предназначенных как для посетителей, так и для руководителей экскурсий.

3. Третью группу учреждений представляет длинный список различного рода подсобных мастерских, значение которых в таком большом учреждении с различными экспериментальными работами особенно велико; к тому же музейное дело при постоянной организации новых выставок и больших пополнениях требует целого ряда вспомогательных приспособлений и постоянной работы слесарной и картонажной мастерских. Поэтому организация при Объединении вспомогательных технических мастерских является одной из важнейших задач, на которую нужно обратить самое серьезное внимание; речь идет о слесарной и тонкомеханической мастерской, о столярной мастерской и картонажной, включая сюда и мастерскую кристаллографических и кристаллохимических моделей, стекловую мастерскую, препараторскую по изготовлению шлифов, препараточные мастерские по обработке камня и т. д. Необходимо, однако, иметь в виду, что помимо общих мастерских, при самом Объединении, очевидно, необходимо будет сохранить отдельные ячейки подсобного характера при отдельных институтах.

4. Совершенно самостоятельным отделом в общем списке подсобных предприятий Института должен быть отдел экспедиционной деятельности. Нет никакого сомнения, что экспедиционная работа Ломоносовского объединения должна быть значительно расширена и, вместе с тем, согласованно распределена в отдельных своих частях между отдельными институтами и Объединением. До сих пор экспедиционная работа в области геохимических исследований Союза, с одной стороны, велась в значительной степени бессистемно, случайно, а с другой стороны, масштабы ее были далеко недостаточны, а методы работы весьма устарели. Сейчас большие исследования геохимического характера требуют организации полевых лабораторий и полевых испытательных станций, требую применения новых методов передвижения, моторных лодок, самолетов, специальных видов автомашин и т. д.; наконец, вопрос связи экспедиционных отрядов с основными базами с помощью отправительных и приемных радиостанций представляет совершенно исключительную важность, — до сих пор эти методы совершенно не вошли в практику нашей экспедиционной работы.

Геохимическое изучение Союза, особенно в области поисковых работ и открытия новых месторождений, имеет исключительно большое значение в ближайшую пятилетку и потому требует создания при Институте специального центра, который взял бы на себя всю сложную хозяйственную сторону этого процесса.

5. Наконец, развитие геохимической и минералогической работы и сложная дифференцировка новых дисциплин заставляют особенно заострить вопросы кадров и принять все меры к соответственному пополнению отдельных институтов, с одной стороны, квалифицированными работниками, и, с другой стороны, молодыми силами аспирантов. Я подчеркиваю особенно необходимость усиления квалифицированного состава Ломоносовского института, ибо, как выяснилось на практике, затруднения в работе аспирантуры заключаются не в ее слабой подготовленности, а именно в недостаточном руководстве, в недостаточном количестве времени, которое руководители могут уделять аспирантуре и вообще в слишком слабом учебно-техническом надзоре со стороны самих учреждений. Это находит свое несомненное в зависимости от недостаточности научных кадров институтов и отсутствия должного количества квалифицированных работников. Таким образом, на отделе кадров лежат две серьезнейшие задачи: как можно более широко поставить эту проблему и вместе с тем подготавливать аспирантов и научных работников, посылаемых на время перекачификации из отдельных вузов и втузов Союза, втянуть их в деятельность самих учреждений и связать их с самой живой работой наших институтов.

6. Наконец, последний — шестой отдел, значение которого особенно велико, это в вопросе связи с базами, отделениями и филиалами Академии Наук. При современном разделении научных работ между центром и периферией, Академия совершенно определенно приступила к созданию на местах различного рода филиалов, начиная с широко поставленных научных институтов типа уральского и кончая опорными базами или станциями в отдельных частях нашего Союза. При этом создание геохимических и минералогических отделений является одной из наиболее важных, ведущих потребностей края, и поэтому неудивительно, что при организации почти всех филиалов в первую очередь возникал вопрос о необходимости учреждения при них соответствующих геохимических и минералогических институтов, лабораторий, станций и т. д. Блестящий опыт с Хибинской геохимической лабораторией при горной станции показал,

что это вполне возможно, но требует большого напряжения, особенно в области организации исследовательских работ на местах и привлечения туда соответственного квалифицированного персонала. Вопрос о внедрении геохимических идей в минералогическую службу Союза будет разрешен не только и не столько укреплением центральных учреждений, сколько внедрением этих новых методов поисков и разведок в самую гущу поисково-разведочных работ, ведущихся на местах, через органы Геолого-разведочного управления. Поэтому создание таких станций на местах является необычайно важным не только и не столько в интересах самой Академии, не только в интересах усиления геохимической работы, но и в интересах геолого-разведочных учреждений, для которых они должны служить вспомогательными базами химического характера, помогая им во всех сложных проблемах современной геологии и поисковых разведок.

На очередь в организации отдельных лабораторий и станций можно поставить следующее. На первом месте стоит окончание организации лабораторий Хябинской горной станции, которые носят определенно геохимический характер и в настоящее время особым постановлением президиума Академии Наук признаны частью Геохимического института.

На втором месте стоит создание и укрепление сильной геохимической станции на Урале, где проблемы геохимии выдвигаются с особой остротой в связи с ростом горной промышленности и где целый ряд важнейших и интереснейших проблем уральского хозяйства может быть разрешен лишь путем применения современных методов геохимии и кристаллохимии.

На третьем месте стоит организация небольших опорных геохимических лабораторий в следующих пунктах: на Байкале — при лимнологической станции Академии Наук, вторая — при Алмаатинском филиале в Казахстане, при Сталинабадском филиале Таджикистана и, наконец, с особой настойчивостью мы выдвигаем организацию геохимической станции на Кавказе, где вопросы геохимии приобретают, в связи с ростом специальной химической промышленности, совершенно особое значение.

К приведенному выше списку нужно прибавить еще одно учреждение, которое Академия Наук следовало бы включить в сеть своих научно-исследовательских институтов и связать с Уральским филиалом. Я говорю об Ильменском заповеднике с его прекрасной научно-исследовательской базой, которая за последний год, к сожалению, пришла в полный упадок и блестящая научная постановка которой сменилась работами узкопросветительного характера. Уральский филиал считает совершенно необходимым в своих южноуральских работах опираться на организацию геохимической лаборатории как раз на этой станции и охватить этим путем весь район Миасса и Челябинска, с другой стороны, — создать соответственное учреждение в Магнитогорске, где охват всего района как горы Магнитной, так и Халилова дает возможность разрешать ряд острейших проблем южноуральской промышленности.

III. РОЛЬ ЛОМОНОСОВСКОГО ИНСТИТУТА В СОЦИАЛИСТИЧЕСКОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ СОЮЗА

В громадных темпах и масштабах современного строительства огромную роль играет и будет играть минеральное сырье — руды, соли, строительные камни, нерудные ископаемые. Ни темпы поисков, ни успехи разведок, ни масштабы уже существующих выработок не могут обеспе-

чить полностью правильного, географически обоснованного и технически совершенного снабжения сырьем наших новых гигантов строительства. Поэтому форсирование изучения недр представляется нам задачей большого значения, связанной не только с количественной, но особенно с качественной стороной металла и химического продукта, освобождающей Союз от импорта и в целом ряде отраслей намечающей крупные статьи экспортного характера.

Несмотря на все достижения и новые формы организации геолого-разведочной службы, мы не можем считать эту задачу решенной; больше того, мы все более и более чувствуем разрыв между потребностями промышленности и состоянием геолого-разведочного дела. Этот разрыв между объектом изучения геолога и объектом использования хозяйственника является гораздо более сложным, чем это можно думать, и связан нередко с совершенно различным языком, на котором говорят, с одной стороны, геологи-разведчики, с другой — хозяйственники с их темпами, масштабами, промпланами и т. д. Хозяйственник требует сырья не в качестве геологического объекта, а как готовую техноэкономическую составную часть промышленного процесса, для которого должны быть даны не только количественные, но и качественные, технологические и экономические коэффициенты.

И до тех пор пока геолог, заканчивающий изучение какого-либо месторождения, не подготовит ему этих совершенно конкретных коэффициентов, практическое использование данного сырья не будет сдвинуто с места.

Вот почему мы считаем исключительно важным все те мероприятия, которые могут уничтожить или уменьшить наблюдаемый разрыв и привести к возможно большему сокращению сроков между открытием месторождения и его практическим использованием. Эти мероприятия весьма разнообразны, и к ним относятся усиление институтов, работающих над технологией сырья, как, например, усиление работ Института прикладной минералогии, с успехом работающего именно в этом направлении, вообще создание институтов по комплексному (вертикальному) изучению сырья от минерала или породы до конечного фабричного или заводского продукта, организация комбинированных предприятий типа горно-химических предприятий и т. д. Однако все эти попытки будут наталкиваться на отсутствие теоретических данных, которые позволяли бы связывать свойства природных соединений с технологическими процессами, которые давали бы в алгебраической форме ряд таких закономерностей и положений, которые могли бы легко быть переложены в процессе работы на конкретные коэффициенты. Под широкое изучение и использование минерального сырья должна быть подведена прочная теоретическая научная база, которая одна позволит поставить проблемы во всей глубине и ширине и постепенно приведет к уничтожению того разрыва, о котором мы говорили выше.

Мы видим эту теоретическую сторону именно в новой постановке всех проблем цикла наук минералогии, кристаллографии и геохимии и в углублении их изучения на основе новых идей физико-химии, геохимии, космохимии, кристаллохимии и кристаллофизики. В моей «Геохимии» я подробно разбираю практическое значение этих новых подходов как в области поисков, разведок, так и технологии сырья.

Мы глубоко убеждены, что именно в этом новом направлении минералогии и геохимии, в этом проникновении химических идей в горное дело и в геологию лежит будущее наших наук и их значение для народного хозяйства.

Именно в новом типе его построения, с огромными масштабами и с комбинированным производством, лежат те специфические стороны научно-технической работы, которые могут влить новое содержание и новую мысль в промышленный процесс.

Мы глубоко убеждены в том, что минеральная технология ошибочно замкнулась в строго определенный круг полезных ископаемых и оторвалась от новых геохимических проблем и достижений. Старые традиционные приемы обработки, старые требования к сырью и его маркам, старые замкнутые процессы оторванных друг от друга капиталистических производств — такова картина современной минеральной технологии, которую нужно решительно революционизировать новой научной мыслью.

И создавая наше Объединение — Институт имени Ломоносова, мы хотим в нем выковывать ту новую геохимическую мысль, которая во всей широте и глубине современных ее достижений может решительным образом направить наши науки и их приложение на путь новых достижений огромного научного и практического значения.

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ И МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОИСКОВ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ¹

«Вот факты земные недра; вот слои, вот прожилки других минеральных материй, кои произвела в глубине натура... Пускай примечает их разное положение, цвет, тягость, пускай употребляет в размышлении совет от Математики, от Химии и общей от Физики!»
М. Ломоносов².

ОТ АВТОРА

В последние годы значительные успехи в изучении строения и состава земной коры были достигнуты благодаря развитию и применению новых методов исследования. Особое место заняли по праву методы геофизические, при большом разнообразии методики и эффективности применения ставшие сейчас необходимейшим орудием геологической работы и геологической разведки полезных ископаемых. Менее проработанными являются методы химического характера, основанные на применении закономерностей геохимии, физико-химии, радиохимии и т. д. Эти методы стали разрабатывать только в самые последние годы, причем наравне с попытками их применения на практике шла и чисто теоретическая разработка самих идей, накопление фактов и их обобщение.

Эта работа неизбежно придавала на первое время молодой геохимии несколько отвлеченный, теоретический характер и не позволила более успешно и целеустремленно направить геохимическую мысль на совершенно конкретную полевую, поисковую работу. Тем не менее за последние 10 лет, особенно в нашей стране, накопился огромный фактический материал, многочисленные геохимические экспедиции собрали большое количество наблюдений и доказали, что применение идей геохимии к практическим проблемам поисков и разведок весьма эффективно и что геохимия при выявлении ископаемых богатств займет весьма видное место, если она будет умело сочетаться с данными геологического (в первую очередь тектонического), петрографического и стратиграфического характера.

Именно это и заставило автора попытаться в настоящей работе дать сводку как своих личных наблюдений за многие годы исследований, так и опыта, накопленного товарищами по научной работе. Книга должна быть доступной геологу и геохимику в полевой обстановке; изложенное в ней должно вытекать из данных современной геохимии и минералогии и возможно конкретно и просто освещать те практические и теоретические задачи, с которыми встречается исследователь при поисках полезных ископаемых.

Как первый опыт полевой геохимии она грешит схематичностью, недостаточной конкретизацией, чрезмерным обобщением и потому упрощением ряда природных явлений³.

¹ Печатается по изданию Акад. Наук СССР, 1940. — *Ред.*

² О слоях земных. Прибавление 2-е к «Первым основаниям металлургии», 1763 (2-е изд. 1794, стр. 220).

³ При дальнейшей ее переработке необходимо исправить два несомненных упущения — отсутствие конкретных примеров в специальной главе об организации химической работы в поле.

Работа, наверное, грешит еще многими другими дефектами, очень многое в ней упущено, ряд положений требует проверки и развития. Без критики многих тысяч исследователей, без широкой общественной помощи нельзя и думать об укреплении новых практических путей современной геохимии.

Хотя ряд практических советов и предложений об организации и характере полевой работы геохимика и минералога дается в последней главе, все же я не могу не закончить двумя общими пожеланиями.

Распределение полезных ископаемых и отдельных элементов зависит от очень многих причин, и потому те геохимические закономерности, которые выведены нами, не носят такого абсолютного характера, как, например, определенный вид раковины моллюска для стратиграфии осадочных отложений. Наши выводы намечают лишь статистически наиболее вероятные сочетания элементов и минералов; природа в своих проявлениях много разнообразнее налагаемых на нее схем, и нередко наибольший теоретический и практический интерес связан как раз с отклонением от типичных схем.

Поэтому работа геохимика в поле заключается, с одной стороны, в отнесении месторождения к определенному типу геохимических явлений, а с другой, во внимательном и вдумчивом выявлении тех специфических черт и особенностей, которые отличают данное месторождение от сходных образований.

Второе замечание или совет касается умения ценить и наблюдать факты — сами природные явления.

Для естествознателя факт, правильно наблюденный, точно описанный и продуманно сопоставленный, определяет успех.

Теоретизирование без точных фактов ведет к голым и вредным схемам, нагромождение выводов без критического анализа фактов — к легкомысленным обобщениям и часто в практических вопросах к весьма нежелательным последствиям.

В этом отношении М. В. Ломоносов сказал бессмертные слова:

«Из наблюдения устанавливать теорию, через теорию исправлять наблюдения»¹.

Москва

10 марта 1939 года

ВВЕДЕНИЕ

РОЛЬ И ЗНАЧЕНИЕ ПОИСКОВ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ В СССР

ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ

Под «поисками» в геологии мы подразумеваем полевые геологические и геохимические исследования, имеющие целью отыскать скопления того или другого полезного ископаемого или химического элемента в таких количествах и в таких условиях, которые могут обеспечить его практическое использование для нашего народного хозяйства.

При таком определении бросается в глаза, что задачей поисков является отыскание так называемых промышленных месторождений полезных ископаемых, причем сама оценка полезности или промышленной ценности зависит от целого ряда условий, в которых данное полезное ископаемое

¹ О слоях земных, 1763.

встречается, и от тех технических и минералогических свойств, которыми оно наделено.

Поисковые работы не являются какой-либо особой областью науки, в которой могут работать только опытные геологи или минералоги; они могут и должны привлечь к себе широкие круги всех тех, кто хорошо знает свой край, исходил его в разных направлениях, у кого наметан глаз на особенностях строения, структуры и цвета скал и горных хребтов.

Сейчас в нашей стране, в связи с широко поднятым лозунгом о необходимости ее всестороннего изучения, вопросы поисков привлекли внимание очень широких кругов местного населения; теперь их ведут не только геологические партии центральных ведомств, различные геологические учреждения, но и местные хозяйственные организации, краеведческие общества, музеи, отдельные краеведческие, любительские, комсомольские организации, кружки школ, группы любителей природы, юных натуралистов и т. п.

Таким образом, поиски сейчас в нашей стране сделались массовым явлением и потребовали особого внимания и руководства со стороны тех геологических кругов, которые раньше одни занимались этим делом.

Поэтому сейчас явилась особо острая необходимость сведения всех опытных данных, которые могут помочь местным работникам в их поисковой работе, дать руководящую методику и наметить пути практической полевой работы.

Раньше открытие новых полезных ископаемых делалось совершенно случайно. Передко в течение многих десятков лет о том или ином месторождении знали местные любители, учителя или практические работники, и только при случайной встрече с геологической партией или более опытным исследователем эти открытия выявлялись и привлекали к себе внимание промышленности.

Никаких практических методов, в сущности, не было, и недаром еще в XVIII веке Ломоносов указывал на необходимость подъема изучения нашей природы в целях поисков полезных ископаемых. Но, тем не менее, до самого последнего времени мы не располагали сколько-нибудь продуманным методическим исследованием, которое выполняло бы эту задачу¹.

Правда, в капиталистическом мире за последние 25 лет создалась даже специальная профессия так называемых геологов-проспекторов, которые по поручению отдельных фирм разъезжали по разным странам и, обладая большим опытом и навыками, собирали сведения у местного населения и нередко приходили к открытию новых месторождений.

Также проспекторы оставили нам в американской и немецкой литературе целый ряд отдельных полуфантастических, полуавантюристических рассказов, из которых мы видим, что движимые обычно стремлением к наживе проспекторы в ряде случаев действительно открывали новые месторождения или даже гибли в поисках золота, вольфрама или драгоценных камней.

В помощь таким проспекторам, особенно в Америке, появился ряд практических изданий, имевших целью облегчить им поиски отдельных полезных ископаемых. Таковы многочисленные руководства, особенно для проспекторов золота, в последнее время для поисков редких минералов и металлов, для строительного материалов и т. д.

Однако все эти книги имели случайный характер и не охватывали вопроса полностью.

¹ См. список литературы в конце настоящей работы.

В нашей стране вопросы поисков и их планового проведения были впервые подняты при советской власти в Академии Наук и сейчас сделались объектом планомерной работы в крупных геологических учреждениях страны. Однако в них эти задачи обычно ставились в непосредственную связь с составлением геологических карт или с разведками определенного месторождения. Только за самые последние годы стала вырабатываться более точная методика поисков отдельных полезных ископаемых в различных районах Союза; особенно в связи с поисками олова и с вопросами изучения шлихов золотых россыпей стал накапливаться огромный материал по методике поисковых работ. Методы поисков оказались весьма разнообразными: начиная с чисто геологических и петрографических, за последние годы в поисковых работах и особенно при разведках огромную роль приобрели методы геофизические. Однако для районов совершенно новых, для белых пятен геологической карты, для областей, покрытых песками, тайгой или тундрами, необходимо было выдвинуть какие-то новые методы предсказаний и прогнозов, которые позволяли бы в определенных районах искать определенные полезные ископаемые.

Как раз геохимическая методика пришла на помощь в этом вопросе. Геохимия выдвинула целый ряд закономерностей распределения и совместного нахождения элементов и минералов в земной коре. Этим она наметила пути для поисков полезных ископаемых в определенном районе, в областях определенной тектоники, в породах определенного петрографического типа.

Основным лозунгом геохимических поисков стала закономерность распределения элементов в земной коре и связь этих закономерностей с ее геологической историей.

Применение геохимических методов, которым посвящена настоящая книга, шло у нас случайными отдельными исследованиями как в районе Кольского п-ова, так и в Средней Азии и на Урале. Проведенные за последние 20 лет многочисленные поисковые и разведочные работы показали, что методы геохимии представляют собой очень ценное орудие для поисковой работы, что они дают прогноз нахождения того или иного полезного ископаемого, заставляют исследователя направить глаз и мысль на определенные объекты. Они указывают, что и где можно искать и в каких условиях можно найти то или другое ископаемое.

Сейчас в этом и заключается основная задача поисковика-исследователя: он должен заранее знать, где что можно найти, его глаз должен искать в данной обстановке совершенно определенные минералы или их сочетания.

Опыт прошлых лет показал, что в этом и состоит основа и значение геохимических поисков. При всей опытности глаза полевого исследователя он обычно пропускает целый ряд мелких указаний и наведений, если его мысль не связывает эти мелочи с каким-либо определенным геохимическим фактом.

В большом опыте поисковых работ в Средней Азии и на Кольском п-ове мы убедились, что достаточно кому-либо одному в одном районе найти новый минерал, как этот минерал открывается другими партиями в целом ряде других областей, после того как они ознакомились с его внешним видом. Мелкие находки влекут за собой открытие более крупных месторождений. Отдельные находки красной глины, боксита, превращаются в целые бокситовые зоны. Открытие красивых целестинов около Кисловодска намечает целый пояс целестиновых месторождений Северного Кавказа, и на первое открытие нанизываются все новые и новые факты,

новые наблюдения, сливающиеся затем иногда в общие практические выводы.

Редко случается, чтобы исследователи сразу открыли какое-либо крупное месторождение. Всегда начинается с небольших находок чисто минералогического характера, которые постепенно, по мере вдумчивого отношения к этой находке, разрастаются в настоящие месторождения. Так было с апатитом в Хибинских тундрах, отмеченным Рамзаем еще в конце 80-х годов как микроскопическая составная часть в нефелиновых сиенитах. До 1923 г. он был встречен в отдельных жилках, не имевших практического значения, потом в крупных валунах, через два-три года — в виде элювиальных россыпей, и через пять-шесть лет после первой находки отдельные месторождения на карте стали сливаться в грандиозную апатитовую дугу.

Геохимия, как наука диалектического характера, имеет целью каждое природное явление поставить в связь с окружающими его условиями, сопоставить с другими и выявить основные его закономерности.

Вот почему мы решили подытожить нашу работу и опыт в этом направлении и свести (еще в очень несовершенной форме) в настоящей книге все те практические наблюдения, к которым пришли за 30 лет полевой работы.

ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ ПОИСКОВ В СССР

Три большие задачи стоят в поисковой работе на очереди:

1) поиски определенных полезных ископаемых и определенных химических элементов, для которых мы не имеем еще достаточных запасов в нашей промышленности;

2) поиски тех же полезных ископаемых, но определенных химических, минералогических и технологических свойств, в определенном парагенезисе¹ и взаимном сочетании;

3) поиски в определенных географических районах Союза.

В IV томе «Геохимии» я подробно разбираю первый вопрос.

Какие вещества требуют к себе особого внимания в поисковой работе? Их можно свести прежде всего к следующему.

По отдельным полезным ископаемым особое внимание привлекают к себе поиски алмаза, агата как технического камня, горного хрусталя высшего качества для радио, прозрачного и чистого исландского шпата, корунда и наждака как абразивных материалов. Для местной промышленности необходимо особенно подчеркнуть важность поисковых работ для минеральных красок, глин разных сортов, мергелей, гипса и строительного камня, а также источников местного топлива.

Из отдельных химических элементов мы подчеркиваем необходимость особого внимания к поискам руд следующих элементов:

а) из металлов: алюминия, ванадия, марганца (для Сибири), олова, сурьмы, вольфрама, никеля, кобальта, свинца, цинка и радиоактивных металлов;

б) из редких и сверхредких элементов: вольфрама, молибдена, бериллия, галлия, индия, теллура, редких земель, тантала, таллия и некоторых других;

в) из других элементов: гелия и других благородных газов, фтора, серы, фосфора, брома и йода.

Однако, гораздо важнее общей проблемы поисков указанных выше веществ является задача отыскания для ряда элементов новых месторождений

¹ Обращаем внимание читателя на то, что в конце работы приложено краткое объяснение специальных терминов.

с более выгодными технологическими свойствами или парагенезисом. Так, для ряда полезных ископаемых мы знаем у нас в Союзе весьма значительные месторождения, но невысокого качества. Для других отмечаются примеси, осложняющие очистку и получение чистого продукта. Для третьих мы имеем только рассеянные месторождения, усложняющие добычу.

Таким образом, чисто количественные определения запасов без оценки качественной стороны оказываются недостаточными. Вопросы геохимии и технологии заставляют коренным образом пересмотреть старые схемы подсчета запасов и обратить особое внимание на технологические и минералогические свойства полезных ископаемых¹.

Наконец, очень большое значение приходится приписывать третьей задаче — изучению полезных ископаемых в определенных географических районах и вообще экономгеографическому анализу наших месторождений и полезных ископаемых.

Для таких объектов, как, например, горный хрусталь (для радио) или драгоценные камни, вопросы географии сырья не имеют большого значения. Но для минералов и полезных ископаемых меньшей ценности вопрос перевозки приобретает огромное значение. Уже для фосфорного сырья даже столь высокой стоимости, как хибинский концентрат, перевозка на расстояние 2000—3000 км не только осложняет экономику, но и загружает транспорт и приводит к ряду других больших хозяйственных затруднений.

Поэтому география нашего сырья, особенно при современной децентрализации промышленности, представляет одну из важнейших теоретических и практических задач.

Настоящая работа состоит из восьми глав, группирующихся следующим образом.

В первых четырех главах приводятся общие данные геохимической и минералогической методики.

В главе V дается детальный анализ того, что можно встретить в той или иной геологической или петрографической обстановке.

В главах VI и VII вопрос ставится иначе: для каждого полезного элемента и отчасти ископаемого намечаются те признаки, которые позволяют их искать в соответствующей геологической и геохимической обстановке.

Наконец, в заключении (глава VIII) приводится ряд чисто практических соображений о работе геохимика в поле.

Так как книга носит чисто практический характер, желательно, чтобы геохимик и геолог имел ее с собой в поле, при поисковой или даже разведочной работе.

Оказавшись в районе определенной петрографической и геологической обстановки, исследователи легко найдут в главе V указания на те полезные ископаемые и элементы, которые вообще наиболее вероятны в данных условиях. Для их отыскания они должны далее обратиться к главам VI и VII, где даны соответственные указания для поисков определенного минерала или химического элемента.

Если задача поисковой или разведочной работы с самого начала поставлена более целеустремленно (например, поиски олова), то одним приводимых здесь данных может оказаться недостаточно и исследователь должен предвзятительно более детально ознакомиться с объектом поисков по одной из тех больших монографий, которые указаны в тексте или в общем списке литературы.

¹ Именно так построены новые схемы подсчета категорий запасов, принятые Академией Наук в начале 1939 г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПОИСКОВЫХ РАБОТ В СССР

Заканчивая введение о роли геохимических идей в поисковых работах, я хочу остановиться на одном положении, которое заслуживает большого внимания.

Хорошая геологическая или петрографическая карта в ее старом виде не предопределяет практической ценности данного района, если вопрос не идет о каких-либо более характерных и изученных полезных ископаемых, как уголь, железо, медь и т. д.

Геолог, изучающий геологию данного района, его тектонику, или пытающийся строить стратиграфический разрез или анализ свиты пород, не обращает и не может обращать внимания на проблемы полезных ископаемых и поэтому обычно их и не видит. Таких примеров имеется очень много: в былое время один из лучших наших геологов, знатоков Средней Азии, расположился лагерем в 100 м от ртутного месторождения, но не видел его и, проводя интереснейший тектонический разрез, очень полезный и важный для современных разведок, не заметил, что его схема идет по древним выработкам и отвалам.

Совершенно такие же примеры нам дает наша северная практика на каждом шагу: последнее крупное месторождение апатита было открыто в том же районе, где в течение двух лет специально работали партии, петрографические и минералогические, занимавшиеся составлением карты данного района.

Я этим хочу сказать, что знание наших минеральных ресурсов еще много меньше наших общих геологических знаний. Из этого положения мы должны совершенно логически сделать вывод, что необходимо коренное изменение методов поисковых работ, так как без внедрения новых геохимических идей мы не можем достаточно быстро ответить на растущие потребности социалистического хозяйства.

За последние годы планово-поисковые и разведочные работы во многих отношениях коренным образом перестроили наши представления; за 3—5 лет географическая карта целого ряда важнейших полезных ископаемых оказалась совершенно перекроенной.

Кто же может уверить нас, что этими годами все открытия уже исчерпаны? Кто решится утверждать, что новые находки, вероятно, еще в более крупном масштабе, не будут следовать в ближайшие годы по мере того как, овладев новой методикой в геохимии и геофизике, в разведке и поисках, мы начнем проникать под покров тайги и степей одной шестой земной поверхности? Я думаю, что ответ ясен. Мы только в начале пути овладения нашими недрами, и мы должны со всей определенностью сказать, что современные знания наших недр дают лишь первую грубую ориентировку распределения на территории Союза промышленного ископаемого сырья и что широкое перспективное планирование географии нашей промышленности лишь в самой первоначальной, но далеко не окончательной наметке может базироваться на современных фактических данных.

Так что же делать, на каких же данных строить план перспективной наметки географического распределения основных ведущих центров промышленного сырья?

Я думаю, что современные геологические и геохимические науки позволяют делать некоторые перспективные наметки и намечать, в порядке рабочей гипотезы, где и что мы можем встретить на территории Союза, где мы можем ожидать образования новых горнопромышленных районов, какова наиболее вероятная география нашего ископаемого сырья.

Я чувствую исключительную ответственность этой задачи, но без

рабочей гипотезы, без попытки прогноза или попытки из имеющихся данных, цифр и точек сделать вывод — нельзя работать на будущее. Именно в области научной мысли мы не должны бояться дерзать; мы только должны всегда помнить, что это — дерзание и не принимать его за реальность и за факт. В наш век накопления огромного описательного, экспериментального и аналитического материала без обобщающей рабочей гипотезы работать нельзя; надо ее создавать, но надо иметь смелость ее отставить, если факты и наблюдения ее перерастут.

Наш перспективный анализ мы будем строить на данных молодой науки, целого нового диалектического мировоззрения, которое врывается в современную минералогию, петрографию и геологию, пронизывая ее целиком новыми химическими идеями.

Геохимия — наука о распределении и перемещении химических элементов Земли, но в рамках определенных территорий она вырастает в науку о той сырьевой и отчасти энергетической базе, на которой строится хозяйство. Геохимические проблемы Союза поэтому не проблемы отвлеченной теории или узкопрактических задач, — это проблемы того и другого вместе, проблемы культурного строительства страны на основе научного анализа природы и ее производительных сил.

Глава I

ОСНОВЫ ГЕОХИМИИ

1. ЗАДАЧИ СОВРЕМЕННОЙ ГЕОХИМИИ

Мы не будем излагать все положения современной геохимии и отсылаем читателя к справочникам и сводным изданиям, приведенным в конце этой работы¹. Здесь необходимо лишь подчеркнуть те основные идеи геохимического анализа природных процессов, которыми должны руководствоваться геолог и геохимик при поисковой работе.

Под геохимией мы подразумеваем ту отрасль геологических наук, которая изучает судьбы и историю атома не только в земной коре, но и частично за ее пределами. Задачей геохимии является выявление основных черт поведения тех 92 типов атомов, которые мы называем элементами и которые составляют в разных сочетаниях окружающую нас природу. Количественное и качественное распространение отдельных химических элементов в земной коре, в отдельных ее процессах, оболочках, породах, участках, законы перемещения (миграции), рассеяния или накопления элемента, с образованием тех мест концентрации, которые мы называем месторождениями и на которых построено все наше горное дело, законы сочетания элементов между собой в различных условиях земной коры, ее оболочек и отдельных областей, законы участия элементов в строении почвы, горных пород, живого вещества, наконец, частично законы использования вещества самим человеком, — таковы основные задачи геохимии как науки о поведении элемента (атома) в земной коре.

Основной единицей исследования геохимии является, следовательно, сам химический элемент или нейтральный атом, или, чаще всего, та подвижная система, которую мы называем ионом. Ион есть заряженный атом элемента, обладающий определенной величиной свободной энергии

¹ А. Е. Ферсман. Достижения советской геохимии. Математика и естествознание в СССР за двадцать лет. Изд. Акад. Наук СССР, 1938, 805—835.

и переходящий в более устойчивое состояние в ходе какого-либо физического или химического процесса.

Природный процесс распределения и сочетания химических элементов и образования минералов и горных пород заключается как раз в том, что свободные, подвижные ионы водных растворов, расплавов, летучих эманацій теряют часть своей энергии и превращаются в более устойчивые, менее подвижные, обычно твердые системы вещества. Такие системы построены по определенным законам геометрии. Они отвечают некоторому электростатическому равновесию, и мы их называем кристаллами.

Таким образом, с энергетической точки зрения возникновение твердого кристаллического вещества представляет явление перехода в состояние более устойчивое, менее подвижное и более бедное энергией. Нам совершенно понятно по законам энергетике, что чем большее количество энергии будет выделено таким ионом при переходе его в кристаллическое состояние, тем более устойчивым будет получаемый кристалл, тем труднее будет его снова перевести в дисперсную систему, растворить, расплавить или вновь разделить атомы решетки на свободные ионы; и чем устойчивее будет такая система минералов, тем более она будет обладать способностью к накоплению в природном процессе, тем менее она будет подвержена разрушению, расплавлению, растворению, и тем легче для этой системы и чаще мы будем встречать ее концентрацию (накопление) в природе.

Между тем как раз эта проблема нас интересует в настоящей работе. Нам не интересны рассеянные полезные минералы и металлы; мы ищем для целей практического использования те места, в которых нужный нам элемент или минерал накоплен в большем количестве, чем его среднее. Мы привыкли называть среднее весовое содержание какого-либо элемента в земной коре *кларком* (табл. 1). Поэтому мы можем определенно сказать, что нам нужно искать места концентрации вещества выше его кларка. Отсюда и расшифровка того понятия, которое в геологии и геохимии носит название месторождения: месторождение какого-либо элемента или вещества возникает в результате концентрации этого вещества выше его среднего кларка.

Таким образом, мы видим, что практически проблема поисков полезных ископаемых, по существу своему, проблема чисто геохимическая, и совершенно понятно поэтому, что в последние годы идеи геохимии внедрялись и подчиняли себе практическое знание, благодаря чему в новых сводках по рудным месторождениям мы видим полностью отражение геохимических идей.

Попытаемся несколько глубже расшифровать основные черты современной геохимической работы. Отрешимся от ряда теоретических положений и проанализируем попросту состояние современной науки об отдельных минералах, полезных ископаемых, природных химических процессах и т. д.

Когда начинающий студент берет в руки какой-либо курс описательной минералогии, то он в нем встречается с огромным фактическим материалом, однако чисто эмпирического характера. Указываются свойства каждого минерала, его химический состав, генезис; все это выражается определенными понятиями, числами, которые, однако, ничем не связаны между собой. Из огромного количества разрозненных фактов составляется та наука, которую можно лишь запомнить, но в которой нет внутренних — логических или генетических связей.

Так, например, студент должен запомнить, что ангидрит довольно мягкий минерал, твердости 3, прозрачный или белый, обычно бесцветный,

Таблица 1

**Распространение химических элементов в земной коре
(в весовых кларках)
(включая атмо-, гидро- и литосферу до глубины 16 км)**

Порядковый номер эле- мента	Элемент	Кларк 1933 г.	Порядковый номер эле- мента	Элемент	Кларк 1933 г.
1	Водород Н	1,00	41	Ниобий Nb	$3,2 \times 10^{-5}$
2	Гелий He	1×10^{-6}	42	Молибден Mo	1×10^{-7}
3	Литий Li	5×10^{-3}	43	Мазурий Ma ¹	1×10^{-7}
4	Бериллий Be	4×10^{-4}	44	Рутений Ru	5×10^{-6}
5	Бор В	5×10^{-3}	45	Родий Rh	1×10^{-6}
6	Углерод С	0,35	46	Палладий Pd	5×10^{-6}
7	Азот N	0,04	47	Серебро Ag	1×10^{-5}
8	Кислород О	49,13	48	Кадмий Cd	5×10^{-4}
9	Фтор F	0,08	49	Индий In	1×10^{-5}
10	Неон Ne	5×10^{-7}	50	Олово Sn	8×10^{-3}
11	Натрий Na	2,40	51	Сурьма Sb	5×10^{-5}
12	Магний Mg	2,35	52	Теллур Te	1×10^{-6}
13	Алюминий Al	7,45	53	Иод J	1×10^{-4}
14	Кремний Si	26,00	54	Ксенон Xe	3×10^{-9}
15	Фосфор P	0,12	55	Цезий Cs	1×10^{-3}
16	Сера S	0,10	56	Барий Ba	0,05
17	Хлор Cl	0,20	57)	Редкие земли TR	0,01
18	Аргон Ar	4×10^{-4}	71)		
19	Калий K	2,35	72	Гафний Hf	4×10^{-4}
20	Кальций Ca	3,25	73	Тантал Ta	$2,4 \times 10^{-5}$
21	Скандий Sc	6×10^{-4}	74	Вольфрам W	7×10^{-3}
22	Титан Ti	0,61	75	Рений Re	1×10^{-7}
23	Ванадий V	0,02	76	Осмий Os	5×10^{-6}
24	Хром Cr	0,03	77	Иридий Ir	1×10^{-6}
25	Марганец Mn	0,10	78	Платина Pt	2×10^{-5}
26	Железо Fe	4,20	79	Золото Au	5×10^{-7}
27	Кобальт Co	2×10^{-3}	80	Ртуть Hg	5×10^{-6} (?)
28	Никель Ni	0,02	81	Таллий Tl	1×10^{-5}
29	Медь Cu	0,01	82	Свинец Pb	$1,6 \times 10^{-3}$
30	Цинк Zn	0,02	83	Висмут Bi	1×10^{-5}
31	Галлий Ga	1×10^{-4}	84	Полоний Po	5×10^{-6}
32	Германий Ge	1×10^{-4}	85	Алабамий Ab ¹	—
33	Мышьяк As	5×10^{-4}	86	Радон Rn	—
34	Селен Se	8×10^{-5}	87	Виргиний Vi ¹	—
35	Бром Br	1×10^{-3}	88	Радий Ra	2×10^{-10}
36	Криптон Kr	2×10^{-3}	89	Актиний Ac	—
37	Рубидий Rb	8×10^{-3}	90	Торий Th	1×10^{-3}
38	Стронций Sr	0,035	91	Протактиний Pa	7×10^{-11}
39	Иттрий Y	5×10^{-3}	92	Уран U	4×10^{-4}
40	Цирконий Zr	0,025			

¹ В настоящее время № 43 известен под названием технеций (Tc), № 85 — аstatин (At), 87 — франций (Fr); из редких земель: иллий — прометей (Pm). — *Ред.*

состав — сернокислый кальций, встречается в природе в осадочных породах вместе с каменной солью, выпадает из водных растворов. Или тот же студент в другой главе должен заучить, что топаз — алюмосиликат,

в котором часть кислорода замещена фтором, обладает высокой твердостью 8, встречается в пустотах гранитных пегматитов как продукт пневматолита, вместе с кварцем, бериллом, лепидолитом и т. д.

В результате такого механического запоминания огромного количества фактов минералог и геолог безошибочно скажут, что ангидрит не встречается в магматических породах, а топаз — в осадочных. Они запомнят твердость топаза, мягкость гипса или талька, но все факты и цифры не будут вытекать у них из какой-то логической или теоретической схемы.

Столь же эмпирическими являются для геолога и для геохимика все данные так называемой науки о полезных ископаемых. В ряде прекрасных новых курсов, например В. А. Обручева, мы имеем огромный фактический материал по отношению к отдельным полезным веществам. Так, для золота мы наблюдаем картину его образования в кварцевых жилах, в контактах, в россыях; для магнезита запоминаем два типа его накопления — в продуктах разрушения основных пород и в метаморфических осадочных свитах. Снова и в этой области знания мы встречаемся с обилием точных фактов, обобщенных чисто формально эмпирическими законами, но не связанных между собой какими-либо общими закономерностями природы.

Мы считаем, что именно этим огромным описательным материалом, накопленным двумя веками научной и практической работы, и определяется первый отживающий этап минералогии в ее историческом развитии. Мы стоим сейчас на границе новой эпохи минералогического и геохимического изучения природы, когда эмпирические факты должны быть обобщены, связаны и объяснены.

Мы сейчас не можем довольствоваться простым запоминанием факта, что ангидрит образуется не из магмы, а из водных осадков соляных озер, — нам надо это явление объяснить. А между тем зададим сейчас любому минералогу или геологу вопрос, почему это так, почему топаз не образуется из водных растворов или озер, источников, почему золото не встречается в оливиновых породах, почему олово связано с гранитными пегматитами вместе с литием, — на этот вопрос вряд ли сможет ответить старая минералогия, и даже самая его постановка будет казаться и непонятной и ненужной.

Новая минералогическая мысль идет, между тем, именно к попытке разрешить эту проблему. Правда, она только становится на этот путь, но геохимическая и кристаллохимическая методика уже подсказывает ее правильность. Действительно, в каждом минерале и полезном ископаемом мы можем рассматривать следующие стороны:

- 1) химический состав (качественный и количественный);
- 2) кристаллохимические черты;
- 3) свойства физические и химические;
- 4) общее парагенетическое сочетание.

Все эти категории и понятия связаны между собой точными закономерностями, что только сейчас начинает выясняться, хотя эта идея была высказана Д. И. Менделеевым еще в первой его диссертации 1855 г.

Химический состав как качественно, так и количественно предопределяет распределение ионов и атомов в пространстве и, следовательно, тип и характер кристаллической решетки. Таков первый закон кристаллохимии, устанавливающий связь между химическим составом и геометрией (энергетикой) кристаллической решетки.

Полученная кристаллическая решетка определяет ряд физических, минералогических и химических свойств соединения. От ее характера, типа, расстояния между узлами, соотношения электрических сил зависят твердость, растворимость, упругость, летучесть и другие свойства

соединений. Все эти важные с геохимической точки зрения свойства находятся в математической зависимости друг от друга, причем в основном они определяются энергией самой решетки и распределением энергии между отдельными атомами и ионами внутри кристаллической системы.

Однако ряд упомянутых свойств находится в зависимости от факторов внешней среды — от физико-химических и термодинамических условий окружающей обстановки, от их сочетаний во времени, в пространстве, т. е. в определенных геологических условиях земной коры. Таким образом, намечается необходимость в установлении связи между указанными закономерностями свойств и той физико-химической средой, которая определяется в основном ее геологической историей. Отсюда и возникают основные проблемы геохимии, имеющие целью как раз установление указанных связей на основе современных данных химии и физики.

Однако при таком несколько упрощенном подходе мы не должны забывать того, что все природные явления комплексны и многокомпонентны, что математически геометрическое тело не отвечает понятию физического кристалла, что законы «физического кристалла» не полностью применимы к природному кристаллу как естественной историческому телу, во всех своих свойствах и во всей своей истории связанному с окружающей его обстановкой. Математические уравнения природных реакций являются сейчас для геохимика лишь общими ориентировочными схемами.

Таким образом, мы видим, что дальнейшее развитие геохимии должно идти в сторону замены разрозненных отдельных понятий и свойств единичными общими выражениями, как мы говорим — основными параметрами, по возможности немногими, из которых должны выводиться все остальные. Нет никакого сомнения, что такими параметрами, в основном, будут параметры энергетические и что именно они позволяют наиболее просто подойти к определению тех свойств, которые характеризуют вещество.

2. ХОД ГЕОХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ЗАКОНЫ ГЕОЭНЕРГЕТИКИ

Как мы видели, ход каждого геохимического процесса зависит в основном от двух типов факторов: 1) от внешних, термодинамических условий и их изменения и 2) от свойств количественных соотношений химических веществ, участвующих в процессе. Первый цикл факторов будет разобран нами в следующей главе, но уже сейчас мы должны уяснить себе, что в основном, на 90 %, крупнейшие процессы образования минералов и их скопления связаны с понижением температуры (магмы, флюида, раствора), с переходом в новую фазовую систему меньшей подвижности и меньших запасов энергии. Значительно реже случаи, когда переход в кристаллическую твердую и менее подвижную фазу совершается под влиянием увеличения концентрации (например, вследствие выпаривания соляных рассолов или в результате обменных реакций со стенками жилы, примером чего могут служить явления замещения карбонатной породы рудными растворами). Таким образом, главным и наиболее важным фактором, с которым нам придется в дальнейшем считаться, является понижение температуры, о чем будет речь в следующей главе.

Раньше чем мы перейдем к анализу тех основных энергетических свойств элементов, которые позволяют использовать некоторые показатели для простых полевых выводов, мы вкратце перечислим основные энергетические законы, с которыми приходится считаться каждому исследователю при изучении природных образований:

1. Уменьшение свободной энергии системы. Уменьшение свободной энергии идет особенно энергично в начальных высокотемпературных стадиях процесса, постепенно замедляется в конечных, более холодных частях системы и, вероятно, в отдельных частях системы, под влиянием особых условий земной поверхности, может получить

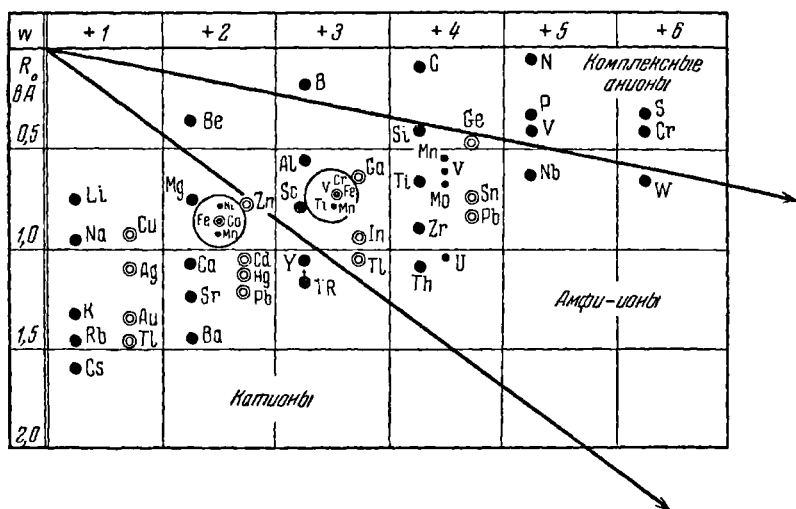


Рис. 1. Диаграмма соотношений ионов с их параметрами (w — валентность и R — радиус).

Ионы в диаграмме расположены тремя столбцами: слева ионы типа благородных газов (шаровые); посередине ионы промежуточные (с незаполненными оболочками), справа ионы типа купро (тяжелых металлов). Стрелки делят диаграмму на три поля: ионов, которые всегда встречаются лишь в виде катионов; ионов, которые всегда в условиях земной коры образуют лишь комплексные анионы с кислородом (реже с серой), и, наконец, ионов, которые в зависимости от условий встречаются или в виде настоящих катионов или образуют амфи-ионы (анионы с кислородом).

временно обратный знак. Наравне с уменьшением запаса энергии идет и процесс перевода этих запасов в наименее работоспособную форму, что в области кристаллизации определяется законом симметрии кристаллических фаз и отчасти законом четности. Таким образом, при постепенном понижении температуры нормально наблюдается переход рассеянных фаз в кристаллические путем, с одной стороны, выделения энергии, с другой, — образования таких систем, в которых оставшиеся запасы энергии оказываются наименее работоспособными.

Что это значит с практической точки зрения? Это значит, что мы, заранее зная энергетические свойства каждого атома и иона, можем предсказать, будет ли выпадать данный элемент в начале или в конце процесса. Мы можем в общих чертах наметить и тот тип кристаллов, который окажется наиболее характерным при высоких или низких температурах.

2. Закон Оствальда. Формулировать его можно следующим образом: всякая система при переходе в более устойчивое состояние совершает этот переход по ступеням, постепенно занимая уровни все большей и большей устойчивости. Не входя в детальный анализ этого замечательного закона, мы должны отметить, что из него вытекает и ход процессов изменения природных соединений. Из начального соединения, например при поверхностном выветривании, не сразу образуется конечный продукт; так, из оливина не образуется сразу смесь кремнезема и карбонатов

магния, но возникает ряд промежуточных соединений, промежуточных равновесий, как-то: змеевик, тальк, сапонит и др., которые, согласно этому закону, существуют в качестве промежуточных форм длительного геохимического процесса.

3. Закон Гесса. Полный тепловой эффект химического превращения зависит только от начального и конечного состояния системы и не зависит от тех путей, по которым протекал процесс. Это правило необычайно важно для понимания природных сочетаний минералов. Переводя это на язык минералогии, мы можем сказать, что всякое сочетание минералов в определенной ассоциации элементов не зависит от тех генетических путей, которые привели к его образованию, но вместе с тем оно обязательно и однозначно. Что это значит? Это значит, что в результате разных геохимических процессов могут возникать и должны возникать при данных условиях одинаковые продукты и их комплексы. Природа использует различные пути для хода своих реакций, но результаты одни и те же. Мы должны это особенно иметь в виду, когда изучаем генезис какого-либо месторождения. Мы не должны забывать, следовательно, что пути образования могут быть весьма различными и что решение задачи генезиса поэтому является нередко неоднозначным.

4. Закон убывающих уровней энергии. Этот закон можно формулировать следующим образом: увеличение энтропии, т. е. потеря свободной энергии охлаждающейся системой, идет таким образом, что все процессы, вызывающие наибольшее выделение энергии, идут в начале, а менее экзотермические — в конце. Всякий природный процесс с этой точки зрения может рассматриваться как смена энергетических уровней, а природные сочетания минералов и элементов — как такого рода энергетические и геохимические ступени, обладающие определенным запасом энергии и, с этой точки зрения, определенной устойчивостью. Из этого вытекает, что в начале кристаллизации должны выпадать соединения с большей энергией решеток, а в конечных кристаллизациях должны накапливаться вещества малых энергий кристаллических решеток, с малыми показателями диссоциации и малым потенциалом ионизации. Этот закон приобрел особенное практическое значение благодаря тому, что мною были выведены специальные энергетические показатели для отдельных ионов в кристаллах, названные эками и вэками, которые позволяют практически решать ряд задач кристаллизации в природных процессах.

Эки и вэки

Понятие об эках и вэках имеет не только теоретическое, но и большое практическое значение, ибо эти величины могут служить удобными показателями как для вывода ряда свойств химических соединений, так и для понимания самих геохимических процессов.

Эком мы называем такого рода энергетический показатель, который определяет собой количество энергии, выделяемой ионом при переходе из рассеянного состояния в состояние иона или атома в кристаллической решетке. Расчет величины эков производится в условных единицах, при абсолютном нуле, на 1 моль вещества. Условная величина эка, помноженная на 11,1, дает эту же величину в электрон-вольтах, а помноженная на 256 — в больших калориях. Как показывают работы Йенсена 1938 г., эта величина не только чисто расчетного характера, но имеет физический смысл, отвечая тому максимуму выделения энергии, который определяет в кристаллической решетке равновесие обоих партнеров — электроположительного и электроотрицательного ионов.

Каждая кристаллическая постройка рассматривается при этом как бинарное соединение иона $+$ и иона $-$ (катиона и аниона). Каждый из этих ионов при сочетании в решетке выделяет известное количество энергии, отвечающей эку, и строит общую решетку, в сумме выделяющую определенный запас энергии, как известно, отвечающий энергии решетки (U).

Таким образом, в основу наших построений положена мысль о том, что каждый ион менделеевской таблицы как бы наделен известным количеством энергии, которую он выделяет при образовании кристаллической решетки, и что энергия самой решетки получается аддитивно, путем сложения эков ионов, входящих в состав решетки (конечно, с учетом их относительных количеств).

В результате ряда расчетов как эмпирических, так и теоретических мною была составлена таблица величин эков, приведенных в табл. 2 в последовательном порядке довышения величины эков как для катионов, так и для анионов. В табл. 3 они помещены среди других характерных свойств каждого элемента. Как мы видим из этих таблиц, величина эков, данная в условных единицах, колеблется весьма значительно, от 0,14 до 28,1.

В настоящее время как из теоретических, так и из расчетных данных выяснилось, что величина эка связана прежде всего с квадратом валентности, с одной стороны, и величиной радиуса иона, с другой, согласно выражению: $EK = K \frac{\omega}{ZK}$. Величина коэффициента K близка к единице; для анионов она точно равна 1, для катионов носит несколько более сложный характер, так как в нее входит переменная величина R , но в общем она также близка к единице.

Как видно из приводимых табл. 2 и 3, эки вычислены не только для простых катионов и анионов, но и для анионов комплексных, что имеет большое значение в геохимии.

Кроме величин эков, мною введена и вторая величина, названная эком, которая представляет собой эк, деленный на валентность. Эта величина, следовательно, дает характеристику энергии данного иона при расчете на единицу валентности (заряда) и потому сравнима и по существу близка к тому ионному потенциалу, который введен был Картледжем как отношение валентности к радиусу. Как мы увидим в дальнейшем, эта величина практически очень интересна, так как делает сравнимой величины энергии на единицу валентности всех ионов менделеевской таблицы независимо от того, какое количество свободных зарядов имеет данный ион (т. е. независимо от его валентности).

Перехожу к некоторым вопросам геохимического применения теории эков. Прежде всего необходимо иметь в виду, что эки позволяют грубо ориентировочно весьма быстро исчислять энергию любой кристаллической решетки путем сложения эков соответственных ионов. Таким образом, для NaCl сложение эков приводит к 179 ккал (большим калориям), тогда как экспериментальная цифра 180. Для CaO мы получаем по экам 845, тогда как экспериментально получено 853. Наконец, для SiO₂ мы имеем экспериментальную цифру 3097, а по сумме эков рассчитано 2994. Уже эти цифры показывают, что с достаточной точностью (около 3—6%) мы можем вычислять по экам очень важную величину — энергию решетки сложных комплексных, больших, громоздких молекул. При этом мы можем убедиться, что величина энергии решетки, например, моля подсистого цезия не превышает 136 ккал, тогда как величина энергии моля полевых шпатов колеблется в пределах около 12 000—15 000 ккал. Конечно, для сравнения необходимо брать не эти цифры, а средние величины энергии на один ион; но и в этом случае мы получаем резкие различия: для NaCl

Система эквов (по
на 1 моль при

Катионы (простые)

Порядковый номер элемента	Ион	Радиус иона (R)	Эки			Порядковый номер элемента	Ион	Радиус иона (R)	Эки			Порядковый номер элемента	Ион	Радиус иона (R)
			в основных единицах (ЕК)	в электрон- вольтах	в ккал				в основных единицах (ЕК)	в электрон- вольтах	в ккал			
55	Cs ⁺	1,65	0,30	3,3	77	26	Fe	0,83	2,12	23,6	543	72*	Hf	0,86
37	Rb	1,49	0,33	3,7	85	27	Co	0,82	2,15	23,9	551	40*	Zr	0,87
19	K	1,33	0,36	4,0	92	23	Ni	0,78	2,18	24,3	558	50	Sn	0,74
—	[NH ₄]	1,43	0,37	4,1	95	30	Zn	0,83	2,20	24,5	563	82	Pb	0,84
81	Tl	1,49	0,42	4,7	107	4	Be	0,34	2,65	29,5	679	22	Ti	0,64
11	Na	0,98	0,45	5,0	115							42	Mo	0,68
3	Li	0,78	0,55	6,1	141	31*	Tl ⁺	1,49	3,45	38,4	883	14	Si	0,39
47	Ag	1,13	0,60	6,7	154	57*	La	1,22	3,58	39,9	917	75*	Re	0,68
79	Au	1,37	0,65	7,2	165	39*	Y	1,06	3,95	44,0	1011	76*	Os	0,67
29*	Cu	0,96	0,70	7,8	180	71*	Cp	0,99	3,98	44,3	1020	77*	Ir	0,66
80*	Hg	?	0,93	10,3	238	49*	In	0,92	4,35	48,4	1114	44*	Ru	0,65
1*	H ⁺	оч. мал.	1,10	12,3	282	21*	Sc	0,83	4,65	51,8	1191	25	Mn	0,52
						22	Ti	0,69	4,65	51,8	1191	32*	Ge	0,44
						24	Cr	0,64	4,75	52,9	1216	6	C	0,15
						13	Al	0,57	4,95	55,1	1265			
						26*	Fe	0,67	5,15	57,3	1320			
						45*	Rh	0,68	5,17	57,7	1324			
						23*	V	0,65	5,32	59,2	1362			
						31*	Ga	0,62	5,41	60,2	1386			
						5	B	0,20	6,00	66,8	1536			
56	Ba ⁺	1,43	1,35	15,0	346							41*	Nb ⁺	0,69
38	Sr	1,27	1,53	17,0	392							73*	Ta	0,69
82	Pb	1,32	1,65	18,4	423							23	V	0,34
20	Ca	1,06	1,75	19,5	448							15	P	0,35
25	Mn	0,91	2,00	22,3	512							7+	N ⁺	0,1— 0,2
48	Cd	1,03	2,00	22,3	512									
12	Mg	0,78	2,10	23,4	538									
29*	Cu	?	2,10	23,4	538	90*	Th ⁺	1,10	6,80	75,7	1742	74+	W ⁺	—
80	Hg	1,12	2,10	23,4	538	92*	U	1,05	7,00	77,9	1793	75+	Re ⁺	—

средняя энергия на ион будет 90 ккал, для CaO 425, для SiO₂ около 1000.

Помимо возможности при помощи эквов вычислять величину энергии решетки соединения, мы можем в настоящее время, правда, весьма грубо, рассматривать энергию решетки (т. е. сумму эквов или эквов) как показатель прочности и устойчивости данного химического соединения. При всей физической неопределенности этого понятия для геохимии общее представление о прочности и неразрушаемости решеток необычайно важно: мы можем, действительно, сказать, что энергия решетки соединения в значительной степени предопределяет его термическую прочность, его механическую твердость и отчасти растворимость. Решетки, выделившие при своем образовании много энергии, значительно прочнее, чем решетки солей, которые на моль выделяют всего лишь несколько десятков больших калорий. Таким образом, получается возможность по величине энергии решетки, а также входящих в нее ионов судить о механической прочности и твердости соединения. Об этом мы под-

Таблица 2

1 декабря 1935 г.)
абсолютном нуле

в комплексные)			Простые анионы						Комплексные анионы				
Эки			Порядковый номер элемента	Ион	Радиус иона (R)	Эки			Ион	Радиус иона (R)	Эки		
в условиях единицах (ЕК)	в электрон-вольтах	в ккал				в условиях единицах (ЕК)	в электрон-вольтах	в ккал			в условиях единицах (ЕК)	в электрон-вольтах	в ккал
7,81	87,0	2000	53	J ⁻¹	2,20	0,18	2,0	46	JO ₃ ⁻¹	3,55	0,14	1,6	36
7,35	87,4	2010	35	Br	1,96	0,22	2,4	56	NO ₃ [*]	2,57	0,19?	2,1	49
7,90	88,0	2023	17	Cl	1,81	0,25	2,8	64	ClO ₄	2,36	0,21	2,3	54
7,95	88,5	2036	1	H ⁻¹	1,54	0,32	3,6	82	SH (экс-пер.)	1,99	0,23	2,6	59
8,40	93,5	2151	9	F	1,33	0,37	4,1	95	CN (экс-пер.)	1,93	0,25	2,8	64
8,50	94,6	2177							OH	1,33	0,37	4,1	95
8,60	95,7	2202											
8,90	99,1	2280	52	Te ⁻²	2,11	0,95	10,6	243	WO ₄ ⁻²	3,52	0,57	6,3	146
8,90	99,1	2280	34	Se	1,91	1,10	12,2	282	MoO ₄	3,45	0,58	6,4	119
8,93	99,4	2287	16	S	1,74	1,15	12,8	295	CrO ₄	3,00	0,67	7,5	172
9,10	101,3	2330	8	O	1,32	1,55	17,3	397	SO ₄	2,95	0,68	7,6	175
9,10	101,3	2330							CO ₃ [*]	(?) 2,57	0,78	8,7	200
10,53	117,3	2697	Группа 15-я путем экстраполяции						PO ₄ ⁻³	3,00	1,50	16,7	385
12,20	135,9	3124							AsO ₄	2,95	1,53	17,0	392
			51	Sb ⁻³	1,95	2,30	25,5	589	BO ₃ [*]	2,68	1,68	18,6	430
			33	As	1,70	2,65	29,5	679					
			15	P	1,65	2,70	29,9	692	ZrO ₄ ⁻⁴	3,50	2,30	26,6	589
			7	N	1,25	3,60	40,1	922	TiO ₄	3,28	2,45	27,3	627
13,60	151,4	3483	83	Bi ⁺⁵	—	11,90	13,2	3047	SiO ₄	Ср. 2,90	2,75	30,6	704
13,60	151,4	3483	51	Sb	—	12,25	13,6	3137					
15,12	168,3	3872	33	As	—	15,20	16,9	3890	FeO ₄ ⁻⁵	3,25	3,85	12,8	986
15,50	172,5	3970							AlO ₄ ⁻⁵	3,15	4,00	44,5	1025
21,93	215,4	4955							MgO ₄ ⁻⁶	3,40	5,30	59,0	1357
19,35	215,4	4955											
28,10	312,9	7179											

* — величины вычисленные.

+ — величины примерные.

робнее будем говорить во второй главе, но как общее положение должны запомнить сейчас, ибо это позволяет, с рядом, правда, ограничений для сильно поляризованных систем, ориентироваться в вероятной твердости того или иного соединения, сравнивая по таблице величины экв и экв входящих в него ионов. То же самое можно сказать и о термической прочности; хотя сейчас этот вопрос далеко еще неизучен, тем не менее весьма вероятно, что термическая прочность чистых элементов и некоторых солевых комплексов находится в непосредственной зависимости от величины энергии решетки и, в частности, величины экв, и при увеличении этих энергетических показателей повышается. Ряд ограничений вносится, однако, природой и типом самих ионов (особенно их взаимодействием — поляризацией). Наконец, и растворимость соединения, при всей ее сложности, находится в несомненной зависимости от величины энергии решетки и энергии отдельных ионов; в специальных исследованиях, приведенных в моей книге «Геохимия», указывается, что, несмотря на ряд значительных осложнений в этом вопросе, в общем мы можем сказать, что решетки с

Химические элементы и
(включая главные)

Порядковый номер эле- мента	Элемент	Атомный вес	ω (геох.)	R иона	Эк
1	Водород	1,008	+1	Около 0,1	1,10
	» [OH]	—	—1 к	1,33	0,37
	» [SH]	—	—1 к	1,99	0,23
3	Литий	6,94	+1	0,78	0,55
4	Бериллий	9,02	+2	0,34	2,65
5	Бор [BO ₃]	10,82	—3 к	2,68	1,68
6	Углерод	12,00	+4	0,15	12,20
	» [CO ₂]	—	—2 к	2,57 (?)	0,78
7	Азот [NH ₃]	14,01	+1 к	1,43	0,37
	» [NO ₂]	—	—1 к	2,57	0,19
8	Кислород	16,00	—2	1,32	1,55
9	Фтор	19,00	—1	1,33	0,37
11	Натрий	23,00	+1	0,98	0,45
12	Магний	24,32	+2	0,78	2,10
13	Алюминий	26,97	+3	0,57	4,95
	» [AlO ₃]	—	—5 к	3,15	4,00
14	Кремний	28,06	+4	0,39	8,60
	» [SiO ₂]	—	—4	2,90	2,75
15	Фосфор [PO ₄]	31,02	—3 к	3,00	1,50
16	Сера	32,06	—2	1,74	1,15
	» [SO ₂]	—	—2	2,95	0,68
17	Хлор	35,46	—1	1,81	0,25
	» [ClO ₂]	—	—1	2,36	0,21
19	Калий	39,10	+1	1,33	0,36
20	Кальций	40,08	+2	1,06	1,75
21	Скандий	45,10	+3	0,83	4,65
22	Титан	47,90	+4	0,64	8,40
	» +3	—	+3	0,69	4,65
	» [TiO ₂]	—	—4	3,28	2,45
23	Ванадий	50,95	+3	0,65	5,32
	» +5	—	+5	0,40	15,12
	» [VO ₂]	—	—3	—	—
24	Хром	52,01	+3	0,64	4,75
	» [CrO ₃]	—	—2	3,00	0,67
25	Марганец +2	54,93	+2	0,91	2,00
	» +3	—	+3	0,70	—
	» [MnO ₂]	—	—5	—	—
	» +4	—	+4	0,52	9,10
26	Железо +2	55,84	+2	0,83	2,12
	» +3	—	+3	0,67	5,15
	» [Fe ⁺⁺⁺ O ₄]	—	—5	3,25	3,85
27	Кобальт +2	58,94	+2	0,82	2,15
	» +3	—	+3	—	—
28	Никель	58,69	+2	0,78	2,18

Таблица 3

их свойства в геохимии
комплексные ионы)

Взв	Кларк атомный	Цветность, хроматиче- ский символ	Генетические особенности
1,10 0,37 0,23	17,25 — —	0+0 0+0 0+0	Гипергенный » Рудные жилы
0,55 1,32 0,56	0,012 1×10^{-3} 7×10^{-3}	0+0 0+0 0+0 (0+0,5)	Пегматиты гранитные » Гранитная магма
3,05 0,39 0,37 0,19 0,77 0,37	0,51 — 0,05 — 53,39 0,07	— 0+0 0+0 0+0 1,5+0 0+0	Гипергенная биосфера Гипергенный » » » Пегматиты гранитные
0,45 1,05 1,65 0,80 2,15 0,69 0,50 0,57 0,34 0,25 0,21	1,82 1,72 4,80 — 16,11 — 0,07 0,05 — 0,10 —	0+0 0+0 0+0 0+0 0+0 0+0 0+0 4+1,5 0+0 0,5+0 0+0	— Протокристаллизация Телокристаллизация » Магматический — Магматический гипергенный Глубинных рудных жил Гипергенный — —
0,36 0,87 1,55 2,10 1,55 0,61 1,77 3,02 — 1,58 0,34 1,00 — 0,16 2,28 1,06 1,72 0,77 1,07 — 1,09	1,05 1,41 $1,5 \times 10^{-3}$ 0,22 — — 7×10^{-3} — — 9×10^{-3} — 0,03 — — — — 1,31 — — 9×10^{-4} — 6×10^{-3}	0+0 0+0 0+0 $1,5+3(?)$ —(?) 1+2 1+8 1+2,5 1+2 $2+10(?)$ 0,5+2 1+Розов. 1+3 1+3 Черный 1+1 $1,5+2,5$ 0+1,5 1+Розов. 1+3 1+9	Гипергенные пегматиты Магматический гипергенный Магматические пегматиты гранитные Основные магмы » » » Гипергенный » Основные магмы Гипергенный Средние магмы Пегматиты — Гипергенный Основные и ультраосновные породы Гипергенное Пегматиты, гипергенное Рудные жилы Гипергенный Основные и ультраосновные породы

Порядковый номер эле- мента	Элемент	Атомный вес	ω (геох.)	R попа	Эк
29	Медь +1	63,57	+1	0,96	0,70
	» +2	—	+2	?	2,10
30	Цинк	65,38	+2	0,83	2,20
31	Галлий	69,72	+3	0,62	5,41
32	Германий	72,60	+4	0,44	10,53
	» [GeO ₄]	—	-4	—	—
	» [GeS ₄]	—	-4	—	—
33	Мышьяк	74,91	+3	—	—
	» [AsO ₄]	—	-3	2,95	1,53
34	Селен	78,96	-2	1,91	1,10
	» [SeO ₄]	—	-2	—	—
	» [SeO ₃]	—	-2	—	—
35	Бром	79,92	-1	1,96	0,22
37	Рубидий	85,44	+1	1,49	0,33
38	Стронций	87,63	+2	1,27	1,53
39	Иттрий	88,92	+3	1,06	3,95
40	Цирконий	91,22	+4	0,87	7,85
	» [ZrO ₄]	—	-4	3,50	2,30
41	Ниобий	92,91	—	0,69	13,60
	» [NbO ₄]	—	-1	—	—
42	Молибден	96,0	+4	0,68	8,50
	» [MoO ₄]	—	-2	3,45	0,58
43	Мазурий	—	—	—	—
47	Серебро	107,88	+1	1,13	0,80
48	Кадмий	112,41	+2	1,03	2,00
49	Индий	114,76	+3	0,92	4,35
50	Олово	118,70	+4	0,74	7,90
	» [SnO ₄]	—	-4	—	—
51	Сурьма	121,76	+3	(0,90)	—
	»	—	+5	—	12,25
	» [SbO ₄]	—	-3	—	—
52	Теллур	127,61	-2	2,11	0,95
	» [TeO ₄]	—	-2	—	—
	» [TeO ₃]	—	-2	—	—
53	Иод [J]	126,92	-1	2,20	0,18
	» [JO ₃]	—	-1	3,55	0,14
55	Цезий	132,91	+1	1,65	0,30
56	Барий	137,36	+2	1,43	1,35
57	} TR	138,92	+3	1,22	3,58
71		175,0	—	-0,99	-3,98
		[TRO ₄] (?)	-5	—	—
		[CeO ₄]	-4	—	—
72	Гафний	178,6	—	0,86	7,81
73	Тантал	180,88	—	0,69	13,60
	» [TaO ₄]	—	-1	—	—
74	Вольфрам	184,0	+6	—	19,35
	» [WO ₄]	—	-2	3,52	0,57
75	Рений	186,31	+4	0,68	28,10
	» [ReO ₄]	—	-1	—	—
79	Золото	197,2	+1	1,37	0,65
80	Ртуть	200,61	+1	?	<0,93

Таблица 3 (продолжение)

Взв	Кларк атомный	Цветность, хроматический символ	Генетические особенности
0,70	3×10^{-3}	2+1	Рудные жилы
1,05	—	2+7 (CH_2O)	Гипергенные железные шляпы
1,10	5×10^{-3}	0+0,5	Рудные жилы
1,80	$1,5 \times 10^{-5}$	0+0	» »
2,64	6×10^{-6}	0+0	» »
—	—	0+0	» »
—	—	1,5+3,5	» »
—	1×10^{-4}	0,5+0	» »
0,51	—	0+0,5	Гипергенный
0,55	$1,5 \times 10^{-6}$	4,5+2	Рудные жилы
—	—	0+0	Гипергенный
—	—	0+0	»
0,22	2×10^{-4}	1+0,5	»
0,33	2×10^{-3}	0+0	Пегматиты гранитные
0,76	8×10^{-3}	0+0	Пегматиты щелочные, гипергенный
1,32	1×10^{-3}	0+0 (?)	Пегматиты гранитные
1,96	5×10^{-3}	1+1,5	Пегматиты щелочные
0,57	—	1+2	» »
2,92	6×10^{-6}	—	Пегматиты гранитные и щелочные
—	—	1+3	—
2,12	2×10^{-4}	?	Рудные жилы
0,29	—	1+1	Железная шляпа
—	$1,5 \times 10^{-6}$	—	—
0,60	$1,5 \times 10^{-6}$	1,5+1,5	Рудные жилы
1,00	8×10^{-6}	0,5+0	» »
1,45	$1,3 \times 10^{-6}$	?	» »
1,98	1×10^{-6}	1+1,5	» » и пегматит
—	—	1+1	Пегматиты щелочные
—	7×10^{-6}	0,5+0,5	Рудные жилы
2,45	—	0,5+0,5	» »
—	—	1+1,5	» »
0,47	$1,5 \times 10^{-7}$	5+3	» »
—	—	0+0	Железная шляпа
—	—	0+0	» »
0,18	$1,5 \times 10^{-6}$	1+1	Гипергенный
0,14	—	0+0,5	Пустыни
0,30	$1,5 \times 10^{-4}$	—	Пегматиты гранитные
0,67	6×10^{-3}	0+0	Гипергенный
1,19	1×10^{-3}	0+0	Пегматиты гранитные
—1,33	—	1+1,5(1+3)	Пегматиты гранитные
—	—	?	Пегматиты гранитные
—	—	?	» »
—	4×10^{-5}	См. Zr	» »
2,72	$2,3 \times 10^{-6}$	—	» »
—	—	1+3	» »
—	9×10^{-3}	—	Пневматолиты, рудные жилы
0,28	—	2+2	» » »
—	1×10^{-6}	?	» » »
—	—	?	Гипергенный
0,65	4×10^{-7}	?	Рудные жилы
<0,93	7×10^{-6}	0,5+0	» »

Порядковый номер эле- мента	Элемент	Атомный вес	ω (геох.)	R иона	Эк
80	Ртуть	—	+2	1,12	2,10
81	Таллий	204,39	+1	1,49	0,42
82	Свинец	207,22	+2	1,32	1,65
	»	—	+4	0,84	7,95
83	Висмут	209,00	+5	—	11,90
	» [BiO ₃]	—	-1	—	—
90	Торий	232,12	+4	1,10	6,80
	» [ThO ₄]	—	-4	—	—
92	Уран	238,07	+4	1,05	7,00
	» [UO ₂]	—	+2	—	—
	» [UO ₄]	—	-2	—	—

Примечания. 1. Не указаны благородные газы; они заменены горизонтальной чертой. Все они инертны, практически в геохимии соединений не дают, бесцветны. 2. Не даны величины ионов $[\text{VO}_4]^{-1}$, $[\text{MnO}_4]^{-1}$, $[\text{GeO}_4]^{-4}$, $[\text{GeS}_4]^{-4}$, $[\text{SeO}_4]^{-2}$, $[\text{SeO}_3]^{-3}$ и некоторые другие; вероятно, их R около 2,8—3,0 Å. 3. Знак — обозначает отсутствие данных. 4. В таблицу включено всего 100 важнейших ионов (из 150 известных геохимии). Для остальных мало точных данных.

большей энергией растворяются много труднее, чем решетки, составленные из ионов с небольшими эквами.

Кроме сказанного, величина вэка характеризует очень важное свойство каждого иона, именно является мерой щелочности катиона и кислотности аниона. В следующей главе мы несколько детальнее познакомимся с этим вопросом, но сейчас нам нужно запомнить общее мнемоническое правило, что чем меньше величина вэка данного катиона, тем более щелочной характер он носит, — таковы, например, цезий, рубидий или барий; чем меньше величина вэка аниона, тем более кислый характер он носит, — таков, например, ничтожный вэк $[\text{JO}_4]$ и т. д. Полностью это правило применимо лишь к шаровым ионам типа благородных газов.

Однако самое важное положение, вытекающее из изучения величин эквов при анализе геохимических процессов, заключается в том, что они отвечают последовательности выпадения из растворов кристаллических решеток. Теоретический анализ уже подсказал нам, что те ионы, которые выделяют больше энергии при образовании решетки, должны раньше выпадать из растворов, выделять избыточную свою энергию и переходить в более устойчивое состояние. Поэтому величина энергии решеток (для соединения) и величина эквов (для отдельных ионов) в общем определяют последовательность их выпадения для сложных природных растворов. Конечно, изменение концентрации вносит очень серьезную поправку в эту схему, которая применима в точности лишь для растворов в молекулярных количествах, но, как мы убедимся в дальнейшем, общий ход состава растворов довольно постоянен в природе и колебания концентрации нормально не выходят за пределы, отвечающие границам энергетических равновесий. Поэтому мы можем сказать, что последовательность кристалли-

Таблица 3 (продолжение)

Эк	Кларк атомный	Цветность, хроматический символ	Генетические особенности
1,05	—	2+0,5	Рудные жилы
0,42	8×10^{-7}	1+0,5	» »
0,82	1×10^{-4}	1,5+0,5	» »
1,99	—	2+2	» »
—	8×10^{-7}	0,5+1	» »
—	—	0,5+1	» »
1,70	1×10^{-4}	1+2	Пегматиты
—	—	1+4	»
1,75	4×10^{-5}	2+2,5	Пегматиты и рудные жилы
—	—	0,5+1,5	» » » »
—	—	1+2	» » » »

зации при понижении температуры процесса нормально следует понижению величины энергии решетки с соответственными поправками на обычные природные соотношения (кларки).

Уже в первых работах В. М. Гольдшмидта отмечалось, что величина радиуса иона в значительной степени предопределяет способность к растворению и к миграции соответственных соединений. Так, как известно, в ряде ионов натрия, калия, рубидия и цезия наибольшим радиусом ионов и наименьшей величиной экв и экв обладает цезий, а потом рубидий. Исходя из этого, мы должны ожидать, что в природных процессах накопление цезия и рубидия должно быть связано с самыми конечными фазами процессов, т.е. с остаточными геофазами пегматитов или последних кристаллизаций соляных шлоков. Таким образом, в схеме величина экв предопределяет то место, которое занимает ион в нормальной эволюции геохимических расплавов и растворов земной коры; она определяет в общем время кристаллизации и, следовательно, предопределяет тот парагенезис, те ассоциации химических элементов, которые выпадают в данный отрезок времени на данном отрезке общей физико-химической диаграммы хода кристаллизации. А если это так, если энергия ионов предопределяет порядок кристаллизации и намечает группу соединений, образующихся одновременно, то, следовательно, энергия решеток и ионов намечает как бы этапы процесса, как бы отдельные ступени его и придаст каждому сочетанию минералов энергетический смысл. Как правило, мы должны говорить, что ионы малых экв будут встречаться в решетках конечных процессов кристаллизации наиболее подвижных систем, и, наоборот, ионы больших экв будут выпадать в решетках более ранних чисто магматических кристаллизаций.

Но энергия ионов предопределяет еще один важный момент; поскольку ионы обладают различной энергией, постольку они обладают различной активностью по отношению к любой уже существующей кристаллической решетке. Если мы имеем кристалл углекислого кальция с ионом Са, эк которого равен 1,75, то совершенно очевидно, что в этой же решетке ион магния с экм 2,10 окажется более устойчивым, чем ион кальция, если станет на его место; действительно, в природных процессах ион большей энергии будет всегда замещать ион меньшей (при равенстве величины

зарядов). Этим объясняется замещение кальция известняков магнием, цинком или закисью железа — один из хорошо известных общих процессов, широко распространенных в земной коре. Аналогично намечается возможность и «необходимость» замещения калия натрием и особенно литием. Поскольку ионы с большой энергией в менделеевской системе занимают место наверху таблицы, постольку именно элементы верхних рядов таблицы будут нормально замещать нижние, хотя нижние как раз должны стремиться выделиться в наиболее поздние стадии процесса. Отсюда же вытекает понятие о полярном изоморфизме, которое заключается в том, что изоморфные замещения двух сходных по размерам ионов не равноценны, а зависят от того, который из ионов обладает большей энергией; так, мы должны ожидать, что замещение кальция очень сходным по объему ионом какой-либо из редких земель энергетически будет выгодно, тогда как обратный процесс или будет требовать очень высоких концентраций кальция, или вообще не будет иметь места.

Таким образом, понятие полярного изоморфизма вызывает новые представления о замещении отдельных ионов, исходя не только из их объема, но и из энергетической выгодности их вхождения в решетку. Мы не будем говорить об основном вопросе — о рассеянии и концентрации ионов, так как ему ниже посвящается специальная глава, но мы должны принять во внимание, что и эти два явления находятся в тесной зависимости от энергетических показателей самих ионов.

Переходим к главнейшим выводам. Эки и взки, при всей сложности этого понятия, представляются нам в виде весьма удобного энергетического показателя, который грубо ориентировочно позволяет нам разбираться в геохимическом процессе и в свойствах кристаллических решеток. Величина экв и эквк предопределяет последовательность кристаллизации, вопросы рассеяния и концентрации, направления метасоматоза и замещения, а потому даже в полевой обстановке оказывается возможным на основе величин экв и эквк подвергать предварительному анализу наблюдаемые взаимоотношения геохимических образований.

3. ОСНОВНЫЕ ФАКТОРЫ ГЕОХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

В настоящей главе мы даем краткий перечень тех основных факторов геохимических реакций, которые играют особую роль в процессах перемещения, миграции и накопления химических элементов в земной коре. Мы, конечно, должны иметь в виду, что приводимые ниже основные факторы не определяют всей совокупности тех сложных термодинамических и частью электродинамических условий, в которых протекает природный процесс, но думаем, что в основном они все же ограничиваются преимущественно четырьмя главнейшими величинами — температурой, давлением, концентрацией водородных ионов (pH) и окислительно-восстановительным потенциалом (rH)¹.

Температура

Вопрос температуры, несомненно, является самым важным при анализе природных процессов. Если каждое геохимическое исследование, пытаясь восстановить историю прошлого данного района, может подсказать наиболее вероятные температуры, имевшие некогда место при процессах образования данного комплекса, то, и наоборот, зная температурные условия,

¹ Особую, притом большую роль в геохимии играют биохимические реакции.

можно предсказать наличие тех или иных геохимических образований. Мы знаем, что в основном процессы в земной коре протекают в интервале температур от 1500 примерно до -50° . Однако подавляющая часть природных процессов связана с температурами средними — от 600° до 200° и низкими — от $+100$ до -50° . Процессы образования находятся в тесной зависимости от всего хода температурного режима, причем наиболее типичные явления в земной коре, связанные с образованиями наиболее важных минеральных скоплений, вызываются понижением температуры при охлаждении магматических очагов и выделениях при этом различных дериватов, расплавов, пегматитов, летучих погонов, горячих растворов и т. д. Каждый магматический очаг, независимо от глубины его остывания, окружен ореолом таких образований, причем по мере удаления от очага температура падает все больше и больше, определяя этим тот температурный геохимический градиент, с которым связано распределение и соответственных минеральных видов.

С точки зрения поисковых признаков вопрос о температуре процессов имеет огромное значение. Мы знаем, что при высоких температурах вообще образуются соединения безводные, лишенные летучих компонентов, тогда как при низких появляются кристаллические образования обычно с значительным содержанием газов или воды. Знаем также, что ход понижения температуры вызывает последовательную смену тех или иных устойчивых минеральных видов, причем вначале, в первых стадиях кристаллизации выделяются и накапливаются по преимуществу четные, устойчивые решетки четных ионов и атомов. Законы геохимии наметили в достаточной степени общие взаимоотношения между температурой и последовательностью осаднения, о чем подробно говорится в III томе «Геохимии» (1937).

Давление

Фактор давления, нередко недостаточно учитываемый при современном геохимическом анализе, не столько оказывает непосредственное влияние на растворимость и точки кристаллизации, сколько обладает способностью удерживать в данном расплаве или растворе определенные количества летучих соединений. Высокое давление препятствует процессу выделения летучих компонентов, сохраняет их в большей мере в остаточных расплавах или растворе, повышает критическую точку воды и создает возможность осаждения кристаллических соединений с летучими веществами. Наоборот, сильно пониженное давление вызывает быстрое выделение летучих погонов, сближает поле магматическое с полем гидротермальным и вызывает быстрый переход от магмы к простым водным растворам.

Конечно, решающее значение имеют не абсолютные величины давления, а соотношения внешнего давления и упругости паров тех летучих веществ, которые находятся в расплаве или растворе. При постепенном понижении температуры величина упругости паров, т. е. внутреннего давления, может в иных случаях повышаться настолько, что оказывается равной величине внешнего, что приводит систему в кипение при понижении температуры. Такие процессы, несомненно, имеют место в природе, и на них приходится обращать самое серьезное внимание.

Концентрация водородных ионов (pH)

В последние годы мы все более и более убеждаемся, что на ход процессов, начиная с магматических и кончая холодными водными растворами, оказывает огромное влияние концентрация водородных ионов, т. е. степень

Выпадение гидроокисей главнейших металлов при разных

pH	2		3		4	5			6
$w=5$ 4 3 2 1	Nb, Ta Si, Ge		Ti, W, Mo Fe ⁺³		Zr	Th(Ce ⁺⁴) Ga, Al, Mn ⁺³ Be			Y
R иона	0,39	0,44	0,64	0,68	0,87	0,62	0,57	0,70	1,06
Эк	13,6—8,0	10,5	8,4	8,5—5,15	7,8	5,4	5,25	~4,5	3,95
Вэк	2,9—2,2	2,6	2,1	2,1—1,7	1,9	1,8	1,7	~1,5	1,3
Характер рас- творов . . .	кислые		слабокислые				нейтраль		
Условия ги- пергенеза . .	Арктика		растворы субтропиков торфяные воды				дождевая		

их кислотности или щелочности. Этот вопрос особенно детально разобран в томе III «Геохимии» на стр. 424, где указано, что величина концентрации водородных ионов, особенно в поверхностных процессах, весьма изменчива и в разных географических и климатических условиях колеблется очень резко, достигая 1 для серы при ее окислении, поднимаясь до нейтральных 7,5—8 для морской воды и, наконец, повышаясь до 12 и выше в условиях пустынного режима.

В табл. 4 правильно схематически отображены условия выпадения гидроокислов различных химических элементов в разных условиях щелочности или кислотности растворов. Вэки катионов и анионов являются прекрасной мерой кислотности и щелочности среды, что мы видим из данных табл. 5 и 6.

Изучение влияния концентрации водородных ионов на природный процесс в области высоких температур только начинается, но мы уже сейчас видим огромное влияние этого фактора на ход природных магматических и постмагматических процессов.

Приводим один пример последнего времени, который показывает глубокую зависимость образования тех или иных природных минералов от величины концентрации водородных ионов.

И. Д. Седлецкий в работе 1939 г. вполне убедительно доказывает, что обычно каолиновые минералы образуются в условиях кислых вод, т. е. низкой величины pH, тогда как соединения типа монтмориллонита образуются в водах щелочных, богатых солями, в сланцах, продуктах выделения из рассолов и т. д. Сюда относятся как раз так называемые бентонитовые глины, имеющие огромное значение для промышленности очистки масел и нефти, для которых до сих пор мы не имели руководящих указаний в смысле их поисков. Теперь в общем мы знаем, что глины с высокими адсорбционными свойствами мы должны будем искать при условиях господства высокого pH, т. е. в условиях, богатых щелочами; эти выводы вытекали и у

Таблица 4

рН, т. е. при изменении концентрации водородных ионов

7			8		9		10	>11		>12	
Sc Fe Zn			V ⁴⁺ Co TR Ni		Hg Mn		Cd	Mg Ca		Sr Na Ba K	
0,83 2,1 1,5	0,86 2,1 1,06	0,83 4,6 1,5	0,82 2,1 1,0	0,78 2,1 1,0	1,12—0,91 2,1—1,95 1,0—0,9		1,03 2,00 1,0	0,78 2,10 1,1	1,06 1,75 0,9	1,27 1,5—0,5 0,7—0,5	1,43 1,3—0,3 0,6—0,3
иные растворы					щелочные растворы						
и речная вода, океан					пустыни						

Таблица 5

Вэки анионов как мера кислотности

Анионы	Основность кислоты	Вэки	Кислотность
JO ₃	—1	0,14	} Очень сильные
MnO ₄	—1	0,16	
J	—1	0,18	
NO ₃	—1	0,19 (0,23)	
ClO ₄	—1	0,21	} Сильные одноосновные
Br	—1	0,22	
SH	—1	0,23	
CN	—1	0,25	
Cl	—1	0,25	} Средние двухосновные
CrO ₄	—2	0,33	
SO ₄	—2	0,34	
OH	—1	0,37	
F	—1	0,37	} Слабые трехосновные
CO ₃	—2	0,39	
PO ₄	—3	0,50	
BO ₃	—3	0,56	
SiO ₄	—4	0,69	} Очень слабые
FeO ₄	—5	0,78	
AlO ₄	—5	0,80	

Таблица 6

Вэки катионов как мера щелочности

Катионы	Вэки	pH образования гидратов	Щелочность	
P ⁺	3,10	—	Катионы кислотные	В геохимии всегда образуют анионы комплексные
V ⁺	3,02	—		
Nb — Ta ⁺	2,72	—		
Mn ⁺	2,28	Около 2		
Si ⁺	2,15	—		
Ti ⁺	2,10	—	Кислотного типа	
B ⁺	2,00	—		
Zr — Hf ⁺	1,96	2,5—5		
V ⁺	1,77	—		
Fe ⁺	1,72	3—6		
Th ⁺	1,70	3,5—4	Щелочного типа	
Al ⁺	1,65	4,1—5,5		
Cr ⁺	1,58	5,4—(6)		
Sc ⁺	1,55	—		
Ti ⁺	1,55	—		
Be ⁺	1,33	5 и 6,5	Слабые основания	
TR {	Cp ⁺	1,33		
	Y ⁺	1,32		
	La ⁺	1,20		
H ⁺	1,10—1,20	—	Средние основания	
Ni ⁺	1,09	6,7		
Co ⁺	1,07	6,8		
Fe ⁺	1,06	5,5		
Mg ⁺	1,05	10,5		
Mn ⁺	1,00	8,5—(9)	Очень сильные основания	
Ca	0,87	>11,0		
Sr	0,76	—		
Ba	0,67	—		
Li	0,55	—		
Na	0,45	—		
K	0,36	—		
Rb	0,33	—		
Cs	0,30	—		

И. Д. Седлецкого из рассмотрения эмпирического материала, но сейчас они получают более глубокое теоретическое обоснование в новейших работах Ниггли над структурой каолиновых минералов. По его представлениям, эти минералы состоят из переслаивания слоев тетраэдрического типа слоями октаэдров. Повышенная величина pH говорит о преимущественном образовании слоев тетраэдрических, т. е. переводит как кремний, так и алюминий в состояние комплексных ионов типа тетраэдра. Усиление тетраэдрических слоев и ослабление содержания алюминия в октаэдрических и будет вести к образованию монтмориллонита с большим содержанием кремнезема вместо нормального каолинита.

Этот замечательный пример показывает, как постепенно под влиянием анализа геохимических факторов, с одной стороны, и кристаллохимических представлений, с другой, не только намечаются, но и объясняются поисковые признаки глинистых минералов высоких технических свойств.

Окислительно-восстановительный потенциал (rH)

Роль окислительно-восстановительного потенциала (так называемого редокса, rH) начинает выясняться только в последнее время. Для геохимии особенно важным является влияние этой величины на выделение таких элементов, которые в разных условиях окисления образуют ионы разной валентности. В статье В. В. Щербины¹ намечается применение этой величины при анализе возможности совместного нахождения отдельных минералов, особенно сульфидов, в месторождениях: некоторые сочетания оказываются «запрещенными», другие, наоборот, категорически предписываются соотношениями величин редокса, который, таким образом, подсказывает правильные пути для поисков ряда полезных ископаемых (особенно соединений тяжелых металлов).

4. КОНЦЕНТРАЦИЯ И РАССЕЯНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ

Вопрос о концентрации элементов является, в сущности, основой учения о месторождениях полезных ископаемых. Мы уже говорили о том, что вообще месторождением необходимо называть всякую концентрацию элемента выше его кларка. Но месторождением промышляемыми мы назовем только такое, которое при данной экономической и технической конъюнктуре как вообще, так и в частности по отношению к данному району, может обеспечить эксплуатацию полезного ископаемого с достаточной государственной выгодой.

Нет никакого сомнения, что с точки зрения современного экономического учения вопрос этот не простой. В условиях капиталистического мирового рынка он находится в прямой зависимости от соотношения предложения и спроса; в условиях же социалистического хозяйства он носит более глубокий характер, так как наше хозяйство основано на государственном комбинировании сырья, благодаря чему экономика отдельных частей подчиняется общей экономике всего комплекса. Для нас, однако, важно иметь в виду, что понятие о «месторождении» в своей основе чисто геохимическое, и поэтому выяснение его должно входить как один из важнейших разделов в современную теоретическую и практическую геохимию. Об этом говорил еще В. Линдгрэн в 1922 г. на съезде по практической геологии, где он свою речь озаглавил так: «Концентрация и минерализация химических элементов с точки зрения промышленной геологии».

Таким образом, основой нашей задачи является установление мест повышенной концентрации данного элемента. Степень этой аккумуляции, или накопления, элементов может быть весьма различной и имеет большое значение для промышленной оценки данного месторождения.

Абсолютные цифры содержания отдельных элементов в земной коре очень велики. Даже редчайший радий находится в количестве, достигающем миллионов тонн, но это количество исключительно рассеяно. Требуется особое сочетание условий, чтобы накопление данного рассеянного элемента повысило бы его кларк в данном месте.

¹ В. В. Щербина. Окислительно-восстановительные потенциалы в применении к изучению парагенезиса минералов. Доклады Акад. Наук СССР, 1939, № 8.

Следовательно, вопрос об образовании месторождения сводится к тому, насколько в данном районе наблюдаемое среднее содержание превышает средний кларк земной коры. Величину соотношений между этими двумя кларками мы можем назвать кларком концентрации (или коэффициентом концентрации) и рассматривать его как частное от деления содержания данного элемента в данном участке на среднее содержание (кларк) элемента данной геохимической системы.

Мы можем несколько сузить это понятие и говорить о промышленной концентрации, т. е. о том коэффициенте концентрации, который необходим для того, чтобы получить скопления, годные для практической эксплуатации. Мы приводим на основании ряда данных несколько характерных примеров такого рода коэффициентов промышленной концентрации, причем в первом столбце помещаем названия элементов, во втором даем среднее практическое содержание (в процентах весовых) для таких месторождений, в которых данные элементы эксплуатируются, а в третьем — коэффициент концентрации или, по выражению академика В. И. Вернадского, «кларк концентрации»:

Висмут	2,0	1300 000	Уран	1,0	1000
Торий	0,3	80 000	Марганец	36	400
Мышьяк	10	70 000	Цинк	16	400
Сурьма	10	70 000	Фтор	39	400
Ртуть	0,6	40 000	Сера (в сульфидах)	42	300
Кадмий	0,6	40 000	Углерод	80	200
Золото	0,001	10 000	Натрий	36	15
Вольфрам	0,8	8 000	Железо	55	11
Кобальт	2,5	1 500	Кремний	45	1,5
Селен	0,02	1 300			

Приведенная таблица является, конечно, лишь ориентировочной, но она указывает, что для промышленной концентрации ряда элементов необходимы очень значительные накопления по сравнению с их средним кларком.

Зная кларк концентрации, можно определить и величину запаса химического элемента в данном участке земной коры. Следует различать запасы геохимические — полное количество элементов; запасы геологические — полное количество элемента, содержащегося в рудной массе, но не в горной породе; запасы промышленные — часть геологических запасов, допускающая в настоящее время экономически выгодное извлечение из месторождений в виде руды.

Теоретическое освещение проблемы. Попробуем вкратце проанализировать рассеяние и концентрацию (рис. 2) элементов с точки зрения законов современной геохимии.

Перечислим сначала те свойства, которые чисто теоретически должны вести к большому рассеянию (или концентрации в обратном случае):

1) неспособность давать соединения и потому отсутствие явлений фиксации в виде прочных химических соединений (например, благородные газы);

2) низкая температура кипения и температура плавления, т. е. легкий переход в газовое состояние элемента, также низкие теплоты кипения и плавления;

3) низкий потенциал ионизации, легко позволяющий переходить в возбужденное и подвижное состояние;

- 4) низкая валентность, преимущественно нечетная ($\varpi = 1$ или 3);
- 5) крайние величины (очень малые или очень большие) радиусов атомов и особенно ионов; для малых — образование летучих «замкнутых» решеток; для больших — растворимость и сильная гидратация;
- 6) нечетность номера, группы, атомного веса, координации и валентности;
- 7) очень высокие атомные объемы (или удельные объемы);
- 8) для редких элементов — особенная близость по свойствам с элементами большого распространения (больших кларков), например гафния по отношению к цирконию;
- 9) большая растворимость главных солей и соединений;
- 10) сильная поляризация ионов в решетках, ведущая к понижению температуры плавления и теплоты диссоциации.

Все эти свойства тесно связаны между собой и объединяются преимущественно особенностями энергии ионов этих элементов.

На основании сказанного мы можем чисто теоретически построить ряд дисперсных элементов и сравнить его с теми эмпирическими списками, которые были составлены академиком В. И. Вернадским на основании изучения поведения элементов земной коры. Может быть дан следующий список дисперсных элементов:

Теоретический: H, He, Li, B, N, F, Ne, Na, Ar, K, V, Ga, As, Br, Kr, Rb, Ag, In, J, Xe, Cs, Ta, Re, Au, Hg; Tl, радиоактивный ряд.

Наблюдаемый: H, He, Li, Be, B, C, N, F, Ne, Na, Cl, Ar, K, Sc, V, Mn, Ga, As, Br, Kr, Rb, Y, Nb, Ma, Ag, In, J, Xe, Cs, TR, Re, Au, Tl, Pb, Bi, Po, Ab, Rn, Vi, Ra, Ac, Th, Pa, U (нечетных 70%).

Расхождение между этими рядами невелико и касается лишь Be, C, Sc, Mn, Hg и отчасти Pb.

Исходя из этих представлений, мы можем наметить те области, в которых можно ожидать накопления дисперсных элементов:

1. В последних рассолах солевых бассейнов и океана:
J, № 85, № 87, Cs, Rb, Br.
2. В остаточных пегматитах и постпегматитовых водах:
Li, B, Cs.
3. В остаточных водах рудных жил:
Tl, Hg, Au и т. д.

Отличительные черты элементов концентрации. В соответствии с дисперсностью элементов наметим основные черты, определяющие способность атомов к концентрации:

- 1) высокая температура кипения и плавления;
- 2) средние, скорее низкие радиусы ионов и атомов;
- 3) средняя валентность и особенно четная (2, 3 и отчасти 4);
- 4) средний потенциал ионизации;
- 5) четность номеров, групп, атомного веса, изотопов, координационного числа;
- 6) трудная растворимость, большая твердость;

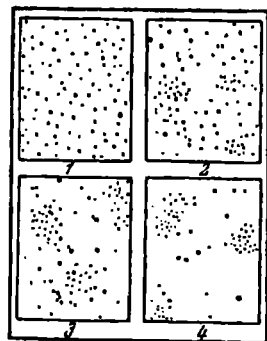


Рис. 2. Разнообразные типы рассеяния 100 точек на одной и той же площади

1 — равномерное рассеяние; 2—3 — рассеяние с отдельными слабыми очагами концентрации; 4 — почти полная концентрация в строго определенных участках. Эта диаграмма характеризует разные типы распределения элементов и минералов в природных комплексах.

7) большая плотность, низкие величины атомных объемов;

8) средние (скорее высокие) величины экв.

Энергетическая разгадка приведенных положений совершенно ясна. Наибольшей способностью к концентрации обладают четные элементы с высокими вообще эквами. Но это положение ограничивается и снизу и сверху. Низкие экви ведут, как мы видели, к большей дисперсии и к меньшей энергетической прочности соединений, следовательно, они отпадают, особенно если они нечетны; с другой стороны, отпадают и ионы с очень большими эквами, так как в условиях избытка кислорода (или серы) они образуют комплексные анионы с очень малыми эквами или же летучие замкнутые («молекулярные») решетки. Это ограничение сверху определяется уже вполне резко верхней частью четвертой группы, благодаря чему поле устойчивых элементов максимальной концентрации очень сильно суживается: $w = 1$ и $w = 4$ почти полностью отпадают, равно как $w = 5$ и $w = 6$. Остаются на первом месте $w = 2$, небольшая часть $w = 4$ и $w = 3$. Сильная поляризация и связанное с этим понижение температуры кипения выводят из этой группы и ряд элементов с ионами типа купро. Теоретически остаются, в сущности, только следующие элементы:

(Ti), Zr, Hf, Th, обладающие $w = 4$; O, S, Mg, Ca, Fe, Co, Ni, Mn с $w = 2$; Al, V, Cr, Fe⁺³ с $w = 3$.

Таким образом, список элементов, особенно способных к концентрации, оказывается небольшим, но он почти полностью отвечает нашим представлениям о протокристаллизации.

Редкость или общность элемента. Понятие редкости и общности элемента не перекрывается понятием дисперсности и концентрации, хотя и очень близко к нему.

Чем может объясняться редкость какого-либо элемента в данной точке? Очевидно, одной из трех причин: во-первых, вообще большой редкостью данного элемента, его малой устойчивостью или недолговечностью; во-вторых, тем, что этот элемент где-либо в другом месте накоплен в больших количествах и поэтому его в данной точке мало; в-третьих, тем, что вообще этот элемент рассеян, нигде не дает скоплений и носит поэтому всюду дисперсный характер.

Нет никакого сомнения, что, анализируя редкие элементы в земной коре, мы можем совершенно определенно наметить существование всех трех групп, а именно:

I. Вообще редки:

а) малоустойчивые, дефицитные согласно первичным кларкам в космосе: Li, Be, B;

б) малоустойчивые вследствие высокой величины заряда (по кривой кларков): Ta, W, Re, Os, Ir, Pt, Au, Hg, Te, Bi, Th, V, вероятно № 85 и № 87;

в) элементы радиоактивного распада: Po, Rn, Ra, Ac, Th, Pa, U.

II. Редки в земной коре, так как выделились раньше (т. е. вне доступных нам зон земной коры) из многофазовой системы:

а) сидерофилы: Ge, W, Mo, Ni, Co;

б) платиновые металлы: Ru, Rh, (Pd), Os, Ir, Pt, отчасти халькофилы Se и Te, As, Sb, Bi и некоторые тяжелые металлы (Au).

Характерно обилие четных элементов в продуктах самой ранней протокристаллизации, чего и следовало ожидать.

III. Редки вследствие особенностей химических свойств рассеяния:

а) благородные газы, вследствие их общей инертности и дисперсности: He, Ne, Ar, Kr, Xe, (Rn);

б) ряд типично дисперсных элементов (нечетных) с низкими эками простых или комплексных ионов: Li, Be, B, F, Sc, V, Ga, Br, Rb, Y, Nb, In, Mo, J, Cs, TR, Ta, Hg, Tl, Au, U.

Главнейшая литература

- А. К. Болдырев. Сборник в честь акад. В. И. Вернадского. Изд. Акад. Наук СССР, 1936, I, 53—69.
В. И. Вернадский. Очерки геохимии. Гос. научн.-техн. горно-геол.-нефт. изд., 1934.
А. Е. Ферсман. Геохимия. 1934, ОНТИ, II, 54—56.
А. Е. Ферсман. Геохимия. 1937, Гос. хим.-техн. изд., III, 451—455.

Глава II

ПОИСКОВЫЕ ПРИЗНАКИ

(геохимические и минералогические)

ВВЕДЕНИЕ

В настоящей главе приведен анализ главнейших поисковых минералогических признаков, а также их соотношений с геологическими факторами. Детальный анализ этих признаков дается в современных сводках по минералогии и геохимии. Более подробно освещается вопрос о цвете, которому я придаю особое диагностическое значение. Вопросы парагенезиса изложены в общем слишком схематично и кратко и в дальнейшем должны быть проработаны более углубленно.

Как видно из изложенного, мы должны различать два типа поисковых признаков: одни связаны с природой самих подлежащих поискам объектов (минералов и элементов) и вытекают из особенностей строения как самих ионов, так и кристаллических решеток; вторые связаны с внешней средой и определяют те факторы, которые вызывают процессы концентрации химических элементов.

1. ЦВЕТ

Нет никакого сомнения, что цвет минералов и горных пород представляет важнейший диагностический признак, которым, однако, надо пользоваться геохимически продуманно¹.

Если правы некоторые авторы, предостерегающие разведчиков и минералогов от слишком широкого пользования цветом, то это в значительной степени связано с отсутствием до последнего времени более углубленного анализа окраски минералов как физического явления, зависящего от кристаллохимического строения соединения.

В моем анализе 1937 г. («Цвета минералов») я сделал попытку осветить эту проблему несколько глубже, характеризуя ее следующим образом:

Мы так свыклись в науке с понятием об окраске минерала, что забыли о том, что в сущности совсем еще не разобрались в ее причинах, привыкли считать железный колчедан золотистым металлическим, циркон — бурый или буро-красным, каменную соль — белой, окислы трехвалентного железа бурыми или коричневыми, что в нашей минералогической работе в последнее время мы даже не ставили себе вопроса, а почему это так, почему, действи-

¹ А. Е. Ферсман. Цвета минералов. Изд. Акад. Наук СССР, 1937, 1—157. См. замечание о цвете в «Курсе минералогии» под ред. А. К. Болдырева, 1936, 30.

тельно, окись железа всегда буро-красная, а турмалины и бериллы пестрой изменчивой окраски, почему медный купорос и его раствор всегда синий, а когда купорос выветрится и потеряет свою воду, делается белым? Необходимо иметь в виду, что окраска минералов и пород является одним из замечательнейших и характернейших признаков природных соединений. Ее значение прежде всего — в д и а г н о с т и к е, о п р е д е л е н и и минералов, так как все наше знание и опыт минералога, особенно в поле, основывается прежде всего на учете окраски; так, увидев синезеленые потоки, минералог правильно делает заключение о соединениях меди (или отчасти никеля), а по белым выцветам говорит о растворимых солях щелочей с галоидами или комплексными кислородными кислотами. Но минералог-геохимик идет еще много дальше этих эмпирических выводов описательной минералогии; он знает, что цвет данного минерала нередко изменяется в зависимости от условий образования и что, как правило, интенсивность окраски одного и того же минерала слабеет с падением температуры его образования; так, он знает, что темнобурые, почти черные кристаллы слюдяного камня связаны с высокими температурами в горячих газовых скоплениях (пнематолиза) и что по мере охлаждения кристаллы выпадают более светлыми, желтеют или даже приобретают зеленоватую окраску. Опытный минералог по цвету минерала делает, таким образом, очень важные выводы об условиях образования камня, но еще больше — его глаз позволяет отличить окраски минералов из разных месторождений, и неуловимые оттенки цвета, густоты тона, блеска позволяют ему по одному образцу говорить о том, откуда образец, т. е. восстанавливать прошлое минерала и его географию.

Перехожу к классификации окрасок минералов:

I. Идиохроматизм:

1. Собственная окраска минерала, вызванная тем, что в его состав входит какой-либо хромофор или его состав вызывает особое сочетание ионов — идиохроматизм.

2. Окраска минерала, получившаяся под влиянием излучения и связанная с изменением энергетического состояния атомов и ионов, из которых сложено соединение, — энергохроматизм.

3. Окраска соединения без ионов-хромофоров, но зависящая от особенностей строения кристалла, содержащего самостоятельные нейтральные группы (молекулы) — хромофоры, — стереохроматизм.

II. Аллохроматизм:

1. Окраска, вызванная посторонними примесями (изоморфными или эндокриптными). Эта окраска изменяется в зависимости не только от природы хромофора, но и от его состояния, величины частиц, рассеяния, количества и т. д.

2. Окраска, вызванная включением окрашенных минералов. Сюда относится и дисперсохроматизм, вызываемый действием света на дисперсные посторонние частицы.

III. Псевдохроматизм:

1. Окраска, связанная с рассеянием белого солнечного света.

2. Окраска, связанная с интерференцией или дифракцией световых волн.

Случай псевдохроматизма весьма редок и не имеет общего значения, весь же аллохроматизм сводится опять-таки к содержанию какого-то окрашенного соединения и, следовательно, непосредственно связан тоже с явлениями идиохроматизма.

Таким образом, в основном мы приходим лишь к одному пункту — к идиохроматизму, как к характерному, неотъемлемому

свойству некоторых химических соединений, — их окраска есть закономерное их свойство, некоторая константа, как твердость, удельный вес, температура плавления. Эта окраска несколько меняется в зависимости от условий образования минерала, от температуры кристаллизации, от наличия других веществ в растворе, от влияния внешних электрических полей, но в общем является типической.

Будучи связана, таким образом, с самым существом соединения, она может в нем меняться только от одной внешней причины — от сильных электрических лучей: рентгеновских, радиевых, катодных, ультрафиолетовых, которые обладают способностью проникать внутрь кристалла и действовать на ионы, атомы и окружающие их электрические поля.

С точки зрения цветности сейчас мы можем говорить условно о существовании как бы двух больших групп элементов.

Одна занимает всю менделеевскую таблицу без группы промежуточных элементов — окраски этих элементов меняются в зависимости от сочетания анионов и катионов, согласно основным законам поляризации, от желтых, бурых, красно-бурых к черным; их тона нечисты, и лишь в их крайних точках — в белых, бесцветных или темных металлических — мы видим более характерные и более определенные «неразмазанные» черты. Эти окраски характерны в сущности для 85 % всего окружающего нас минерального мира.

Вторая группа — это настоящие, действительные хромофоры, прежде всего ионы Ti, V, Mn, Cr, Fe, Co, Ni, в меньшей степени W, Mo, U и TR, очень резкие в комплексах и замечательных сложных вернеровских соединениях Pt, Co, Mo. Это и есть красители мира — основа ярких и чистых тонов, красота драгоценного и цветного камня, яркость и ценность искусственных стекол. Эта группа отвечает в общем промежуточным элементам, для которых характерно неполное заполнение внутренних электронных оболочек.

Иднрохроматические бесцветные минералы

Сюда относятся бесцветные, белые, молочные, серые минералы. Нередко наблюдаются слабые оттенки розовых цветов, природа которых не всегда ясна. Самыми характерными минералами являются:

Самородные — только алмаз (не всегда).

Галогидные — очень многочисленные соединения F, Cl (отчасти и Br) с Na, K, NH₄, Ca, Mg, Al, Ag. Интересно, что безводное соединение CuCl (нантокит) тоже белого цвета.

Окислы и гидраты — кварц, периклаз, диаспор, боксит, брусит, сассолин, арсенолит, сенармонтит, валентинит (последние сероватые).

Карбонаты — все карбонаты водные и безводные металлов Ca, Mg, Ba, Sr, Pb, Na, K.

Силикаты — очень многие группы без хромофоров: полевые шпаты (без примесей), лейцит, поллуктит, волластонит, нефелин, скаполит, фенакит, датолит, монтичеллит, вернерит, силлиманит, каламин. Все цеолиты (без примесей Fe₂O₃). Каолиновые минералы (без Fe⁺³) (мусковит).

Сульфаты — Ca, Ba, Sr, Na, K, Mg водные и безводные. Квасцы Al с K, Na, NH₄.

Вольфрамиты — кальций.

Нитраты — бесцветные соли Na, K, Ca, Mg, Ba, Ag.

Бораты — то же.

Фосфаты и арсенаты — Ca, Al, Li, Zn, Mg (без хромофоров).

Соли щавелевой кислоты — Ca.

Интересно отметить, что серыми — стальными, но прозрачными являются кислородные соединения Pb⁺², Bi⁺³, Sb⁺³ и As⁺³, что особенно типично для многочисленных соединений свинца.

Как видно из приведенного списка, все группы минералов имеют здесь своих представителей; только для самородных известен лишь один алмаз и для огромной группы серпигиных тоже только один минерал, и то обычно светло окрашенный — ольдтамит (в метеоритах).

Идиохроматические металлические окраски

В противоположность бесцветным, металлические окраски известны только среди самородных и серпигиных минералов; к ним могут быть отнесены и некоторые другие соединения с полуметаллическим блеском.

Самородные: As, Te, Sb, Bi, Au, Ag, Cu, Hg, Pb, Pt, Os, Ir, Fe и др. Серпигиные: Ni, Fe, Co, Ge, Pb, Ag, Cu, Au, Ru, Rh, Pd-соединения с S, Se, Te, As и Sb.

Сюда же относятся все сульфосоли $[As_n S_m]^{-x}$, $[Sb_n S_m]^{-x}$ в соединениях с Ag, Cu, Pb, Ti, Fe, Ge, Sn.

Иногда в сульфосолях наблюдается красная просвечиваемость (особенно у соединений Ag).

Исключение из этого составляют ZnS, CdS, HgS, AsS₂ и As₂S₃.

К полуметаллическим можно отнести:

Окислы — гематит, ильменит, магнетит, хромит, рутил (пиролюзит).

Нитраты и вольфраматы — нитраты Fe и Mn, вольфрамит (Fe и Mn).

Соединения углерода — антрацит, некоторые смолы. Сюда же условно относим графит.

Идиохроматические неметаллические окраски

Соединения желтого цвета

Желтые минералы не образуют замкнутой группы, а связаны рядом переходов, с одной стороны, с бесцветными, с другой, — с зеленоватыми и, с третьей, — с оранжевыми и бурными. При этом обычно в одном и том же минерале наблюдается весьма широкий предел колебаний оттенков и тонов.

Желтые и желтоватые минералы очень обычны и список их огромный; если же составить список всех соединений, которые вообще могут быть желтого или желто-бурого цвета, то он будет охватывать несколько сот видов и, вероятно, составит не менее 25% всех известных природных соединений.

Самородные — сера и золото.

Сульфиды — сфалерит (клеюфан), гринокит, аурипигмент.

Галогениды — весьма обычна желтая окраска у иодистых (редко бромистых) соединений сильно поляризующих катионов (Ag, Pb, Hg).

Окислы и гидраты — весьма обычная окраска благодаря сильной поляризуемости кислорода: бисмит (Bi₂O₃), теллуриит (FeO₂), тунгстит (WO₃), сервантит (Sb₂O₃), массикот (PbO). Сюда относятся как раз рудные охры (соединения W, Fe, Mo, As, U, Pb, V, Bi, Cr, Te, Sb), столь характерные для «железных шляп».

Карбонаты — сидерит (Fe⁺²), карбонаты редких земель (Ce, La), пирарит (Fe⁺³).

Силикаты — чисто желтые не очень многочисленны: феррипортоклаз ([FeO₄]⁻³), гроссуляр, хризолит, карфолит (Mn⁺²), берилл (?), мелинофан (?). Многочисленные, комплексные соли [ZrO₄] и [SiO₄] — розенбушит, вёлерит, ловенит и др. Силикаты с [TiO₄] — лессингит, титанит, астрофиллит, лампрофиллит, мозандрит, риякит.

Нитраты — весьма многочисленные соединения с Ca (без Fe) — семипрезит, эльсворит, микролит, пирит и др.

Фосфаты — с редкими землями (ксенотим, монацит); комплексные соли с V₂O₅ + UO₃ (отенит, карнотит, тюмунит). Некоторые фосфаты с Fe⁺² (чильдренит).

Антимонаты и хроматы — как правило, желтоватых оттенков.

Молибдаты и вольфраматы — вульфенит (MoO₃ — Pb), ферримолибдит (Fe⁺³), ферритунгстит (Fe⁺³), шеелит (WO₃ — Ca).

Сульфаты — очень многочисленные сульфаты с Fe⁺³.

Соединения углерода — меллит, озокерит, слабо окисленные углеводороды, янтарь, частично нефть.

Соединения бурого цвета

В переходах в желтый, оранжевый или темнокоричневый. Весьма многочисленные соединения:

Самородные — селенистая сера.

Сульфиды — сфалерит, вюрцит, ольдтамит (в метеоритах).

Г а л о и д н ы е — маршит (CuJ), соединения TR (Ce, La), молизит (FeCl_3), оксигаллоидные соединения Hg (эглестонит).

О к и с л ы и г и д р а т ы — дымчатый кварц (SiO_2), браунит (Mn_2O_3), касситерит (SnO_2), бадделейт (ZrO_2), гетит и лимонит (Fe^{+3}).

К а р б о н а т ы — содержащие TR (паразит, бастнезит).

С и л и к а т ы — гельвин (Mn^{+2} , Fe^{+3}), фенакит, шаллерит (Mn), везувиан (Fe^{+3}), пирокон (Zr^{+3}), тортвейтит (Ce, Y), церит (Ce), гелландит (Ce), турмалин (Fe^{+2}), ряд водных силикатов с Mn^{+2} и Mn^{+3} , титанит (TiO_4), ферсманит [TiO_4] [NbO_3], рамзаит [TiO_4].

Ф о с ф а т ы — редких земель (Th, Ce) — монацит; пирморфит (Pb), ванадинит ($\text{V}^{+5}\text{Pb}^{+2}$), верванит (V^{+5} и Fe^{+3}).

А н т и м о н а т ы — в переходах в желтые тона.

С у л ь ф а т ы — многочисленные соединения Fe^{+3} , шеелит [WO_4].

С о е д и н е н и я у г л е р о д а — озокерит, торф, бурый уголь, гуминовые кислоты, нефть.

Соединения красного цвета

Число минералов несколько ограниченное; в этот список включены и розовые минералы (светлые), буро-красные и темнокрасные. Необходимо иметь в виду, что целый ряд металлических или полуметаллических минералов просвечивает красным или красно-бурым тоном (серебряные сульфосолы, ильменит, хромит и др.).

С у л ь ф и д ы — реальгар, киноварь, арсеноферрит (FeAs_2). Последний — до темнобурого.

О к и с л ы — куприт, цинкит (ZnO с примесью MnO), монтроидит (HgO), гематит (Fe_2O_3), сурик (Pb_3O_4), рутил (TiO_2), хромит [$(\text{Cr}, \text{Al}, \text{Fe})_2(\text{Fe}, \text{Mg})\text{O}_4$], алаит ($\text{V}_2\text{O}_5 \cdot \text{H}_2\text{O}$), рубин (Cr^{+3}).

К а р б о н а т ы — родохрозит (MnCO_3), сферокобальтин (CoCO_3).

С и л и к а т ы — родопит (MnSiO_3), шизолит (Mn^{+2}), воробьевит (Cs), эвдиалит (ZrO_4), пироп (Cr), алмадин (Fe^{+2} , Mn^{+2}), спессартин (Mn^{+2}), тефроит (Mn), андалузит (Mn), таленит (Y), турмалин (Mn), ставролит (Fe^{+3} , Mn), мусковит (?), непутиит (Fe, Mn).

С у л ь ф а т ы — редингтонит (пурпуровый) — $\text{Cr}_3(\text{SO}_4)_2$, биберит (Co^{+2}), манганолангбейнит (Mn).

Х р о м а т ы — крокоит (PbCrO_4).

Ф о с ф а т ы и а р с е н а т ы — соединения Co^{+2} и Mn^{+3} (розелит, эритрин, стренгит), (Fe^{+3}), хьюэттит и ряд ванадатов (V^{+5}).

С о е д и н е н и я у г л е р о д а — янтарь (частично).

Соединения черного цвета

С переходами, в одну сторону в бурые и шоколадные тона, в другую — в красный цвет и в третью — в синее просвечивание металлических решеток.

С а м о р о д н ы е — карбонадо, графит.

С е р н ы е — тунгстенит, патронит, жеромит, метациннабарит, алабандит, некоторые сульфосолы полуметаллические.

О к и с л ы — CdO , тевоит (CuO), хромит (Fe^{+3} , $\text{Fe}^{+3}\text{Cr}^{+3}$), магнетит (Fe^{+2} , Fe^{+3}), гаусманнит (Mn_3O_4), полианит (MnO_2), манганит ($\text{Mn}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) — красно-бурая черта.

С и л и к а т ы — авгит ($\text{Fe}^{+3}[\text{TiO}_4]$), особенно титанавгит (с Ti_2O_3), бабингтонит (Mn^{+3} , Fe^{+2}), энigmatит (Fe, $[\text{TiO}_4]$), гадолинит (Fe^{+3} , Y), ильваит (Fe^{+2} , Fe^{+3}), шерл (Fe^{+3}), биотит (Fe^{+3}), некоторые хлориты, гизингерит, лепидомелан, преимущественно $\text{Fe}^{+2} + \text{Fe}^{+3}$.

У р а н а т ы — уранинит ($\text{UO}_2 + \text{UO}_3$).

Т и т а н а т ы и н и о б а т ы — чевкинит ($\text{Ce}[\text{TiO}_4]$), перовскит [TiO_3], дизаналит, лопарит (Ce, Ti, Nb). Многочисленные ниобо-танталаты (Nb, Ta, Fe^{+3} , Fe^{+3} , Mn^{+3}).

Ф о с ф а т ы — окисленный триплит (Fe^{+2} , Fe^{+3}), дюфренит (Fe^{+3}).

Б о р а т ы — людовит ($\text{Fe}^{+2} + \text{Fe}^{+3}$).

В о л ь ф р а м а т ы — вольфрамит (WO_3 , Fe^{+2} , Mn^{+2}), особенно ферберит.

С о е д и н е н и я у г л е р о д а — окисленные углеводороды, асфальты, нефть, уголь каменный, сажа.

Соединения зеленого цвета

К этой группе относятся соединения весьма разного характера, с одной стороны, светлозеленые и желтоватые минералы (обычно с Fe^{2+})¹, которые отвечают поглощению фиолетовых волн, а с другой, — яркозеленые, вызванные преимущественным поглощением другого конца спектра — красного. Непосредственное отличие затруднительно и требует изучения самих полос поглощения. Часто одновременно поглощены оба конца.

Галлоидные — атакамит ($\text{Cu}, \text{H}_2\text{O}$), кемпит ($\text{MnCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$).

Окислы — бунзенит (NiO), манганозит (MnO), герцинит (Fe^{2+}).

Карбонаты — малахит ($\text{Cu}, \text{H}_2\text{O}$), заратит ($\text{Ni}, \text{H}_2\text{O}$).

Силикаты — пироксены и роговые обманки (Fe^{2+}), эгирин [FeO_4]², лавровит (Cr^{+3}), жадеит (Cr), актинолит (Fe^{+2}), изумруд (Cr), уваровит (Cr), хризолит (Fe^{+2} , Ni , Cr), диоптаз ($\text{Cu}, \text{H}_2\text{O}$), везувиан (Fe^{+2} , Fe^{+3}), хромвезувиан, циркон (?), андалузит (Mn^{+2}), манганандалузит (Mn), эпидот (Fe^{+2}), хромэпидот (Cr), турмалин (?), хлориты (Fe^{+2}), тальк (Fe^{+2} ?), серпентин (Fe^{+2}), нонтронит, хлоронал ($[\text{FeO}_4]^{-2}$). Обычно с Fe^{+2} содержится разное (небольшое) количество Fe^{+3} .

Фосфаты и арсенаты — трифиллин, литиофиллит (Fe^{+2}), пироморфит (?), марганцевый апатит; многочисленные водные фосфаты и арсенаты меди ($\text{Cu}, \text{H}_2\text{O}$), аннабергит (Ni), коловратит (Ni, V^{+5}), скородит (Fe^{+2}).

Сульфаты — меди (многочисленные), моренозит (NiSO_4), мелантерит ($\text{Fe}^{+2} + \text{H}_2\text{O}$).

Соединения синего или голубого цвета²

Очень немногочисленны: или соединения аква-ионов меди или сочетания ионов разных валентностей (например $\text{Fe}^{+2} + \text{Fe}^{+3}$).

Галлоидные — соединения меди с водой (талингит, кумэнгсит, боленит и др.). Иногда флюорит.

Карбонаты — соединения меди с водой (азурит, аурихальцит, лозейит).

Силикаты — метасиликаты с $\text{Fe}^{+2} + \text{Fe}^{+3}$ — рибекит, глаукофан, кроссит и др.; берилл (?), кордиерит (?), кианит (Cr^{+2}), бацит (?), турмалин (?), бенитоит ($?\text{TiO}_2$), медные силикаты с водой.

Нитраты — юниит (роданистое соединение Co).

Фосфаты и арсенаты — виванит ($\text{Fe}^{+2} + \text{Fe}^{+3}$), амблигонит (?), лазулит (?), перулеолактит (вероятно Cu). Многочисленные водные соли меди ($\text{Cu}, \text{H}_2\text{O}$), бирюза и др.

Сульфаты — водные соли меди ($\text{Cu}, \text{H}_2\text{O}$), целестин (?), барит иногда (?), ильземанит (сочетание $\text{MoO}_2 + \text{MoO}_3$).

Ванадаты — минасрагрит (V_2O_4).

Соединения фиолетового цвета

Галлоидные — флюорит (?)³.

Окислы — аметист (?), александрит зеленый, красно-фиолетовый.

Силикаты — лепидолит (Mn^{+2}), родохром и кеммерериты (хлориты с Cr), мурманит [TiO_4], топаз фиолетовый (?), светлофиолетовый кунцит (может быть Mn^{+3}).

Карбонаты — очень редкие фиолетово-розовые кальциты Конго с 1—2% окиси кобальта.

Анализ хромофоров

Бесцветные хромофоры

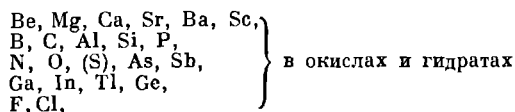
Бесцветными являются ионы шаровые, трудно поддающиеся поляризации и не обладающие способностью к активной поляризации.

Простые ионы — Li , Na , K , Rb , Cs — последний, может быть, частично обуславливает розоватые или зеленоватые тона (воробьевит или амазонит), что связано с очень большим радиусом этих ионов.

¹ Несомненно, что некоторую роль играет и V_2O_5 .

² Очень редок синий щелочной берилл.

³ И. П. Алимарин связывает различие окрасок флюорита с дисперсией металлических частиц Ca (аналогично окрашенной соли NaCl), что стоит под вопросом.



Комплексные ионы — $[\text{BeO}_4]$, $[\text{MgO}_4]$, $[\text{AlO}_4]$, $[\text{BO}_3]^*$, $[\text{CO}_3]$, $[\text{PO}_4]$, $[\text{NO}_3]$, $[\text{SO}_4]$, $[\text{SeO}_4]$, последний частично желтоватый; $[\text{AsO}_4]$, $[\text{SbO}_4]^3$.

Серые тона получаются весьма часто у соединений Pb^{+2} (иногда с желто-бурым оттенком), Bi, Sb, As, что отвечает общей абсорбции (таковы, например, фосгенит, сенармонтит, перуссит); это придает немного стальной, холодный тон минералу; ср. кераргирит (AgCl).

Желтые хромофоры

Желтые хромофоры очень многочисленны, причем их очень трудно отделить от желто-зеленых тонов, с одной стороны, и желто-оранжево-бурых, с другой.

Из ионов типа благородных газов — только Cs (частично), особенно J, частично Br, (Se).

Из ионов типа купро — иногда в слабой степени Zn, сильнее Cd, Pb^{+2} , Bi^{+3} , Sb^{+3} , Sb^{+5} .

Из промежуточных — Fe^{+3} , W^{+6} , Mo^{+6} , Te^{+4} , TR и Y. Частично Ni^{+2} , Fe^{+2} . Особенно характерен катион $[\text{UO}_2]^{+2}$ — уранил, который дает зеленовато-желтые тона с флюоресценцией.

Из комплексных ионов — $[\text{CrO}_4]$, $[\text{MoO}_4]^{-2}$, $[\text{WO}_4]^{-2}$, $[\text{UO}_4]^{-2}$ зеленовато-желтые, в общем светлые, $[\text{SeO}_4]$, $[\text{TeO}_4]$, $[\text{SbO}_4]$ от светложелтого до бурого, $[\text{JO}_3]$ очень светложелтый, $[\text{BO}_3]$ иногда светложелтоватый.

В общем все перечисленные выше комплексные ионы дают нормально очень слабую окраску; из них сильнее всех $[\text{CrO}_4]$ и частично $[\text{UO}_4]^{-2}$ с его специфическими тонами. С этой группой обближается и очень интересный комплексный ион $[\text{Fe}^{+3}\text{O}_4]^{-5}$, который дает зеленовато-желтую окраску.

Иногда желтовато-розоватый тон вызывают комплексные кислоты $[\text{SiO}_4]$ — $[\text{ZrO}_4]$ и очень часто с уклоном в бурый и буро-черный $[\text{TiO}_4] + [\text{NbO}_3]$.

Исключительно типичный хромофор — углеводороды в начальных стадиях окисления.

Бурые хромофоры

Из ионов типа благородных газов — неизвестны.

Из ионов типа купро: иногда Zn, Hg, Pb (?), Sn (очень слабый).

Из ионов типа промежуточных: Fe^{+3} , Mn^{+3} , Zr^{+4} , TR и Y**. Частично Th, сюда же условно можно отнести и металлы платиновой группы (Pd).

Гораздо важнее и интереснее комплексные ионы: здесь очень многие играют роль бурых хромофоров, но степень их влияния колеблется от светлобурых (розоватых) до темнобурых и коричневых тонов. Таковы:

Слабые — $[\text{WO}_4]$, $[\text{SnO}_4]$, $[\text{ZrO}_4]$.

Сильные — $[\text{TiO}_4]$.

Соединения типа углеводородов в сильной стадии окисления.

Красные хромофоры

Все соединения, не достигшие металлических тонов, обычно красного цвета с металлическим блеском (таковы, следовательно, соединения не очень сильно поляризующих катионов, как Cu, Hg, Fe^{+3} — с кислородом или с серой).

Настоящими хромофорами являются:

Розовые — Mn^{+2} , Co^{+2} .

Красно-бурые — Fe^{+3} , Mn^{+3} .

Ярко красные — Cr^{+3} , V^{+5} .

Темно красные — Ti^{+4} .

Иногда в соединении с сильно поляризующими катионами $[\text{CrO}_4]^{-2}$.

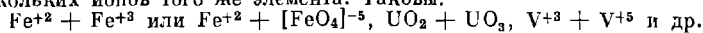
* Иногда светложелтоватый в солях; вообще очень легко с хромофорами дает изменение окраски (турмалин, дагилит, джюмтергерит).

** Этим свойством пользуются в стеклоделии, получая при внесении определенных редких земель бурые, красные (гранатовые), желтые и фиолетово-розовые тона.

Черные хромофоры

Общее поглощение света, отвечающее частично металлическому, связано с очень характерными хромофорами. Все соединения даже слабой активной поляризации с S могут быть черными (Cu^{+2}).

Очень важно отметить, что черный цвет появляется обычно в результате сложения нескольких ионов того же элемента. Таковы:



Отметим

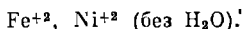
из катионов:	из анионов:
$\text{Mn}^{+4}, (\text{Mn}^{+3} + \text{Mn}^{+2}),$	$[\text{NbO}_3]$ в сочетании с Fe^{+2}
Fe^{+3} в сочетаниях с $\text{Fe}^{+2}.$	$[\text{TaO}_3]$ » » Fe^{+2}
	$[\text{WO}_4]$ » » Fe^{+2}

Соединения окисленных углеводов и графит (C).

Зеленые хромофоры

Сюда относятся такие хромофоры, которые дают наименее глубокие тона, желто-зеленые (например Fe^{+3}) или же настоящие зеленые тона наиболее глубоких полюсов поглощения (Cr^{+3}).

Зеленовато-желтые хромофоры:



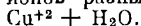
Очень характерный хромофор $[\text{Fe}^{+3}\text{O}_4]^{-5}$, заместитель $[\text{AlO}_4]^{-5}$ и $[\text{SiO}_4]^{-4}$.

Яркозеленые хромофоры

$\text{Cu}^{+2} + \text{H}_2\text{O}$	V^{+3} (темный) {	наиболее важные и интересные хромофоры.
$\text{Ni}^{+2} + \text{H}_2\text{O}$	Cr^{+3} (яркий) }	

Синие и голубые хромофоры

Весьма немногочисленны и связаны или с аква-ионами меди или с наличием нескольких ионов разных валентностей:



Ti^{+3} (например в сапфире), очень редко V^{+4} ($\text{V}^{+3} + \text{V}^{+5}$).

Co^{+2} (очень редко), изредка Cr^{+3} .

Совершенно особую группу составляют синие минералы, где хромофорамп являются:



Фиолетовые хромофоры

Вообще неясны.

Mn^{+2} — дает розовый цвет с переходом в лиловые тона. Изредка Cr^{+3} .

$[\text{TiO}_4]^{-5}$ — дает фиолетовые тона (в степени окисления Ti^{+3}) в силикатах.

Наиболее характерным является Cr в его переходах между красным, зеленым и фиолетовым (силикаты хлоритовой группы).

Металлические хромофоры

Особинком стоят сами металлы в самородном виде.

Главнейший пассивный хромофор — S, сильнее его — Se и Te и $[\text{As}_n\text{S}_m]^{-x}$, $[\text{Sb}_n\text{S}_m]^{-x}$, $[\text{Bi}_n\text{S}_m]^{-x}$ — комплексные сульфанионы.

Однако, как пассивные хромофоры, S, Se и Te приобретают металлическую структуру лишь под влиянием поляризующих катионов. Сильно поляризующие катионы делают пассивным хромофором и кислород O; таково влияние Fe^{+3} , Ti^{+4} , Cr^{+3} , Mn^{+2} и мп. др.

Очень важным активным хромофором черных и металлически-черных соединений является C (графит, антрацит).

Отдельные элементы как хромофоры

Мы видим из приведенного списка, что некоторые элементы дают хромофоры разных цветов; такие элементы заслуживают особого внимания, ибо они подсказывают характер красящего иона и, подобно тому как в органической химии, дают возможность судить об электростатическом состоянии элемента в решетке (ион, возбужденный или нейтральный атом, степень валентности, образование комплекса и т. д.).

Таковы особенно Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co и U, т. е. самые сильные хромофоры аргонового периода и семейства железа:

Ti титан	Ti⁺³ синий	[TiO₄]⁻⁵ фиолетовый	Ti⁺⁴ красный	[TiO₄]⁴ буро-желтый
V ванадий	V⁺³ зеленый	V⁺⁴ темносиний	V⁺⁵ красный	[VO₄]⁻³ красно-бурый, оранжевый
Cr хром	Cr⁺³ фиолетовый и зеленый	[CrO₄]⁻⁶ (зеленый) яркий	[CrO₄]⁻³ светложелтый, оранжевый	
Mn марганец	Mn⁺² (зеленый) розовый	Mn⁺³ бурый, красноватый	Mn⁺² + Mn⁺³ темнобурый	Mn⁺⁴ черный, полу- металлический
Fe железо	Fe⁺² зеленовато- желтый (очень светлый)	Fe⁺³ бурый, крас- ный, коричне- вый	[FeO₄]⁻⁵ зеленовато- желтый, яблочно-зе- леный	
Co кобальт	Co⁺² розовый (голу- бой)	Co⁺² + Co⁺³ буроватый	Co⁺³ коричнево-красный	
U уран	U⁺³ темнобурый, черный	[UO₂]⁺³ уранил зелено- желтый или яркожелтый	[UO₄]³ уранаты жел- тые	UO₂ + UO₃ (U ₃ O ₈) черный, черно- зеленый

Шкалы цвета

Исходя из теоретических представлений, еще Бор отметил, что в первую очередь должны поглощаться лучи ультрафиолетового конца спектра, т. е. лиловые и синие. В дальнейшем полоса поглощения должна перемещаться в сторону более длинных и красных волн. Отсюда получается и закономерная последовательность цветов поглощения, образующих спектр, названный мною спектром «В».

Этот спектр характеризуется чистыми тонами и во всей своей красоте проявляется в органической химии, но в минералогии имеет гораздо меньшее значение и встречается лишь в очень чистых соединениях, в которых не имеется никаких эндокриптных, изоморфных или механических примесей и которые не были подвержены воздействию каких-либо радиаций.

В минералогии гораздо чаще наблюдается спектр «А», тоже связанный с известной постепенностью в поглощении, начиная от фиолетового конца спектра, но к которому подмешивается ряд желтых, бурых, черных и серых тонов, вызываемых необычайной химической и физико-химической

сложностью кристаллов, благодаря чему к нормальному спектру поглощения присоединяется еще общее поглощение лучей всего спектра.

Исходя из сказанного, мы можем наметить нижеследующую таблицу цветов обоих спектров (табл. 7):

Таблица 7

Шкала цветов минералов

	Шкала «В»	Шкала «А»
0	Белый, бесцветный	Бесцветный, белый, серый (0,5)
1	Светлозеленовато-желтый	Грязнозеленовато-желтый
2	Желтый	Буровато-желтый
3	Оранжевый	Буровато-оранжевый
4	Красный	Красно-бурый
5	Пурпуровый	Красно-коричневый
6	Фиолетовый	Черный
7	Темносиний	Металлический стальной
8	Голубой	» золотой
9	Голубовато-зеленый	»
10	Яркозеленый	»

Эта шкала явится для нас основой для решения ряда светогеохимических задач. Нам нужно только для этого знать роль катиона и аниона при образовании соответственных диполей, обозначить эту роль какими-либо знаками и затем соответственным образом вывести то, что я называю **хроматическим символом** данного соединения, т. е. номер шкалы по серии «А», отвечающий цвету данного минерала.

Следовательно, наша задача сводится к тому, чтобы составить таблицу таких хроматических символов для каждого отдельного иона, встречаемого в земной коре.

Нетрудно видеть, что символ отдельных ионов должен состоять из двух величин: первая должна определять степень активной поляризации или поляризуемости и, выраженная в единицах приведенной шкалы, должна находиться в известных соотношениях с величинами активной и пассивной поляризации; вторая величина должна характеризовать цвет хромофора, как такового, и в тех же единицах вышеприведенной шкалы давать добавочный тон химическому соединению, даже если в нем не будет специальных диполей.

Эта величина в ряде случаев должна носить чисто геохимический характер, так как она определяет собой «геохимическую окраску» природных тел.

Следовательно, первая цифра связана с образованием поляризационных полей и зависит от того, какие элементы и ионы группируются между собой. Вторая цифра характеризует свойства самого иона, независимо от типа соединения, и, следовательно, связана частично с той асимметрией, которая определяет данный ион по существу его внутреннего строения, частично с теми особенностями окраски, которые характерны для данного иона в природных кристаллах.

Поскольку мы знаем, что такие асимметрические ионы отличаются неполным заполнением внутренних оболочек и типичны для ионов промежуточных элементов, для нас совершенно очевидно, что вторая цифра будет особенно велика у всей той группы ионов, которая занимает центральное поле в развернутой менделеевской таблице.

Совершенно понятно из сказанного, что вторые цифры должны складываться, ибо они независимы от природы партнера.

Иначе обстоит с первыми цифрами. Если, например, катион обладает практически нулевой активной поляризацией, то, как бы ни велика была поляризуемость аниона, все равно она останется нулевой, если не будет такого иона, который будет ее деформировать.

Следовательно, нулевая активность натрия будет характеризоваться нулем и с фтором, поляризуемость которого нуль, и с иодом, поляризуемость которого единица, и даже с серой, поляризуемость которой три (в условных единицах).

Нетрудно из сказанного догадаться, что при вычислении хроматического символа соединения первые цифры надо множить и потом уже прибавлять их к сумме вторых.

На основании сказанного и составлена таблица хроматических символов, по которым каждый, зная, из каких ионов составлен минерал, может вычислить с известным приближением его хроматический символ и, следовательно, его наиболее вероятную и типичную окраску (табл. 8).

В этой таблице катионы разбиты на три группы. Первая — катионы типа благородных газов, характеризуются символом $0 + 0$; это, следовательно, практически устойчивые шаровые ионы, которые совсем не действуют на анионы. При некоторых из них поставлена звездочка, говорящая о слабой поляризуемости, что в определенных условиях может приводить к некоторой слабой специальной окраске.

Вторую группу катионов представляют ионы промежуточного характера, т. е. в первую очередь ионы семейства железа, платины, ионы хрома, ванадия и других настоящих хромофоров. Эти ионы не только сами дают окраской благодаря асимметричности строения, но и действуют на анионы, активно их поляризуя.

К третьей группе катионов относятся ионы типа купро. Их собственная окраска минимальная, в противоположность предыдущей группе. Зато они более активно поляризуют поляризуемые анионы.

Группа анионов разбита на две подгруппы — простые ионы и комплексные. Во всех них первая цифра показывает степень их поляризуемости, вторая — обычно очень низкая — их «собственную» окраску.

Конечно, приводимые вычисления и определения символов являются лишь первым приближением к правильному решению задачи, тем не менее таблица очень удобна даже для начинающего минералога, которому не надо запоминать окраски отдельных минералов, а нужно выучить основные законы цветности, управляющие этой окраской. Конечно, для ряда элементов получаются осложнения. Так дело обстоит прежде всего с углеродом и со специфической окраской аква-ионов меди и никеля; резкое изменение цвета наблюдается в случае наличия в одной и той же решетке ионов разных валентностей, но того же элемента.

Несколько практических советов для пользования цветом при поисках в полевой работе

Необходимо иметь в виду, что цвет является, в сущности, самым удобным, наиболее резким и наиболее легко воспринимаемым признаком в природе. И хотя некоторые минералоги и подчеркивают его изменчивость, все же нельзя забывать, что первое, непосредственное восприятие наших глаз сводится к ощущению цвета, его интенсивности, глубине его тона и соотношений с цветом его соседей.

В то время как все другие свойства, как твердость, удельный вес и особенно химический состав, определяются лишь путем особых лабораторных методов, цвет наравне с внешней структурой и формой является

самым простым и потому особо ценным свойством для каждого исследователя природы.

Мы обращаем особое внимание на анализ цвета геохимических образований, так как думаем, что, помимо теоретической важности, он даст в основе самые простые и самые легко запоминаемые правила для работы исследователя в поле, при минералогическом и геохимическом картировании, особенно при поисках полезных ископаемых. При этом мы предлагаем пользоваться нашей книгой «Цвета минералов», изд. Академии Наук СССР, 1937 г., в которой систематизированы по отдельным цветам минералы и основные хромофоры. Поэтому, найдя минерал определенного цвета, необходимо его искать в указанных в книге таблицах.

Но может быть поставлена и обратная задача — необходимо искать цвета определенных химических элементов. Таких сводок, к сожалению, до сих пор нет. Частично такие указания мы даем в IV томе «Геохимии»¹, который посвящен геохимическим чертам отдельных элементов.

Очень важная задача ставится перед каждым исследователем в поле — это определение глубин геохимических зон данного природного образования, т. е. выяснение того кислородного потенциала, который характеризует такую зону. Одно дело, когда геохимик-исследователь встречается с минералами и элементами в глубинных зонах, где при недостатке свободного кислорода мы имеем дело с более низкими степенями окисления или лишь с частичным процессом их позднейшего окисления. Иной характер имеет вся совокупность минералов и ионов в гипергенной обстановке, где мы наблюдаем наиболее высокие степени окисления, переход ионов основных в ионы кислотные, уничтожение ряда катионов с превращением их в комплексный анион. Вся гипергенная обстановка, таким образом, резко различается по типу своих ионов и их цветности от обстановки глубинной.

В глубинах мы наблюдаем наиболее высокие тона серо-зеленой и зеленовато-желтой окраски. В промежуточных процессах при окислении глубинных зон появляются сочетания ионов разной валентности; черные, серые тона характеризуют эту зону.

Но зато в гипергенной обстановке повышенная валентность приводит к образованию ярко окрашенных ионов, и пестрые краски зеленых, синих, красных и особенно желтых и желто-бурых тонов характеризуют образования земной поверхности — железные шляпы рудных жил и рудных месторождений, иногда даже пегматитов типа II.

Таким образом, цветность не только свидетельствует о наличии определенных минеральных тел, но и говорит нам о природе тех ионов, из которых последние состоят, и этим характеризует ту геохимическую обстановку, к которой наблюдаемые минералы относятся.

Таким образом, геохимик-исследователь в цветности не только минералов, но и их сочетаний, в цветности почвенного покрова имеет ряд руководящих идей, которые позволяют ему решать ряд важнейших промышленных задач.

Как пример приведу нижеследующие случаи.

В Южной Африке поиски алмазонасных трубок были всегда связаны с отысканием бурых и буро-красных холмов, представлявших собой продукты окисления дунитовых трубок. Этим признаком окраски пользовались все геологи-проспекторы в районах Бельгийского Конго, Родезии и Танганьики.

Второй пример дает нам Полярная Канада. Здесь открытие замечательных жил урановой руды и серебра было связано с нахождением темнокрасных жил, богатых гематитом и красным доломитом, которые прорезали на большом протяжении серые и серо-зеленоватые гнейсы. Темнокрасный цвет этих жил был настолько характерен, что поиски их велись с самолета непосредственно визуально.

¹ Госхимиздат, 1939.— *Ред.*

Третьим примером могут служить характерные явления побеления пород в связи с серными залежами в Средней Азии. Сильное окисление серы ведет к образованию серной кислоты, последняя выносит все бесцветные и окрашенные катионы и оставляет характерные белоснежные полосы, отвечающие горизонтам, богатым серой. Аналогичные явления были указаны и в Иране.

Наконец, последний пример дают нам поиски бокситов, которые обычно окрашены в кирпично-красный цвет, служащий прекрасным хроматическим показателем при их поисках. Так были открыты по цвету бокситы Золотого Берега в Африке, Северной Гвианы в Южной Америке; так были открыты бокситы района Тихвина около Ленинграда и намечены новые области бокситов в Восточной Сибири.

Таких примеров использования ярких красок при поисках полезных ископаемых можно привести очень большое количество. Опытный глаз минера-лога по тончайшим оттенкам подмечает присутствие того или иного элемента, и поэтому изучение окраски минералов — приучение своего глаза к запоминанию этого цвета — является одним из самых простых и самых важных первичных методов полевой работы.

Я заканчиваю этот раздел следующими словами из своей книги 1937 г.:

«Особенно внимательно должен подумать о цвете минералов геохимик-разведчик, полевой исследователь, для которого окраска минерала является первым признаком находки месторождения полезных ископаемых и опытный глаз которого дороже всего».

Главнейшая литература

- А. Е. Ферсман. Периодический закон Менделеева в геохимии. Труды юбилейного Менделеевского съезда, 1936, I, 383.
А. Е. Ферсман. Цвета минералов. Изд. Акад. Наук СССР, 1937, 1—156.

2. ТВЕРДОСТЬ И ПРОЧНОСТЬ МИНЕРАЛОВ

Твердость имеет несомненное значение при поисковых работах, и значение гораздо большее, чем это принято думать, ибо твердость, как одно из проявлений общей прочности, связана с типом и характером решетки и ее энергетикой. В главе о поисках в районах россыпей частично дана характеристика этого явления, однако даже элементарное использование твердости как одного из свойств природных соединений представляет важную и интересную задачу. Этому еще способствует легкость и общедоступность определения твердости (хотя бы по самому простому методу Мооса, которым можно широко пользоваться в полевой обстановке).

В. А. Обручев в своей «Полевой геологии» прекрасно характеризует твердость как поисковый признак. Он отмечает, что породы и минералы, более твердые, чем другие окружающие их образования, образуют в рельефе выдающиеся части — гряды, гребни, карнизы; кварцевые жилы особенно сопротивляются выветриванию и поэтому обычно выделяются в виде стенок или карнизов, протягивающихся по склонам гор и холмов, образуя скалистые гребни и вершины.

Даже в районах сильного механического выветривания кварцевые жилы сохраняются в виде полос мощных осыпей и россыпей из прочных обломков кварца. Роговики — кремнистые породы, также выделяются в рельефе, благодаря своей твердости и механической и химической прочности.

В общем весьма трудно разрушаются и перидотиты, пироксениты и змеевики. Обычно в рельефе они много устойчивее, чем, например, породы гранитного типа.

Следует отметить, что твердость и прочность пород в значительной степени предопределяют и характер почвенного слоя, а отсюда и тип дорожного полотна проселочных и даже шоссе-ных дорог. Я неоднократно

отмечал в своих поездках по Уралу, что в районе змеевиков мы имеем дело с щебнистым (и каменистым) полотном, тогда как граниты легко рассыпаются в дресву, дающую прекрасную основу для дорожного полотна; в районе кварцитов получаются острые твердые обломки, очень усложняющие передвижение.

Но прочность и твердость пород имеют еще и другое значение: они в значительной степени зависят от условий генезиса. Породы осадочные (за исключением кварцитов) в общем значительно мягче, чем породы магматические, состоящие из более твердых первичных минеральных тел. Как мы увидим и в дальнейшем, средняя твердость минералов (за исключением кварца) падает по мере понижения температуры каждого генетического процесса.

Мы не будем входить в анализ самого понятия «твердость», которое связано частично с энергией поверхностных слоев, но в основе своей зависит от характера электростатических связей между отдельными ионами в самой кристаллической решетке.

Разными методами определения твердости изучают, в сущности, разные стороны этого сложного физического понятия. Нам приходится ограничиться в дальнейшем общими суммарными показателями, которые по своей точности будут для нас достаточными и смогут с успехом применяться для ряда геохимических выводов, хотя и не должны рассматриваться как точные показатели физического характера.

Как основное правило, для грубых ориентировочных подсчетов мы можем принять, что механическая прочность в единицах Мооса выражается суммой валов катиона и аниона, умноженной на коэффициент 3. Так, схематично:

$$(a) \text{ Тв.} = 3 (\text{взк/к} + \text{взк/ан});$$

для решеток, сильно поляризованных, коэффициент 2; вообще для минералов малой твердости коэффициент ниже 3, до 2, для весьма твердых — коэффициент до 4.

Правильнее дать этим взаимоотношениям следующее выражение:

$$(b) \text{ Тв.} = (w + 1) (\text{взк/к} + \text{взк/ан}),$$

где w — средняя валентность ионов;

$$(c) \text{ Тв.} = w (\text{взк/к} + \text{взк/ан})$$

для сильно поляризованных систем.

Отсюда очевидной делается зависимость прочности кристаллов от величины U решетки, принимая во внимание характер последней (ионный, молекулярный или слоистый).

Геохимический анализ механической прочности. Основываясь на приведенных в томе III «Геохимии» таблицах и диаграммах, мы можем сделать нижеследующие выводы геохимического характера.

1. На основании данных для минералов, сгруппированных по валентности катиона, мною была дана диаграмма твердости 260 главнейших соединений. Мы видим, что:

тв. слоистых решеток	= 1—2 (реже 3)
» с валентностью 1	= 1,5—2,5 (3)
» » » 2	= 2,5—4
» » » 3	= 4,5—5,5
» » » 4—5	= 5—6—7

Примечания: 1. Водные соединения соответственно ниже на 1—2 единицы шкалы. 2. Особняком, с очень высокой твердостью, стоят структуры R_2O_3 и $R^3R_2^{+3}O_4$.

Эти закономерности очень характерны и имеют большое значение в геохимии.

2. Поскольку, как мы видели, валентность в известных пределах предопределяет ход последовательности кристаллизации, мы можем сделать вывод, что в схеме:

минералы магматического процесса геофаз А — D обладают твердостью . . . 10—5
 минералы пневматолитического процесса и гидротермальных геофаз Е — К . . . 6—3
 минералы холодных водных растворов геофаз К — L ниже 3,5

К первой группе относятся типичные ионные постройки, ко второй — преимущественно постройки полуионного и полуметаллического (атомного) типа и соединения ионов с комплексными анионами; к третьей — гипергенные соли, по большей части содержащие воду и связанные с комплексными анионами.

3. В магматической части этого списка мы видим, в общем, понижение твердости по ходу кристаллизации, хотя такая закономерность имеет ряд исключений (кварц). Тем не менее, как правило, твердость соединений падает с последовательностью выпадения (с понижением валентности). Гораздо отчетливее делается эта последовательность, если разбить минералы по типам: прото-, мезо- и телокристаллизации.

4. В группе пневматолитов и гидротермалитов мы наблюдаем очень интересную закономерность, подмеченную отчасти еще Жильбертом¹: последовательность выпадения соединений металлов в рудных жилах (за немногими исключениями) следует понижению твердости этих соединений (табл. 9):

Таблица 9

	Mo	Sn	W	Bi	(Fe)	As ³	Cu	Zn	Pb	Sb ³	Hg	+ ³ As ³
Твердость	(1,5)	7—6	5,5	2	6	5,5	4—3,5	4—3,5	2,5	2	2,0	2—1,5
Уд. вес	4,8	7,0	7,0	0,5	5	6	4,2	4	7,5	4,6	8,0	3,5
Валентность	IV	IV	IV	III	II	III	I	II	II	Компл.	I	Компл.

Отсюда видно последовательное падение как твердости (за исключением Mo и Bi), так и валентности и полная независимость хода процесса, например, от удельного веса (вопреки мнению некоторых исследователей).

5. Общий анализ главнейших минералов показывает, что в общем ходе геохимических процессов идут параллельно:

- 1) понижение твердости;
- 2) понижение валентности;
- 3) понижение энергии решетки U ;
- 4) последовательность выпадения из растворов или расплавов;
- 5) увеличение растворимости соединений;
- 6) увеличение расстояний между узлами решетки.

Как мы увидим в дальнейшем, ход геохимических процессов, а также и изменения твердости параллельны (симбатны) понижению общей энергии кристаллической решетки (при ряде поправок, о чем см. ниже).

¹ G. Gilbert. Econ. Geol., 1924, XIX, 668—673.

6. В природных условиях мы ожидаем максимальных величин твердости в наиболее ранние стадии магматической кристаллизации, при кристаллизации соединений элементов с валентностью 4 и 3 и при кристаллизации элементов с наименьшими радиусами ионов.

В согласии с этим стоит повышенная механическая прочность всех минералов метеоритов и почти полное отсутствие в них (кроме слоистых решеток графита) минералов с твердостью меньше 4. Это замечательный факт. Ему отвечает и нахождение в метеоритах самых твердых минералов — алмаза и муассанита (тв. 9,5).

Аналогичные соотношения осуществляются в протокристаллизации (А) и в начальных стадиях других этапов магматической кристаллизации, а также при кристаллизации в зонах сильного метаморфизма (В), например:

	Твер- дость		Твер- дость
(А) Алмаз	10	(В) Альмандин . . .	7,5—7
Корунд	9	Кианит	7—5
Шпинель	8	Силлиманит	6—7
Циркон	7,5	Хризоберилл . . .	8,5 (Be!)
Андалузит	7,5	Кордиерит	7,5—7
(Силлиманит)	6—7	Эпидот	7—6,5

7. Несомненно, что намеченные схематические закономерности имеют ряд исключений, вытекающих как неизбежное следствие из особенностей строения и свойств некоторых атомов, ионов или их групп; например, характерны соединения Ве, ничтожная величина иона которого обуславливает высокую прочность и твердость решетки (так как при валентности +2 мы имеем ионный радиус, равный 0,34 Å). Особенно низкой твердостью обладают слоистые решетки (несмотря на высокую суммарную величину U), так как особенности расположения пакетов ионов вызывают совершенно специфические свойства связи между ними. Поэтому особенно низка твердость соединений с листоватой слюистой структурой (молибденит, графит, мусковит, биотит, хлорит, тальк, аурипигмент, каолинит и т. д.).

Приведенные соображения должны играть известную роль при поисковых работах, помогать в анализе геохимической обстановки. Как видно, в грубых чертах определение твердости позволяет судить о типе решетки, о величине ее энергии и ее строении. Достаточно взять таблицу вэков, чтобы чисто теоретически наметить наиболее мягкие и наиболее твердые минералы. Особенно бросается при этом в глаза, что сочетание катионов с комплексными анионами приводит к очень пониженным величинам прочности для этих солей (углекислых, сернокислых, хромовокислых) и что, лишь переходя к силикатам и их аналогам, мы получаем более твердые и прочные комплексы.

Исходя из приведенных данных, мы можем сделать несколько определенных выводов относительно наивысшей и наинизшей механической стойкости соединений.

Наименее прочные постройки, механически наиболее слабые, получают при образовании слоистых решеток, несмотря на очень высокую суммарную энергию последних. При этом наиболее слабыми и наименее механически стойкими должны быть решетки с нейтральными слоями без соединительных катионов — типа каолинита или талька (что отвечает наблюдениям).

Нетрудно видеть, что из решеток бинарного гетерополярного типа наименее стойкими будут соединения элементов с наименьшими вэками, т. е. CsJ, у которого средний суммарный вэк (соли) всего лишь 0,24. Еще меньше гипотетические вэки соединений атомов № 87—85. Для CsJ абсолютная величина прочности, в перечислении по шкале Ауэрбаха, около 10, для соли № 87 или 85 она должна быть около 5, т. е. по шкале Мооса около 1.

Наконец, из соединений комплексных ионов наименее прочными будут соли одновалентных радикалов типа $[\text{NO}_3]$, $[\text{JO}_4]$, для которых вэк очень мал (0,18), или дианисных соединений. Так, соединение KNO_3 должно технически обладать прочностью в абсолютных единицах около 10—12, равной твердости около 1,5 по шкале Мооса, что примерно отвечает экспериментальным данным (твердость 1,5—2).

Наиболее прочные постройки теоретически должны получаться при образовании соединений из четырехвалентных элементов C, Si, Ti, Ge.

Добавление. Как практическое правило, мы советуем по таблице экворентировочно определять общую прочность решетки, пользуясь формулой (а), т. е. суммировать вэки катиона и аниона и сумму множить на 3, что даст примерную твердость по шкале Мооса. Для соединений сильной поляризации и для очень мягких минералов надо множить на 2; для соединений более твердых минералов — на 3,5¹.

Примеры:

Na—Cl	$3 \times (0,45 + 0,25) = 2,10$	по шкале	2,5
Ca—CO ₃	$3 \times (0,87 + 0,39) = 3,75$	» »	3—3,5
Mg ₂ —SiO ₄	$3 \times (1,05 + 0,7) = 5,25$	» »	6—6,5
Ti—O ₂	$3 \times (2,10 + 0,78) = 8,65 (?)$	» »	6—6,5
Zn—S	$2 \times (1,10 + 0,57) = 3,35$	» »	3,5—4
Cu—Cl	$2 \times (0,96 + 0,25) = 2,4$	» »	2—2,5

При этих определениях надо иметь в виду наличие комплексных анионов, которые надо принимать во внимание как таковые с их типичными вэками. Так, получаем:

Коэффициент 3,5 (для очень твердых решеток)

Корунд $\text{Al}_2\text{—O}_3$	$3,5 \times (1,65 + 0,77) = 8,6$	по шкале	9
Бромеллит Be—O	$3,5 \times (1,32 + 0,77) = 7,4$	» »	9
Шпинель $\text{MgAl}_2\text{—O}_4$	$3,5 \times \frac{(1,05 + 1,65)}{2} + 0,77 = 7,4$		по шкале 8

Коэффициент 2 (для решеток сульфидных и сильной поляризации)²

Галенит PbS	$2 \times (0,82 + 0,57) = 2,8$	по шкале	2,5—2,75
Гринокит CdS	$2 \times (1,00 + 0,57) = 3,1$	» »	3—3,5
Крокоит $\text{Pb—[CrO}_4]$	$2 \times (0,82 + 0,33) = 2,3$	» »	2,5—3

Изменение коэффициента для соединений сильной поляризации связано с существом поляризационных связей; изменение коэффициента для решеток разной твердости вызвано условностью шкалы Мооса.

² Практически коэффициент 2 применяется к решеткам слоистым или сильно окрашенным, что является практически показателем сильной взаимной поляризации. Вэк комплексных сульфидионов As, Sb и Bi можно принять за 0,5—0,6 (при средней $w = 3$).

Практическое пользование приведенными правилами настолько удобно, что позволяет с достаточной точностью по вэкам определять в поле наиболее вероятную твердость и, наоборот, по твердости найденных минералов делать те геохимические выводы, о которых мы говорили выше.

Точность таких подсчетов, однако, невысока, но для данных целей достаточна.

Еще удобнее вести расчеты по формулам (b) и (c), которые, правда, в единицах шкалы Мооса для низковалентных соединений приводят к слишком малым величинам, а для высоковалентных — к слишком высоким, (что, однако, по шкале Ауэрбаха, правильнее).

Главнейшая литература

- А. Е. Ферсман. Геохимия. 1937, III, 156—183 (на стр. 156—литература).
В. Д. Кузнецов. Физика твердого тела. Томск, 1932.

3. УДЕЛЬНЫЙ ВЕС, АТОМНЫЙ И МОЛЕКУЛЯРНЫЙ ОБЪЕМЫ

При геохимических поисках вопросы удельного веса минералов являются очень важным вспомогательным средством для решения ряда практических задач. Не надо забывать, что опытный поисковик даже по ощущению в руке научается различать удельные веса образцов с некоторой точностью. Мне приходилось встречаться на рудниках Саксонии со штейгерами, которые по ощущению в руке указывали на вероятный процент содержания металла, в частности цинка или свинца. При этом особенно важным является отличие, например, плотного плавикового шпата от плотного кальцита или кварца.

Таким образом, при самом первом ориентировочном подходе к месторождению геохимик может судить о сочетании удельных весов, которые вообще в геохимии играют гораздо большую роль, чем можно было бы думать, так как определяют влияние одного из важнейших внешних факторов — силы тяжести. Мы не должны забывать, что различие в удельном весе во всех фазовых системах ведет к расслоению, перегруппировке и постепенному перемещению книзу более тяжелых составных частей. Так, само понятие пликха в золотоносных или платиновых россыпях есть не что иное, как результат длительного геологического процесса, основанного на перемещении книзу в россыпях тяжелых частиц, особенно платины, золота и магнитного железняка.

Таким образом, среди свойств минералов, играющих большую геохимическую роль, необходимо особо подчеркивать роль удельного веса, являющегося практическим показателем плотности решетки, т. е. в известной мере связанного с радиусом ионов, с межаутомными расстояниями решетки. Он находится в определенных взаимоотношениях с атомным и молекулярным объемами, которых мы коснемся ниже.

Удельный вес

Удельный вес природных соединений практически заслуживает особого внимания, тем более что амплитуда его колебаний весьма значительна — от 0,88 для легких углеводов и до 22,70 для иридия; эти величины в 25 раз отличны одна от другой, хотя обе относятся к твердому состоянию; но еще гораздо значительнее будут различия, если мы сравним при одной и той же температуре и жидкие, и газообразные соединения. Удельный вес минерала — один из важнейших природных факторов геохимического

распределения вещества, и влияние мирового тяготения исключительно велико не только в геохимических, но и космохимических процессах.

Мы перечислим основные процессы, где роль удельного веса является решающей, к которым мы, однако, так привыкли, что недостаточно обращаем на них внимание:

1. **Распределение геосфер по физико-химическим фазам.** Всякая устойчивая газовая фаза стремится, благодаря своему низкому удельному весу, кверху, занимая наиболее высокие наружные зоны атомного скопления; ниже располагается нормально фаза жидкая и еще ниже — твердая. В этом же направлении идет всегда перераспределение вещества, имеющее огромное геохимическое значение. Однако мы не должны забывать, что это разделение фаз вызвано повышенной величиной тяготения на нашей Земле: в условиях низких полей тяготения (например, на очень малых космических телах или в центральных частях крупных тел) разобщение фаз происходит с трудом, что мы видим, например, по железным метеоритам с кристаллами оливина.

Разобщение фаз, подъем газов кверху, всплывание жидкостей над твердым веществом, оседание кристаллической фазы — все это многообразные и сложные процессы, определяющие один из важнейших путей природной дифференциации элементов. Но надо при этом забывать, что это разобщение фаз находится еще в зависимости от внешнего давления. Выделение летучих компонентов из расплавов, обособление дистиллятов — будущих рудных жил, дегазификация таких систем, как метеориты (с полной потерей летучих компонентов), — все это находится в зависимости от величины внешнего давления и его соотношения с внутренним давлением соответственной газовой фазы. В природной обстановке мы не можем не оценивать огромного значения «летучих компонентов», вскрытых Ниггли в его монографии 1920 г.

2. Среди процессов разобщения фаз в геохимии и минералогии особое значение играет выпадение осадка, т. е. фазы кристаллической. Блестяще доказанное Ф. Ю. Левинсон-Лессингом, Боуэном, Дели и другими петрографами, это явление протекает много сложнее, чем простое разделение по удельному весу, и в разобщении осадков играют роль и форма выделенных кристаллов, и поверхностное натяжение на границах разных фаз, и механическое увлечение твердой фазы газовыми эманациями и т. д. Наконец, мы не должны забывать, что в ряде случаев выделенные кристаллы легче остающегося расплава и всплывают наверх, а остаточная магма обогащается тяжелыми соединениями железа, и т. д.

3. Особенно влияние поля тяготения сказывается на отложениях гидротермальных и холодных водных растворах. В то время как кристаллизация из пневматолитов (выше критической точки) не сопровождается резким проявлением влияния силы тяжести, отложения из водных растворов в жилах или пустотах всегда характеризуются слоистостью, отвечающей постепенному послойному осаждению осадка (в агатах, рудных жилах, пещерах).

4. Большое значение имеет удельный вес при накоплении тяжелых шлихов и перемещении книзу минералов в песках, россыпях, элювиальных осадках (см. об этом подробнее стр. 660).

Осложнения в ходе влияния удельных весов. Хотя, как правило, кристаллический осадок тяжелее того расплава или раствора, из которого он образован, это все же не всегда так: в подавляющем числе случаев осадок действительно падает на дно, чем вызывается явление кристаллической гравитационной дифференциации; однако нередки и случаи, что осадок всплывает (нефелин, лейцит). Это тем более вероятно,

что минералы протокристаллизации содержат элементы преимущественно средних и больших экв, а эки падают по вертикали менделеевской таблицы, т. е. с увеличением атомного веса.

Ход геохимической дифференциации ведет к более раннему переходу в осадок элементов более высоких рядов менделеевской таблицы, т. е. более легких, чему отвечает и их больший кларк и большее накопление в земной коре. С другой стороны, ионы с очень большими эками вообще не переходят в кристаллический осадок, а дают летучие соединения замкнутых решеток, молекулярные соединения, которые, независимо от атомного веса, перемещаются кверху, как бы нарушая влияние законов тяготения.

Такая летучесть, понижение температуры кипения, как мы знаем, вызывается, в первую очередь, сильной поляризацией, свойственной ионам типа купро. Эти ионы, независимо от их удельных и атомных весов, будут переходить нередко в дистилляты и подниматься вверх, вынося с собой тяжелые ионы типа купро.

Таким образом, влияние силы тяжести весьма сложно и должно учитываться при распределении элементов, лишь исходя из сравнительного анализа геохимических черт каждого элемента. В. М. Гольдшmidt очень резко подчеркивал нарушение рядом тяжелых элементов влияния полей тяготения и совершенно правильно отмечал, что в руки человека попал из глубин ряд элементов, как цинк, свинец, уран, железо, марганец и др., только благодаря нарушению законов тяготения и вызванной поляризацией летучести решеток или их «замкнутого» островного строения.

Величины удельных весов. В «Спутнике минералога и геохимика» (1937)¹ дана сводная таблица средних удельных весов твердых минеральных тел. Она обнимает почти 1500 минералов, начиная с удельного веса 0,88 вплоть до 22,7. Ход зависимости удельных весов от природы соединения очень сложен, но все же можно наметить следующую общую схему:

- 0,85—1,4 самые легкие, частью плавающие на воде минералы; принадлежат без исключения к группе углеводородов;
- 1,4—2,0 по преимуществу богатые водой соли легких металлов;
- 2,0—2,4 глины, соли, цеолиты;
- 2,4—3,3 силикаты и карбонаты (без железа и тяжелых металлов);
- 3,2—3,6 силикаты (с Fe, Mn), частью титаносиликаты;
- 3,3—3,7 фосфаты;
- начиная с 3,8 — появление в решетках тяжелых металлов (Cu, Zn, Fe);
- 4—4,7 циркон, ниобаты и танталаты, соли Ва;
- 5—6 влияние тяжелых металлов на сульфиды; специфически плотные минералы (монацит, гематит 5,0, магнетит 5,2);
- 6—8 сульфиды Pb, Co, Bi (также касситерит 6,95);
- 8—10 соединения преимущественно тяжелых металлов (торианит 9,3, уранинит 9—9,5; самородные Bi и Cu, киноварь 8,1);
- 10—22 самородные металлы (серебро 10, свинец 11, ртуть 13,5, платина 16,5, золото 19 и иридий 22).

Таким образом, намечается грубая схема:

1. Углеводороды.
2. Водные соли.
3. Силикаты, карбонаты, фосфаты.
4. Цирконозитанаты, ниобаты.
5. Сульфиды тяжелых металлов.
6. Самородные металлы (кончая благородными).

¹ См. также Э. М. Бонштедт. Определение удельного веса минералов в тяжелых жидкостях. Изд. Акад. Наук СССР, 1939, 46—55.

Атомный объем (AV)

Одной из исключительно важных вторичных величин мы должны признать атомный объем, т. е. $\frac{A}{d} = AV$. Этот показатель обратил на себя внимание еще в 1869 г., и Лотару Мейеру, одновременно с его попыткой наметить периодический закон, принадлежит первая кривая, указавшая периодический ход изменения атомных объемов по мере увеличения атомного веса.

В. М. Гольдшmidt связал с кривой объемов ряд интересных и определенных закономерностей. Он наметил положение отдельных групп элементов следующим образом:

1) с и д е р о ф и л ы — протоэлементы — металлы — занимают самые низкие места кривых, т. е. атомы очень малых объемов;

2) х а л ь к о ф и л ы — связаны в сульфидах и вообще отвечают моему металлическому полю — на восходящих частях кривых;

3) л и т о ф и л ы — элементы преимущественно конечной кристаллизации — на нисходящих частях кривых;

4) а т м о ф и л ы (газы) — на максимумах или около них.

Одновременно эти группы отвечают и определенным типам атомов и ионов, именно:

все положительные ионы типа редких газов — литофильны

» » » » купро — халькофильны

Сидерофильны ионы типа промежуточного. Атмофильны элементы, которые в электрически нейтральном состоянии обладают строением редких газов.

Нетрудно перевести эти замечания на кривую объемов и связать таким образом кривую AV с типом ионов:

понижения кривой заняты ионами промежуточного типа, нисходящие ветви и вершины — ионами типа редких газов, восходящие же ветви — сначала ионами типа купро, а потом ионами типа редких газов.

И. И. Заславский связал кривую объемов с кривой кларков земной коры и совершенно правильно отметил, что самые низкие точки кривой AV, а также и некоторые точки внизу отвечают основным повышенным кларкам земной коры, а именно: H, C, O, Mg, Al, Si, S, Fe, Co, Ni.

Кроме того, Заславский отмечает, что в отдельных основных участках природы преобладают не все перечисленные 10 элементов (космогенов), а только несколько и притом, повидимому, смежных. Например, в организмах преобладают H, C и O; состав основных фаз таков: силикатная фаза содержит O, Mg, Al, Si, S, Fe, Co, Ni (свыше 97%); металлическая фаза — Mg, Al, Si, S, Fe, Co, Ni (свыше 99%), а в сульфидную фазу входят S, Fe, Co, Ni в количестве свыше 98%.

Что касается самих величин AV и их вывода, то мы имеем в своем распоряжении сейчас прекрасную сводку В. Бильца (Biltz, 1934), который не только дал полный цифровой анализ всего имеющегося материала, но и наметил пути к использованию AV для вывода молекулярных объемов. Его основная идея сводится к тому, что «потребность в пространстве» определяется для соединений в большей степени величиной атомных объемов входящих в соединения атомов, чем радиусами их ионов. Применяя закон аддитивности объемов, он удачно доказывает это для стекол и сплавов, но, несомненно, приходит к менее убедительным результатам при анализе чисто ионных кристаллических построек, где аддитивность радиусов ионов позволяет правильнее решить задачу.

Молекулярный объем (*MV*)

Определение молекулярного объема представляет теоретически очень важную задачу, значение которой в геохимии очень велико, но далеко еще недооценено геохимиками и минералогами. Само же понятие весьма сложно постольку, поскольку молекулярный вес является в новых представлениях кристаллохимии понятием или совершенно нереальным (в типичных ионных решетках) или условным (в решетках с ковалентной связью). Поэтому общее применение *MV* требует дальнейшего геохимического изучения и правильно частично заменяется И. И. Заславским понятием величины сжатия.

Совершенно очевидно, что при неясности самого представления о молекулярном объеме общее геохимическое или кристаллохимическое значение может иметь лишь сравнение однотипных соединений и однотипных решеток, в которых морфотропическое замещение элементов и связанное с ним изменение *MV* может иметь определенное геохимическое значение.

Уже при беглом просмотре материала Бильца можно убедиться, что для однотипных соединений (морфотропических рядов) изменение объемов следует в общем параллельно последовательности кристаллизации, что можно видеть на следующих примерах:

I. Группа граната — кристаллизация в пегматитах и на контактах

Минерал	Альмандин	Спессартин	Гроссуляр	Андрадит
Морфотропически изменяющиеся элементы	Fe ²⁺ Al	Mn ²⁺ Al	Ca Al	Ca Fe ²⁺
<i>MV</i>	115,1	118,3	125,7	131,7
Соответствующие радиусы ионов	0,83 0,57	0,91 0,57	1,06 0,57	1,06 0,67
Геохимический характер кристаллизации .	Геофаза В 600°	Геофаза F ~ 500°	~ 450°	~ 350°

Мы видим, что в ходе кристаллизации пегматитовых остатков последовательность отвечает повышению *MV* и *R*.

II. Группа галоидных солей

Формула .	NaCl	NaBr	KCl	KBr
<i>MV</i>	26,50	31,37	36,77	42,36
<i>R</i>	0,98 1,81	0,98 1,96	1,33 1,81	1,33 1,96
Средняя величина <i>R</i>	1,20	1,46	1,57	1,64

Формула .	RbBr	KJ	RbJ
<i>MV</i>	48,34	51,97	58,39
<i>R</i>	1,49 1,96	1,33 2,20	1,49 2,20
Средняя величина <i>R</i>	1,72	1,76	1,85

Последовательность кристаллизации для однотипно построенных соединений соответствует повышению молекулярных объемов или, иначе говоря, повышению величин радиусов ионов и понижению энергии решеток.

Главнейшая литература

- А. Е. Ферсман. Геохимия. 1937, III, 36—39.
 Спутник геохимика и минералога. Под ред. А. Е. Ферсмана и О. М. Шубниковой.
 Изд. Акад. Наук СССР, 1937, 328—340.
 W. Biltz. Raumchemie der festen Körper. Leipzig, 1934.

4. ТИПОМОРФНЫЕ СВОЙСТВА МИНЕРАЛОВ. ЗАВИСИМОСТЬ СВОЙСТВ МИНЕРАЛОВ ОТ ГЕНЕЗИСА

Со всей решительностью необходимо настаивать на том, чтобы поисковик и разведчик собирали и изучали все без исключения минералы исследуемого района или месторождения.

Минерал — это одна из тех естественных единиц, из которых складывается рудный или жильный комплекс, и только знание всех минералов данного района и изучение их типоморфных свойств дает руководящие идеи для понимания генезиса данного месторождения.

Между тем поисково-разведочная деятельность последних лет игнорировала этот важнейший и необходимый метод изучения, и полевые наблюдения общего геологического характера обычно дополнялись лишь микроскопическим анализом пород и в редких случаях и минералов. Это направление приводило к серьезным ошибкам, служило обоснованием легкомысленных, чисто вымышленных генетических идей и не давало настоящей фактической базы для исследования. Как пример приведем описание одного хромитового месторождения, где поисковик выдвинул теорию углекислых постагматических терм, тогда как вторичные минералы этого месторождения состояли только из брусита и керолита и указывали на сильный гидролиз (без CO_2) перегретыми парами воды.

Новая школа поисковых работ должна отрешиться от этих старых привычек и поставить изучение самого минерала как важную самостоятельную задачу.

Геохимик и минералог, поисковик и разведчик должны строить свои выводы исключительно на точных фактах, на анализе всего комплекса минералов, их пространственных и хронологических соотношений, их химического состава и типоморфных свойств.

Мы остановим внимание на главнейших типоморфных минералах и вкратце рассмотрим их значение для поисковой геохимической работы.

Обзор типоморфных минералов

Типоморфными минералами мы называем минералы, занимающие по тем или иным причинам строго определенное место в геохимическом процессе и поэтому отвечающие тому, что в исторической геологии называется руководящими ископаемыми. Они, подобно последним, определяют условия и время, т. е. геофазу геохимического процесса, и их изучение столь же важно для понимания процессов, например охлаждения гранитного расплава, как палеонтологическое исследование руководящих форм для анализа какой-либо осадочной свиты.

Типоморфным может являться в ходе процесса сам минерал как таковой, занимающий в геохимической диаграмме строго определенное место, но это бывает сравнительно редко; чаще типоморфными являются отдельные свойства минералов, определяющие те или иные черты, характерные для данного момента процесса. Такими чертами могут быть изменения в химическом составе, в окраске, в содержании изоморфных подмесей, в кристаллическом облике или полиморфной модификации. Детальный геохимический и морфологический анализ может намечать в этом отношении много характерных черт и приобрести важное диагностическое значение. К сожалению, недостаток точных внешних описаний, особенно в работах последнего времени, не позволяет достаточно детально осветить этот вопрос до новых специально поставленных исследований.

Как видно, кварц является исключительно важным типоморфным минералом, указывающим на ход процесса; в частности, он — важнейший спутник золота, причем опытные «золотари» по внешнему виду кварца судят о золотоносности данного района. В этом отношении наиболее интересным типом кварца является белый кварц¹.

Белый или белеющий кварц в пегматитах играет роль меньшую, чем в пневматолитах, где он является характернейшим минералом совершенно определенных жил — золотых (отчасти), особенно медных и реже свинцово-цинковых. Эти постоянные молочные кварцы рудных жил охватывают геофазы G — H и вообще гораздо шире распространены в них, чем в пегматитах, где, наоборот, как раз времени отложения этого молочного кварца отвечают явления растворения кварца щелочными растворами и где передко чисто молочная фаза присутствует лишь как тоненькая кора или рубашка на серых кристаллах, отвечая геофазе G (например, белые рубашки р. Завитой или месторождения Савватеевой в Борщовочном кряже).

В пегматитах архейских, образованных под большим давлением, мы наблюдаем накопления кварцевого остатка в геофазе E, отчасти F, в виде сплошных беловатых (но не молочных) масс, иногда просвечивающих или опалесцирующих, обычно переходящих к центру в нежнорозовые разности.

Часть белого кварца следует называть белеющим кварцем, так как несомненно, что белый цвет связан с обилием первичных включений, которые только при действии колебаний температуры на поверхности дают сеть капиллярных трещинок и механических разломов, обуславливающих общий белый тон камня. При добычных работах белый цвет нередко с глубиной исчезает.

Магнетит

Типоморфное значение магнетита несомненно; однако до сих пор он изучен очень плохо. Амплитуда условий его образования очень велика; по всей вероятности, высокотемпературные магнетиты (например, геофазы B — C) и структурно и по составу отличаются от магнетитов низких температур в альпийских жилах (геофазы I). В общем, однако, образование больших скоплений магнетита связано с температурами порядка 800—500, т. е. с геофазами A — B — C-процессов.

Выделение магнетита указывает на довольно высокий pH расплаво-растворов и на среднее содержание свободного кислорода. Магнетиты, связанные с гранитными магмами, вообще лишены титана или бедны им, тогда как их аналоги в нефелиновых сиенитах и в породах габброидного типа близки к титаномagnetитам и содержат TiO_2 до 20—25 %.

Циркон

Нахождение циркона в жиле может служить указанием на интересную и богатую минерализацию остаточного комплекса, а в очень кислых жилах, богатых кварцем и альбитом, служит постоянным наведением на высокое содержание гафния. Цирконы без призм (серые или желтоватые) характерны для нефелиновых сиенитов, хотя в контактах последних, в сиенитовых породах, появляются типичные буро-красные, слабо вытянутые кристаллы. Нахождение цирконов в нефелиновой ассоциации для пород мигматитовых не может служить особым признаком, в породах агапитовых

¹ Часто сизый, светлосерый, полупрозрачный. Очень характерно заохривание. — Ред.

(Хибины, о-ва Лос, Мадагаскар) они служат наведением на нахождение более высокотемпературных цирконосиликатов (эвдиалита) или, наоборот, на возможность термального его распада с образованием бадделеита (например, Бразилия).

Альвитовый тип кристаллов (непрозрачных, с округлыми гранями) указывает на гранитный пегматит (NB! соединения иттрия, тория или урана); хорошо образованные кристаллы зеленых и бурых тонов — на роль карбонатных пород с образованием десилицированных пегматитов скрещения (связь с роговыми обманками) — поиски сфена, флогопита, апатита.

Несмотря на ряд работ по изучению цирконов (Э. М. Бонштедт, Е. Е. Костылевой, Худобы и др.), мы не имеем вполне ясной картины их типоморфных свойств. Для гранитных пегматитов намечается:

Геофаза А (и начало В) — первичные бурые цирконы с длинной призмой.

Геофаза С и начало D — цитролит, малакон, в сростании с лепидомеланом и ксенотимом; интересно отметить, что образование этих разновидностей циркона относится к области температуры перехода двух его модификаций (569°).

Геофаза F (начало) — малакон в мелких кристаллах с альбитом на микроклине (редко).

Гранаты

Тип и состав граната¹ определяют тип месторождения, и потому правильное их определение может иметь большое значение при поисках и разведках.

Уваровит — темнозеленый хромовый гранат, непосредственно указывает на хромит в жильных трещинах, среди которого он только и встречается.

Демантоид светло- и яркозеленый — связан с основной магмой (диаллагитами, пироксенитами, змеевиками) и обычно приурочен к глубинным контактам с известняками. Может служить указанием на нахождение асбестов и хромитов (платины).

Шерломит (черный титановый гранат) и меланит (черный) — очень характерны для щелочных магм, служат наведением на нахождение нефелиновых пород (особенно в их контактах с карбонатами). Частично приурочен к глубинным контактам щелочных гранитов с известняками (совместно со сфеном).

Гроссуляр — зеленовато-желтый гранат, указывает на контакты с известняками, но не столько гранитов, сколько более основных пород, т. е. относительно низких температур без миграции железа и без месторождений магнетита.

Пироп — яркокрасный магнезиальный гранат, служит наведением на глубинные эклогиты или выносы из глубины ультраосновных пород, указывает на нахождение драгоценных камней (оливина и алмаза).

Андрадит — кальциевый гранат с Fe^{+2} и Fe^{+3} , образующийся в контактах гранитных магм с карбонатами при избытке кислорода. Содержание железа наравне с окисью приводит к более темным тонам и указывает на месторождения магнетита.

¹ Хорошей сводкой по данному вопросу с диаграммами составов различных типов гранатов является работа Райта (W. G. Wright. The composition and occurrence of garnets. Am. Min., 1938, XXIII, № 7, 436—449).

А л ь м а н д и н — темнокрасный гранат, в чистом виде отвечает глубинным (восстановительным) процессам в условиях кислой плюмазитовой магмы и высоких давлений. В гнейсах и кристаллических сланцах служит указанием на дистен (кианит), в пегматитах — на раннюю фазу их кристаллизации.

С п е с с а р т и н — богатый марганцем гиаинтово-красный гранат, служит указанием на пегматиты, богатые марганцем и литием; нередко отвечает геофазам G — H.

Нефелин

Местонахождение нефелина в горной породе или в жильных выделениях является исключительно важным фактором, предопределяющим ряд типичных минеральных ассоциаций и «запрещающим» ряд других.

Вообще нахождение этого минерала или его аналогов исключает в данном парагенезисе кварц (кроме чисто вторичного) и намечает целый комплекс весьма своеобразных и минералов и полезных ископаемых, о которых детально сказано на стр. 596. Как видно будет, длинный список полезных ископаемых связан с нефелиновыми породами, и всякая находка нефелина, особенно в жилах, является теоретически и практически интересной и заслуживающей большого внимания.

Однако интерес нахождения нефелиновых пород (глубинных) заключается еще в том, что одновременно с дифференциацией и отщеплением нефелиновых комплексов идет обособление и другой остаточной части магмы, характерными чертами которой является обилие алюминия и кремния при относительной бедности щелочами. Агпаитовые, резко щелочные нефелиновые выделения, с одной стороны, и плюмазитовые, с другой, дополняют и нередко сопровождают друг друга, хотя и залегают на некотором расстоянии. Примером такого замечательного сочетания и дополнения могут служить Ильменские горы на Урале.

Районы с нефелином заставляют искать поблизости:

- 1) полей щелочных гранитов с их типичной минерализацией (фтор);
- 2) плюмазитовых образований (гранат, кианит, мусковит, силлиманит, андалузит).

Одинаковую роль с нефелином играют содалит и отчасти канкринит.

Пироксены и роговые обманки

Крупные скопления этих минералов служат показателем явлений дифференциации основной или ультраосновной магмы, причем, как правило, пироксены отвечают более высоким температурам, а роговые обманки более низким (с некоторым усилением летучих компонентов); при дальнейшем ходе процесса и понижении температуры устойчивее оказываются биотит и его разновидности.

В сухих контактах преобладают темные пироксены (+ гранат) как спутник контактного оруденения (магнетит, позднее сульфиды); в остаточных эпимагматических и полупегматитовых остатках основных магм — роговые обманки (с хлоритами и титаномagnetитом).

Присутствие зеленого эгирина или его эгириновой частицы в авгитах служит указанием на щелочной характер гранитов или сиенитов (о поисках в этих породах, см. стр. 600); наличие ромбических пироксенов — высокотемпературный процесс — на возможность присутствия сульфидов никеля, кобальта, меди.

Присутствие синих и сине-черных роговых обманок говорит о щелочных или, вернее, агпайтовых породах (гранитах и сиенитах) с содержанием $\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$, хотя в иных случаях эти минералы связаны с осадочно метаморфическими свитами¹.

Ортоклаз и микроклин

Соотношения этих минералов довольно сложны и не зависят исключительно от температуры, а повидимому, связаны, кроме того, с вопросами давления, концентрации и т. д.

Однако некоторые правила намечаются: в геофазах 700—750° (т. е. С и D) обычен микроклин; в конце образования калиевого полевого шпата, т. е. в геофазе E (около 500°) обычно встречается уже кристаллический ортоклаз и ортоклазпертит. Снова наблюдается ортоклаз в виде адуляра в водных растворах при температурах ниже критической точки воды (400—350°), причем, повидимому, точка около 300—320° представляет нормальный нижний предел.

Таким образом, как будто бы намечается, что при высоких магматических температурах устойчива форма ортоклаза; при дальнейшем охлаждении равновесие переходит в область высокотемпературных пегматитов, где устойчив микроклин, чтобы ниже 550° вновь смениться ортоклазом; при низких температурах устойчив, повидимому, только моноклинный полевой шпат.

Вообще можно установить ряд очень характерных типоморфных обликов кристаллов калиевого полевого шпата, что видно из нижеследующей схемы: при высоких температурах — тип «b», с преобладанием базопинакоида и клинопинакоида; в пегматитах — тип более или менее изометрический, с одинаковым развитием призмы двух пинакоидов и задних дом; далее следует тип «с» — тип адуляров, вообще отвечающий предыдущему, но несколько вытянутый по оси Z, наконец, повидимому, наиболее низкотемпературный тип «d» почти без призмы, с ромбическим обликом из призмы и задней домы (101).

Хотя приведенная схема выдерживается и не полностью, тем не менее она может служить некоторым наведением, а именно:

тип «b» подсказывает характерную минерализацию пегматитов, и в связи с ним можно искать дымчатый кварц (пъезокварц), берилл, топаз и др.;

тип «с» не дает каких-либо месторождений большого практического значения, за исключением чистого горного хрусталя (оптического и радиоакварца);

тип «d» указывает на довольно холодные рудные процессы, вместе с кварцем и кальцитом нередко сопровождается жилы с золотом. Этот же тип с небольшой призмой (промежуточный между «d» и «с») указывает на золотые жилы более высоких температур и побуждает к поискам золота, вольфрама и мышьяка (шеелитосаренопиритовый тип).

Амазонский камень

Настоящий амазонит связан исключительно с типичными гранитными пегматитами, хотя и указывает на их несколько повышенную щелочность и частичную связь с щелочными гранитами или даже с нефелиновыми сиенитами.

Как правило, нахождение амазонитов является хорошим признаком обильной минерализации и обычно, при добыче драгоценных камней,

¹ См. работу Кунитца (W. K u n i t z. Die Isomorphieverhältnisse in der Hornblende-Gruppe. N. Jb. Min., Geol. u. Paläont., 1929, Abt. A, LX, 171—250).

указывает на возможность нахождения топаза, берилла и темного дымчатого кварца (Мадагаскар, Ильменские горы на Урале). Генетически амазонит отвечает геофазам Е — F.

Топаз

Нахождение топаза служит явным указанием на летучие фазы гранитных магм с образованием в апикальной части грейзенов.

Поиски руд олова, вольфрама и драгоценных камней, особенно мориона, вытекают из находок топаза.

Топаз, несомненно, один из типичных проходных минералов с очень характерными типоморфными свойствами. Хотя до сих пор он морфологически недостаточно изучен в этом направлении, тем не менее уже сейчас можно наметить ряд характерных черт. Необходимо иметь в виду последовательность его кристаллизации:

Геофазы D — E — синие кристаллы с сильно развитым базопинакоидом и почти квадратной призмой. Тип, бедный формами, нередко включенный в виде сырца в полевой шпат или кварц.

Геофазы E — F — желтые или слабо окрашенные кристаллы гексагонального облика, базопинакоид сужен четырьмя рядами основных пирамид. Из призм доминирует (110).

Геофазы F — G — доматические кристаллы, называемые на Урале конвертами, бесцветные, иногда голубые, с преобладанием острой домы (021) и с псевдоквадратной призмой (120). Базопинакоид почти отсутствует. Нередко появление мутных головок типа коневых зубов Шерловой горы. К этому же типу относятся кристаллы топаза с фенакитом.

Геофазы H — I — особняком стоят топазы кварцевотопазовых жил Санарки на Южном Урале и в Бразилии, где наблюдаются винно-желтые или фиолетовые топазы острых форм.

Геофаза H (начало) — разъединение топаза.

Особняком морфологически стоят топазы пневматолитов, преимущественно геофаз E и F, и некоторых риолитовых эффузивов, в которых остроконечные топазы сопровождаются гессонитом, гематитом, биксбитом и кварцем. Интересно, что в общей геохимической истории максимальное накопление топаза относится не к начальным высокотемпературным геофазам пегматита, а к средним и даже низшим, в которых фтор и особенно гидроксильная группа начинают приобретать особое значение.

Турмалин (шерл)

Турмалин (шерл, рубеллит, ахроит, дравит, индиголит, зеленый турмалин и полихромный турмалин)¹.

Замечательно интересный минерал с точки зрения эволюции пегматитового расплава. Хорошо освещен в литературе, что дает возможность установить такую последовательность:

Геофаза A и начало B — черные солища шерла с процессами первичного выделения в конечных стадиях расплава (турмалиновый гранит); весьма удлинённые призмы.

Геофаза D и конец C — главное время образования шерла в виде огромных черных кристаллов, не очень длинных. В пневматолитах эта геофаза отличается замещением биотита и полевого шпата.

¹ Хорошей работой по турмалину является исследование Кунитца (W. Kunitz. *Chemie d. Erde*, 1929, IV, 208—252).

Геофаза Е и начало F — после некоторого перерыва или непосредственно нарастая на шерл геофазы D (особенно в пустотах пегматита типов III—IV) — образование темносинего просвечивающего турмалина. Эта геофаза известна и в пневмолитах и сопровождается в них новообразованием апатита и брукита. Характерно сочетание в турмалине $\text{Fe}^{+2} + \text{Fe}^{+3}$.

Геофазы F — G — образование полихромного и розового турмалинов, обычно в последовательности: бурый, зеленый, розовый, вишневый.

Геофаза G — турмалин оказывается нередко неустойчивым и замещается лиловым лепидолитом.

Геофаза H — начало I — новообразование игольчатого шерла, нередко с флюоритом и даже цеолитами. В рудных жилах примерно этой геофазе отвечают иногда черные турмалины медно-турмалиновых жил. Что касается зеленого турмалина Березовска, то его, вероятно, следует относить к геофазе G на границе гидротермальных растворов.

На геофазе H заканчивается, таким образом, процесс образования турмалинов; он заменяется в постпегматитовых образованиях другими боросиликатами, сначала аксинитом, а затем датолитом.

В периоды длительной эволюции мы наблюдаем иногда несомненные перерывы, в течение которых турмалин не только не откладывается, но частично изменяется и замещается (таково превращение его в агрегаты слюд типа мусковита, флогопита и хлорита); особенно характерны эти процессы для конца фазы G.

Во всяком случае турмалин служит указанием на наличие сильных пневматолитических деятелей кислых (реже средних) магм.

В случае связи шерла с более основными магмами возможно нахождение медно-турмалиновых жил, а при несколько более низких температурах и людвигито-золотых.

Берилл

Берилл (изумруд, аквамарин, морганит, воробьевит — ростерит). Принадлежит к весьма типичным типоморфным минералам совершенно определенного ряда:

Геофазы B — C — синий берилл в первичных выделениях магматической породы (особенно в пневмолитах); длинные призмы.

Геофазы D — E — желтый, золотистый, иногда бурый берилл.

Геофазы E — F — главная область выделения берилла: зелено-синего аквамарина, постепенно ослабевающего тона и переходящего в совершенно бесцветный берилл; длина призм сокращается.

Геофаза F — берилл в короткостолбчатых кристаллах с некоторым накоплением щелочей (Na_2O , K_2O , Cs_2O , Li_2O , H_2O) и блестящими гранями базопинакоида.

Геофаза G — розовый воробьевит (ростерит) короткий, плоский, с большим содержанием Cs_2O и Li_2O (3,5—1,5%), удельный вес достигает своего максимума; плоские ростериты (рис. 3).

Далее мы наблюдаем ряд процессов изменения берилла. В схеме берилл в геофазе G, в нормальном построении чистой линии пневмолита или пегматита, заканчивает поле своего существования и начинает разъедаться и разрушаться, частью путем полного растворения минерала с его вытравлением, частью превращаясь в кристаллы бертрандита, иногда фенакита. Такое разъедание вызывается или фтористыми растворами, с новообразованием фиолетового плавикового шпата, или щелочными растворами, с новообразованием мусковитоподобных минералов типа жильбертита.

температур — ближе к очагу накапливаются примерно одновременно олово и вольфрам, циннвальдит и топаз; в условиях более низких температур — соединения лития и цезия.

Слюды

Изучение слюд какого-либо месторождения может дать очень важные указания для поисков различных полезных элементов и соединений.

Мы будем различать группы слюд:

- 1) биотита и флогопита;
- 2) мусковита;
- 3) лепидолита и циннвальдита.

Как правило, эти три группы отвечают разным геофазам геохимических процессов:

Первая — геофазам	B — C — D	магматической и эпимагматической
Вторая —	» D — H	пневматолитической и частично гидротермальной
Третья —	» G — H	

Исключение составляют циннвальдит и флогопит, охватывающие, по-видимому, больший интервал температур геофаз (в процессе скрещения и контактов).

Для биотита мы имеем следующие типы:

- 1) лейсты — удлиненные кристаллы в геофазе B и особенно C — преимущественно биотит;
- 2) большие листы — пластины в геофазе C; на ее границе с D — преимущественно лепидомелан (нередко первичного темнозеленого тона);
- 3) промежуточные бурые слюды в начале геофазы C; литиевые биотиты и особенно циннвальдиты; интересны редкие цезиевые биотиты;
- 4) в мигматических пегматитах мы наблюдаем типичные флогопиты с содержанием Mg, F, (OH) и Li;
- 5) в более холодных контактах с карбонатными породами — флогопиты с F и (OH).

Для светлых калиевых слюд мы имеем ряд очень типичных черт. Морфологически мы намечаем следующие моменты, определяющие геохимическую историю мусковита.

Геофаза D и начало E — мусковит в гранитах и в аplitовых оторочках пегматитов B является минералом автопневматолитиза, так как хронологически его образование относится целиком к фазе D (второй половине), когда начинается гидролиз и одновременно с окончанием выделения биотита начинается процесс выделения мусковита. Интересны для этого мусковита ромбические сечения кристаллов; цвет красноватый.

Граница геофаз E — F — ромбические серебристые кристаллики нередко появляются на границе геофаз E — F, но затем в параллельном расположении приобретают зеленые гексагональные контуры.

Геофаза G дает при условии отсутствия большого количества лития ряд генераций зеленых слюдок, образующихся одновременно с альбитом и характерных своими гексагональными контурами; нередко эти слюдки сменяются более поздним лепидолитом. Иногда на границах геофаз F и G появляются красные мусковитовые слюдки с большим содержанием Li.

Геофаза H характеризуется образованием мелкокристаллического жильбертита (дамурита).

Эти характерные слюды появляются на границах геофаз G и H, т. е. в очень важный момент перехода через критическую точку воды. Здесь образуется обычно мелкокристаллическая зеленая слюдка, которая в виде «тальковой» (как она нередко неправильно описывается) обмазывает минералы, иногда в виде сплошных яблочно-зеленых масс. Этот типичный минерал, встречающийся не только в постпегматитовом процессе, но и в пневматолитах, описывается под разными названиями, особенно часто дамурита, онкозина, и нередко даже неправильно отмечается как эмеевик, тальк, серицит, маргарит, пеннин, хлорит, лейкохлорит и т. д.

Образование жильбертита, несомненно, есть результат гидролиза ранее образовавшихся силпкатов и в первую очередь натрокальциевых полевых шпатов. Этот процесс гидролиза должен приводить к образованию слабых щелочных растворов, которые в свою очередь являются очень сильными активными деятелями разложения как топаза, так и кварца и полевых шпатов.

Таким образом, температура около 400—360° определяет начало этого очень характерного процесса, одинаково типичного как для пегматитов, так и для пневматолитических образований рудных возгонов.

Если природа и состав жильбертита и кукеита совершенно ясны, то менее ясны те минеральные образования, которые обычно называют серицитом и которые иногда накапливаются в довольно больших количествах в гидротермалитах. Надо сказать, что эти серицитовые слюдки почти неизвестны в постпегматитовых процессах, но очень часто отмечаются в рудных жилах. Повидимому, прав Роджерс, который относит их к геофазам I и K и связывает особенно с процессами пиритизации. Они устойчивы в геофазе L и переходят в продукты каолинового типа.

Для литиевых слюд отметим, что группа чисто литиевых слюд играет огромную роль и притом исключительно в пегматитах; довольно резко отличаются они при этом от слюд мусковитовых, с одной стороны, и от тех литиевых слюд, которые образуются в пневматолитах, с другой. В последних мы имеем значительно большее содержание железа, и поэтому в них никогда не встречаются лепидолиты, а всегда циннвальдиты; наоборот, в пегматитах циннвальдиты сравнительно редки (Мадагаскар, Северная Монголия, Вольня); они появляются лишь в случаях вторичного накопления железа в геофазу F или в случае сохранения железа во всем процессе, особенно при отсутствии бора (например, в Монголии).

Apatum

Апатит вообще изучен плохо с геохимической точки зрения, все же можно указать следующие его типоморфные особенности.

1. Образование светлого (зеленого) зернистого и короткостолбчатого апатита свойственно щелочным нефелиновым магмам и нередко связано с щелочными жилами ийолитов, лимбургитов, нефелиновых сиенитов, тешенитов и т. д.

Особенно характерна связь апатита с контактами указанных пород с породами карбонатного типа.

2. Зеленоватый сплошной апатит в жилах, связанных с породами типа габбро, вообще редок, но может образовывать достаточные для практических целей скопления.

3. В рудных пневматолитах геофаз E — G довольно обычен, как спутник олова, топаза и берилла; в гидротермальных рудных жилах не типичен. Практического значения в них не имеет. Короткие призм изометрической формы.

4. Весьма обычен в гранитных пегматитах, но сам в них практического интереса не представляет. Преимущественно выделяется в геофазы С — D в виде слабо удлинённых голубых или зеленых кристаллов. В геофазе F темнозеленый Mn-апатит.

В геофазы G — H короткие кристаллики апатита обычно розовой или слабофиолетовой окраски, иногда совершенно без призм и пластинчатые.

5. В холодных растворах апатит сплошной, коллоидальный или волокнистый (фосфорит, иногда сопровождаемый глауконитом и органическим веществом).

Несомненно, что внешний вид, облик, цвет и химический состав апатитов являются очень важным диагностическим и типоморфным признаком.

Флюорит (плавиковый шпат)¹

Нахождение плавикового шпата всегда служит указанием на сильнейший пневматолитизм и термальные растворы, намечая вообще наличие процессов высокой температуры (450°) и до теплых, почти холодных растворов. Диаграммы указывают на положение точек флюорита, из которых видно, что он сопутствует обычно серебро-свинцовой ассоциации рудных жил вплоть до сурьмяно-ртутной, чем и определяется типичный список полезных ископаемых (руды свинца, серебра, ртути, сурьмы, барит и флюорит).

Характерны его типоморфные свойства, которые, однако, выдерживаются непостоянно.

Геохимическая схема флюорита довольно определена, но охватывает преимущественно флюорит пневматолитов:

Геофазы: G G—H I K L

Цвет: Зеленый Розовый В пневматолитах светлый фиолетовый оттенок, в пегматитах — фиолетовый

Генерации: I — сложная комбинация с октаэдром в основе; II — октаэдр с постепенным усилением граней додекаэдра; III — шестоватый волокнистый (октаэдр с кубом и додекаэдром); IV — кубы, иногда с октаэдром; V — кубы со слоями гранями.

Первый более высокотемпературный тип — в пегматитах и альпийских жилах, второй — в рудных термах, третий — в них же и в метасоматических и гипергенных месторождениях.

Интересны различия спектров флюоресценции: для флюоритов, связанных с гранитными породами, характерны полосы поглощения итербий, тогда как флюориты, связанные с основными породами, обнаруживают линии европия. Это может служить интересным диагностическим признаком.

Каолиниты (кристаллические)

Кристаллические каолиниты и их многочисленные разновидности (диккит, накрит, каолинит и др.) связаны с гидролизом алюмосиликатов при сравнительно низких температурах, порядка 50—150° (не выше), благодаря чему мы обычно встречаем каолиниты вместе с баритом, флюоритом и рудами сурьмы, мышьяка и особенно ртути, т. е. в конечных стадиях гидро-термальных процессов. Из кислых растворов выпадают каолиниты с отношением $R_2O_3 : SiO_2 = 1 : 2$, из щелочных — минералы группы монтмориллонита или бейделлита с отношением 1 : 4 или 1 : 3.

¹ Очень обстоятельная сводка: K. O b e n a u e r. N. Jb. Min., Geol. u. Paläont., 1932, Abt. LXVI, 89—119.

Кальцит

Кальцит служит в общем хорошим типоморфным минералом, причем мы можем различать кальциты трех этапов генетической схемы:

I. К а л ь ц и т м а г м а т и ч е с к и й или полуматматический — очень характерен, обычно (не всегда) оранжевой окраски, с пластинчатым строением по базопинаккиду. Мало обычен и часто связан лишь с перекристаллизацией захваченных карбонатов. Особенно интересна связь карбонатов с породами нефелинового состава. Попутно отметим, что кальцит контактно-метаморфизованных известняков обычно имеет синевато-молочный оттенок, который может считаться для него вполне типоморфным.

II. К а л ь ц и т г о р я ч и х т е р м а л ь н ы х растворов характерен для рудных жил и почти не известен в пегматитах. В гидротермалитах и частично в пневматолитах кальцит очень редко повышается выше геофазы G, причем характерным является облик кристаллов (призма, базопинаккид, частично основной ромбоэдр спайности, реже ромбоэдр e), цвет обычно белый (бесцветный), реже слабофиолетовый или желтоватый.

III. К а л ь ц и т х о л о д н ы х в о д н ы х растворов весьма многообразен по своей форме, кристаллическому облику, окраске и т. д. Характерными являются формы острого скаленоедра V, тупого ромбоэдра e и острых ромбоэдров разных знаков¹.

Свойства полезных ископаемых в зависимости от типа их генезиса

Образование минералов протекает в интервале от +1600 до —50°. Одни минеральные тела занимают более или менее определенное место в этой шкале, другие являются как бы проходными и встречаются при весьма разных температурах. Примером первых может считаться топаз или андалузит, а примером вторых — апатит или кварц, кристаллизующийся в природе при температуре от 1000 до 0°.

Это образование минералов в различные фазы длительного геохимического процесса совершенно понятно с физико-химической точки зрения, ибо при разных условиях и сочетаниях внешних факторов устойчивы и разные сочетания минералов.

Однако особенности как химического, так и физического характера (примеси, окраска, структура и т. д.) оказываются для отдельных генераций различными, и если мы присмотримся к общему ходу геохимических процессов, то увидим, что, начиная с магмы и кончая холодными растворами, намечается и постепенное изменение общего характера типоморфных черт.

В томе III «Геохимии» я подверг более детальному анализу этот вопрос и дал таблицы таких постепенных изменений. Здесь же я ограничусь лишь перечислением основных и наиболее важных для поисков черт:

1. Большая способность к изоморфизму при образованиях при высоких температурах, благодаря чему минералы оказываются в магматических условиях более сложными, содержат больше примесей и их решетка оказывается как бы более гибкой при замене отдельных узлов.

2. С этим в значительной степени связана и более интенсивная окраска более ранних минеральных выделений, которые путем постепенного очищения теряют свои темные тона, так что последние генерации оказываются или белыми или бесцветными (очень хороший пример берилл или сфен).

¹ По данному вопросу см.: G. K a l b. Die Kristalltracht des Kalkspates in mi-
nerogenetischen Betrachtung. Zbl. Min., Geol. u. Paläont., 1928, Abt. A, № 10,
337—339.

3. При более высоких температурах образуются, однако, решетки более простые, т. е. количество ионов, определяющих тип решетки, значительно меньше, чем в случаях низких температур, где мы имеем гораздо более сложные и тяжелые молекулы (ср., например, формулу цеолитов с формулой высокотемпературного фаялита).

4. С другой стороны, при высоких температурах чаще идет одновременная кристаллизация различных минералов; отдельные компоненты пространственно разобщаются гораздо меньше, чем в холодных водных растворах (ср. какую-либо горную породу или состав пегматита, типичного представителя одновременной кристаллизации, с химическими осадками земной поверхности — известняками и пр.).

Мы знаем сейчас, что выпадение какого-либо соединения из расплавов или растворов в общем подчинено закону действующих масс, и поэтому никогда никакое сочетание элементов полностью в геохимическом процессе не разобщается на свои составные части.

Никогда протоэлементы не выделяются полностью в осадок, а всегда лишь в известной части, отвечающей определенному равновесию. В этом отношении Зондер показал в интересных подсчетах, что даже очень резкая дифференциация первичного вещества в земных оболочках связана с очень постепенным разделением химических элементов, что особенно наглядно видно при анализе логарифмических кривых кларков.

Природный процесс разобщения элементов идет, таким образом, как бы недо конца. Разделение и дифференциация атомов идут лишь постепенно в определенных пределах.

Это геохимическое правило имеет огромное значение для практических целей, и его не надо забывать ни геохимику, ни технологу, ни обогатителю.

В образованиях магматических и вообще высокотемпературных мы поэтому редко наблюдаем чистые обособленные полезные ископаемые — в них всегда мы имеем дело со сложными сочетаниями элементов и минералов. Поэтому образования расплавленных магм и пегматитов требуют всегда механического отделения, обогащения или специальных химических методов разделения, без чего мы не можем получить чистого химического вещества. Прекрасным примером этого положения являются полезные ископаемые Хибинских тундр и, в частности, апатитового рудного тела. Общий тип кристаллизации таков, что лишь путем обогащения возможно выделить отдельные полезные ископаемые (apatит, нефелин, эгирин, титаномagnetит). Проблема использования вещества в данном случае обычно упирается в трудности методики в части технологии и обогащения.

Значительно чище и гораздо более дифференцированными являются газовые погоны — дистилляты, в которых в зависимости от упругости паров происходит дальнейшее разделение на пневматолиты с оловом и вольфрамом, на цинковые и свинцовые руды и т. д. Однако взаимодействие высокотемпературных газов и терм со стенками пород осложняет относительно простую схему геохимической кристаллизации.

Скопления чистых соединений мы знаем только в поверхностных гипергенных процессах, где после многократной перекристаллизации вырабатываются наиболее дифференцированные и наиболее чистые химические осадки (хлористый натрий, гипс и др.).

В этих условиях нередко особую роль играет жизнедеятельность организмов, которая оказывается настолько тонким геохимическим фактором, что с исключительной чистотой разделяет и накапливает отдельные элементы, рассеянные в гипергенной обстановке. Таковы, например, образования чистых марганцевых руд и т. д.

Большую роль в этих же процессах играют тонкие различия в величинах pH , так как многие химические вещества выпадают лишь при строго определенной концентрации водородных ионов и этим путем отделяются от своих аналогов. Таково, например, выпадение гидратов окиси железа и алюминия из морских вод.

Таким образом, промышленность находит самые чистые и наименее комплексные соединения ряда химических элементов как раз в продуктах, связанных с процессами земной поверхности, или в продуктах их метаморфического, позднейшего изменения. Достаточно привести в качестве примеров лучшие чистые руды железа (Кривой Рог или Бакал на Урале), месторождения галмеев и цинковых руд (на границах Чехословакии, Польши и Германии) и т. д.

5. АССОЦИАЦИЯ И ПАРАГЕНЕЗИС МИНЕРАЛОВ И ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

(Последовательность выпадения, геохимические уровни)

В 1849 г. известный фрейбергский минералог Брейтгаупт писал, что «основной задачей его исследований являлось желание, чтобы успехи горного дела опирались на правильное понимание парагенетических соотношений минералов и чтобы добыча рудников была бы обусловлена не столько удачей какой-либо находки, сколько определенными правилами поисков». В этих словах, сказанных почти 100 лет назад, впервые была сформулирована идея о необходимости положить в основу поисковых работ не чисто опытные данные рудокопов, а теоретическую мысль научного характера. Брейтгаупт именно с этой целью и ввел замечательное понятие *парагенезиса*, которое он определял следующим образом: «Под парагенезисом минералов следует понимать более или менее резко выраженную способность их к совместному нахождению». При этом там, где наблюдается некоторая последовательность выпадения минералов, Брейтгаупт предлагал обращать особое внимание «на относительный возраст тел, так как именно эти соотношения могут научить нас многому». Брейтгаупт считал необходимым для решения этого вопроса организацию совместной работы минералогов, горняков и химиков, причем ставил себе конкретную задачу отыскать те соотношения, при которых преимущественно должны находиться в месторождениях минералы, содержащие полезные металлы.

На основании этих идей и создано постепенно современное учение о парагенезисе минералов, которое в настоящем его виде можно расписать следующим образом.

Если в результате какого-либо определенного геохимического процесса образуется ряд минералов А, В, С, D и т. д., то мы должны в этом ряду различать: 1) вообще всю совокупность минералов — *минеральный комплекс*; таков, например, весь комплекс минералов, который встречается в каком-либо гранитном массиве, начиная с первичных минералов самого гранита, кончая выделениями гранитных пегматитов и тех кварцевых жил, которые его пересекают; 2) *пространственную последовательность*, т. е. пространственные взаимоотношения отдельных минералов, например, Влежит на А, С располагается на D или С замещает и вытесняет В; 3) *хронологическую последовательность* по отдельным геофазам и этапам процесса, например, сначала выпадает А, потом В, позднее С + D; 4) и отсюда как бы ряд этапов или геофаз процесса, как мы говорим, *генераций*; каждая гене-

рация отвечает определенному комплексу типичных для нее минералов и может называться минеральной ассоциацией данной генерации.

Совершенно аналогично минералам мы можем анализировать и парагенезис отдельных элементов в химическом процессе, где мы также можем устанавливать ряд важнейших законов совместного нахождения элементов, их хронологических, пространственных и «генетических» взаимоотношений. Некоторые природные процессы в этом направлении изучены с очень большой детальностью, и как пример мы можем привести два процесса:

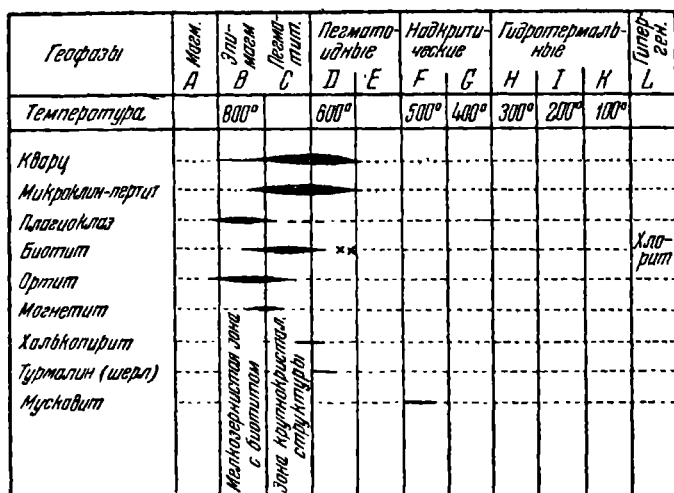


Рис. 4. Геохимическая диаграмма ортитовых пегматитов Верхотурья на Северном Урале (по А. Е. Ферсману, 1932).

Подобная диаграмма характеризует все высокотемпературные пегматиты, непосредственно залегающие в самом гранитном массиве.

1. Процесс кристаллизации гранитных пегматитов. Он описан очень детально в моей монографии, в которой устанавливается, что вообще последовательность выпадения минералов в этом процессе строго закономерна и мало зависит от условий остывания данного гранитного массива или от типа пегматитов; различие в пегматитах будет определяться преобладанием образований той или иной геофазы, т. е. определенной генерацией. В нормальном среднем типе глубинного процесса мы встречаем последовательно осадки всех (или почти всех) генераций и всех геофаз процесса. В других случаях большинство из этих ассоциаций будет выпадать, и пегматитовый процесс будет характеризоваться одной определенной ассоциацией, тем не менее общая закономерность всех взаимоотношений несколько не меняется. Так, например, пегматит Мурзинки на Урале мы можем считать довольно типичным глубинным образованием, в котором мы имеем и раннюю аллитовую фазу и геофазу письменного гранита, за которой следует кристаллизация полевого шпата и кварца, а далее — литиевые образования (литиевые слюды, альбит и т. д.). В противоположность этим ископаемым, в Липовке мы имеем дело не со всей ассоциацией, а лишь с преобладанием более поздних генераций, но с сохранением той же определенной последовательности. И, наконец, если в пегматите имеются только высокотемпературные геофазы (рис. 4), то вместо всей приведенной схемы мурзинского пегматитового процесса мы наблюдаем только начальные геофазы, кончающиеся письменным гранитом, бедные летучими компонентами, с очень малым количеством минералов. Примером последнего типа могут служить топазовые пегматиты Волюны (с. Писаревка).

Парагенезис пегматитовых образований изучен сейчас настолько детально, что позволяет по диаграмме (рис. 5) с достаточной точностью судить о том, что мы можем

встретить на больших глубинах, какие минералы будут встречаться в более центральных частях жилы и что надо искать по залебандам. Если мы поставим себе задачу использовать месторождения розового кварца в тех или иных пегматитах Карелии, то мы должны будем искать его только в центральных осевых частях крупных, богатых кварцем жил. Если перед нами будет поставлена задача отобрать чистые калиевые полевые шпаты, то мы должны будем отбросить все то, что располагается до зоны письменного гранита. Если нужно очистить его от кварца, то следует брать те зоны, которые лежат между письменным гранитом и кварцевой осью. Таким образом, имеется возможность на основании существующих теоретических схем намечать поисковые и разведочные признаки, а также направлять и эксплуатацию в зависимости от постановки самой задачи.

Геофазы	Маяк А	Эпи- мезо- В	Пегматит С	Пегматиты D E	Надкрити- ческие F G	Гидротермальные H I K	Гипер- ген. L
Температура	800°	700°	600°		500°	400° 300° 200°	100°
Биотит			x				
Монацит							
Плагиоклазы							
Ортит						Айцвер	
Микролин-ортоклаз Na-K-Al				x			
Соединения цифрованные	*						
Апатит							
Турмалин							
Калиевая слюда							
Кварц				x			
Берилл							
Топаз							
Альбит							
Лепидолит							
Фосфорит Mn и Fe							
Криолит							
Жидкоберилл							
Сульфиды Fe, Cu, Zn							
Платиноидный шпат							
Цезиолит							

Рис. 5. Сокращенная схема геохимической последовательности типоморфных минералов в гранитных пегматитах.

Применяема для жил относительно простого состава, бедных минералами; заслуживает особого внимания для правильной ориентировки и сравнения с наблюдаемыми в поле пегматитовыми процессами.

2. Последовательность осаждения минералов в ба-
зальтах. В эффузивных базальтовых породах последовательность осаждения изучена значительно хуже, но тем не менее в книге И. Гиббша (Hibbsch, 1934) дается интересная попытка изучения законов последовательности осаждения минералов (в базальтах северной Чехии). Гиббш устанавливает довольно определенную последовательность кристаллизации, причем связывает ее с постепенным повышением содержания воды и переходом от натровых соединений к соединениям кальция. Хотя последовательность осаждения этих минералов значительно менее постоянна, чем это было установлено для глубинных пегматитов, тем не менее Гиббш наметил некоторую характерную величину q , определяющую в общем последовательность кристаллизации; она равняется молекулярному весу воды, деленному на сумму молекулярных весов окислов цеолитов. Если расположить основные цеолиты в фюлолитах согласно этой величине, то мы получим примерно нормальную последовательность их кристаллизации:

Цеофиллит	0,08	Мезолит	0,14
Анальцит	0,09	Гиролит	0,15
Натролит	0,10	Сколецит	0,16

Томсонит	0,16		
Гейландит	0,17	Гмелинит	0,23
Апофиллит	0,20	Жисмонднн	0,26
Левинит	0,21	Хабазит	0,27

Одновременно с кристаллизацией последних минералов идет и кристаллизация кальцита с очень определенной последовательностью изменения его облика: сначала пластинчатый кальцит, потом призматический с сильно развитым базопинакоидом, далее следуют призмы с основным ромбоэдром, плоские и острые ромбоэдры и, наконец, в наиболее холодных частях обычные скаленозэдры.

Часто осложнение в приведенную схему вносится тем, что в большинстве базальтов наблюдается необычная последовательность фаз кристаллизации: первая — глубинная интрателлурическая сменяется второй — вулканической, связанной с быстрым охлаждением и выделением летучих компонентов; повидимому, во вторую фазу образуется твердая кора, благодаря чему температура вновь поднимается, создается как бы вторая фаза, плутонического характера, сопровождающаяся новообразованием в пустотах таких высокотемпературных минералов, как роговая обманка, биотит или нефелин. Только после охлаждения этой третьей геофазы процесса устанавливается нормальный порядок гидротермальной, а потом и гипергенной кристаллизации.

Приведенные закономерности, повидимому, имеют место для деолитов и в других районах и позволяют применить к ним те основные объяснения, которые даны были Гиббом при анализе кристаллизации фonoлитов.

Из вышеприведенных двух примеров мы видим, что последовательность кристаллизации представляет очень важное явление, имеющее огромное поисковое значение, особенно когда последовательность рассматривается не только по отношению к данному участку жилы, а изучается на большом пространстве, во всем ореоле, окружающем тот или иной магматический очаг. В результате углубленного анализа этого вопроса выдвинуто было учение о геoxимических концентpax как первичного, так и вторичного характера, которые детально были описаны мною в томе II «Геохимии» (1931, стр. 159—211), что прекрасно иллюстрируется рядом отдельных диаграмм в этой книге. Не останавливаясь более детально на проблемах этих концентров, я должен только указать, что сами концентры и определяющие их градиенты находятся в зависимости от целого ряда чисто геологических и в особенности тектонических факторов. Общий характер зависит от глубины очагов, скорости охлаждения, величины давления и большей или меньшей легкости выделения летучих компонентов, от наличия повторных выделений, периодичности магматического процесса и т. д. Нет никакого сомнения, что в дальнейшем изучение концентров, на основании исследования петрологии связанных с ними очагов, даст разрешение ряду труднейших вопросов о специфических геохимических чертах отдельных концентров и накоплении в них тех или иных полезных ископаемых.

Для нас является, однако, очень важным, что геохимические концентры состоят из ряда отдельных ассоциаций, расположенных на определенных расстояниях от очага и отвечающих определенному списку минералов. В результате такие ассоциации получают характер как бы некоторых энергетических уровней, для которых характерна определенная величина энергии решетки и которые этим путем объясняют закономерность состава отдельных геофаз процессов охлаждения. Постоянство и определенность этих уровней и закономерность их состава привели к тому, что для отдельных элементов стало возможным говорить о некоторой величине, которая была мною названа *параметром* и которую можно рассматривать как выражение, определяющее место, которое занимает данный элемент в истории эволюции каждого магматического бассейна, и связывающее его с определенным временем кристаллизации. Мною на рис. 6 даются величины эмпирического парагена, составленные на

10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
—	H +1 0,1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	H +1 0,1	He 0
He	Li +1 0,3	Be +2 2,0	B +3 0,3	C +4 1,2 [CO ₂] ⁻² 0,5 C-H 0,5	N 0 [NO ₂] ⁻¹ 0,2 [NO] ⁻³ 0,2	O -2 1,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	O -2 1,5	F -1 0,4	Ne 0
Ne	Na +1 0,5	Mg +2 4,0	Al +3 0,3	Si +4 1,0 [SiO ₂] ⁻⁴ 0,4 [AlO ₂] ⁻³ 0,4	P +5 0,5 [PO ₄] ⁻³ 0,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	S -2 1,3 [SO ₄] ⁻² 0,5	Cl -1 0,3	Ar 0
Ar	K +1 0,35	Ca +2 2,0	Sc +3 4,0	Ti +4 0,3 [TiO ₂] ⁻² 0,2 [TiO ₄] ⁻⁴ 0,4 [TiO ₆] ⁻⁶ 0,6	V +5 0,5 [VO ₄] ⁻³ 0,3 [VO ₂] ⁻² 0,2 [VO ₃] ⁻² 0,2	Cr +3 0,3 [CrO ₄] ⁻² 0,2 [CrO ₂] ⁻² 0,2	Mn +2 3,0 +3 0,3 [MnO ₄] ⁻² 0,2	Fe +2 2,0 +3 0,3 [FeO ₄] ⁻² 0,2	Co +2 3,0 +3 0,3 [CoO ₄] ⁻² 0,2	Ni +2 3,0 +3 0,3 [NiO ₄] ⁻² 0,2	Cu +1 0,1 +2 0,2 [CuO ₄] ⁻² 0,2	Zn +2 2,0	Ga +3 2,0	Ge +4 2,0	As -3 0,3 [AsS ₄] ⁻⁴ 0,4	Se -2 1,0	Br -1 0,2	Hr 0
Kr	Rb +1 0,3	Sr +2 1,5	Y +3 4,0	Zr +4 0,3 [ZrO ₂] ⁻² 0,2 [ZrO ₄] ⁻⁴ 0,4	Nb +5 0,5 [NbO ₄] ⁻³ 0,3 [NbO ₂] ⁻² 0,2	Mo +6 0,6 [MoO ₄] ⁻² 0,2 [MoO ₂] ⁻² 0,2	Md	Ru +3 0,3 [RuO ₄] ⁻² 0,2	Rh +3 0,3 [RhO ₄] ⁻² 0,2	Pd +4 0,4 [PdO ₄] ⁻² 0,2	Ag +1 0,1 +2 0,2 [AgO ₄] ⁻² 0,2	Cd +2 1,8	In +3 0,3 [InO ₄] ⁻² 0,2	Sn +4 0,4 [SnO ₄] ⁻² 0,2	Sb +3 0,3 [SbS ₄] ⁻⁴ 0,4 [SbO ₄] ⁻³ 0,3	Te -2 0,2	J -1 0,1	Xe 0
Xe	Cs +1 0,2	Ba +2 1,2	TR +3 4,0	Hf +4 0,4 [HfO ₂] ⁻² 0,2 [HfO ₄] ⁻⁴ 0,4	Ta +5 0,5 [TaO ₄] ⁻³ 0,3 [TaO ₂] ⁻² 0,2	W +6 0,6 [WO ₄] ⁻² 0,2 [WO ₂] ⁻² 0,2	Re +7 0,7 [ReO ₄] ⁻² 0,2	Os +4 0,4 [OsO ₄] ⁻² 0,2	Ir +4 0,4 [IrO ₄] ⁻² 0,2	Pt +4 0,4 [PtO ₄] ⁻² 0,2	Au +1 0,1 +3 0,3 [AuO ₄] ⁻² 0,2	Hg +1 0,1 +2 0,2 [HgO ₄] ⁻² 0,2	Tl +1 0,1 +3 0,3	Pb +2 1,5 [PbO ₄] ⁻² 0,2	Bi +3 0,3 [BiO ₄] ⁻³ 0,3	Po -2 0,2	N ⁸⁵ ?	Rn 0
Rn	N ⁸⁷ ?	Ra —	Ac —	Th +4 0,4	Pa —	U +4 0,4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Рис. 6. Эмпирический параген. В каждой клетке приведены наиболее обычные в геохимии ионы (простые и сложные) с соответственным знаком и зарядом (валентностью).

Вторые цифры (правее и ниже) дают так называемый параген, т. е. некоторую условную величину, суммируя которую попарно для катиона и аниона, мы получаем параген минерала, т. е. величину, намечающую вероятное положение его в схеме последовательности выделений. (По Ферману, 1937).

основании большого материала произведенных наблюдений. Они построены по 12-балльной системе, от 12 до 0, причем в общем отвечают величинам экз. Как сказано, такой условный параген определяет место соединения в последовательной шкале геохимических процессов кристаллизации. Для определения этого места нужно взять сумму произведений парагена на число свободных активных ионов и разделить на общее число всех ионов, входящих в соединение. Получается с р е д н и й п а р а г е н с о е д и н е н и я, определяющий место и время кристаллизации последнего в геохимической системе.

Цифра 12 относится к самым начальным стадиям высокотемпературной кристаллизации, цифры ниже единицы — к самым последним образованиям из холодных растворов.

При составлении таблицы эмпирического парагена приходилось в основу ее класть не только величины энергетические, но и учитывать обычную концентрацию, т. е. кларки элементов. Как пример можем привести следующие величины парагена минералов:

Алмаз	12,0	Флюорит	0,9
Циркон	4,1	Гипс	0,5
Корунд	4,0	Галит	0,4
Оливин	3,6	Сильвин	0,3
Берилл	3,6	Вода	0,5
Монацит	3,0	Селитра натриевая	0,2
Мусковит	2,8	Свободная серная кислота .	0,35
Кальпит	1,5	Метан	0,1

Приведенные примеры показывают, что грубо ориентировочно в полевой работе можно пользоваться парагеном для того, чтобы судить о вероятном месте данного соединения в общей схеме последовательности природной кристаллизации.

6. СВЯЗЬ ПАРАГЕНЕЗИСА МИНЕРАЛОВ И ЭЛЕМЕНТОВ С ПЕТРОГРАФИЕЙ, ТЕКТОНИКОЙ, ЛИТОГЕНЕЗОМ И ПАЛЕОГЕОГРАФИЕЙ. ГЕОХИМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ, ПРОВИНЦИИ И ПОЯСА

В настоящем разделе мы можем наметить лишь некоторые характерные черты связи минералов и элементов с определенными геологическими процессами.

Нет никакого сомнения, что точный прогноз при поисках полезных ископаемых должен быть основан прежде всего на хорошем знании петрографического состава пород, тектонических особенностей района, его прошлой геологической истории.

Каждое из этих явлений предопределяет тип концентрации химических соединений, и поэтому только глубокий анализ всей геологической картины данного района может помочь геохимику в решении поставленных им задач.

Связь с петрографией

Нет никакого сомнения, что химические элементы в основном связаны с определенными типами кристаллических горных пород. Еще в первых опытах классификации мной и В. М. Гольдшмидтом была намечена схема распределения элементов по отдельным геофазам, исходя из специфических геохимических свойств каждого данного района. В связи с этим все элементы разбиты были В. М. Гольдшмидтом на следующие пять групп:

1. **Сидерофилы**, т. е. элементы, связанные с металлическими выделениями и потому в значительной степени приуроченные к металлическому ядру (или выделениям):

C, Ge, P, As, V, Mo, Fe, Pt, Ru, Rh, (Pd), Os, Ir, Ni, Co.

2. **Халькофилы**, т. е. такие атомы, которые дают преимущественно соединения с серой и ее аналогами (с селеном, теллуром, мышьяком или сурьмой). Для таких халькофилов мы в настоящее время получаем нижеследующий список химических элементов:

Cu, Ag, (Au), Zn, Hg, (Ga), In, Tl, Pb, Sn, Ge, As, Sb, Bi, (O), S, Se, Te, Mo, (Mn), Fe, Ni, Co, Pd, (Ru), (Pt).

3. **Литофилы**, т. е. элементы, связанные преимущественно с кислородом в виде соединений типа окислов и особенно силикатов. Сюда относится большое число элементов:

H, Li, Na, K, Rb, Cs, Be, Mg, Ca, Sr, Ba, (B), Al, (Ga), Sc, J, TR, Si, Ti, Zr — Hf, Th, (P), Nb, Ta, O, (S), W, U, Mn, F, Cl, Br, Y, (Fe), (Ni), (Co).

4. **Атмофилы** — элементы атмосферы, а именно:

H, He, Ne, Ar, Kr, Xe, C, N, Cl, J.

5. **Биофилы** — элементы, строящие органическое вещество (в биосфере) или накапливающиеся под влиянием чисто биохимических реакций. Таковы:

H, (K), Na, (Cu), Ca, Mg, C, N, P, (V), O, S, Cl, J, Mn, Fe.

В этой классификации наиболее сложной группой является группа литофилов, и именно для нее мы имеем довольно интересные взаимоотношения с петрографическим типом пород.

Так, мы можем из нее выделить типичные элементы **протокристаллизации**, т. е. пород ультраосновных магм — дунитов, пироксенитов и аналогичных образований, которые можно разбить на следующие четыре группы:

Ведущие элементы: Mg, Si, Ti, Fe, Ni, Cr.

Главные или характерные элементы: C, O, Na, Al, P, S, (Cl), Ca, V, группа платины.

Второстепенные элементы: H, Se, Co, Cu, Zn, Ge, As, Pb, (Sb), Hg, Tl, Al, Au.

Акцессорные элементы (из соседних геохимических полей): K, Sr, Zr, Nb, Ta, W, Re, (Sn), Mo.

Этот список весьма характерен, особенно если мы нанесем его на развернутую менделеевскую таблицу (см. рис. 12).

С другой стороны, может быть намечен список тех элементов, которые характерны для **гранитных магм** (конечных продуктов дифференциации магматических очагов). И здесь мы можем наметить следующие характерные элементы:

Ведущие: H, Li, Be, O, Na, Al, K, Rb, Cs, TR.

Главные элементы: B, F, Si, P.

Нормальные элементы: H, Cl, Ca, Ti, Mn, Ga, Ge, V, Nb, Mo, J, Hf, Ta, W, Re, Au, Tl, Pb, Bi, Th, U, Rn, вероятны № 85 и № 87.

Случайные элементы: N, Mg, S, V, Cr, Fe, Cu, Zn, Sn, Sb, Ba, Te.

Запрещенные элементы: N, V, Co, Ni, As, Se, Br, Kr, Ru, Rh, Pd, Ag, Cd, In, Os, Ir, Pt, Hg, Xe.

Под наименованием запрещенных элементов мы перечисляем такого рода типы атомов, которые мало вероятны в нормальных геохимических процессах данного типа и только в исключительных случаях могут быть встречены в данной породе.

Такие запрещенные элементы могут быть установлены и для прото-кристаллизации (например, литий, рубидий, цезий, бериллий и др.).

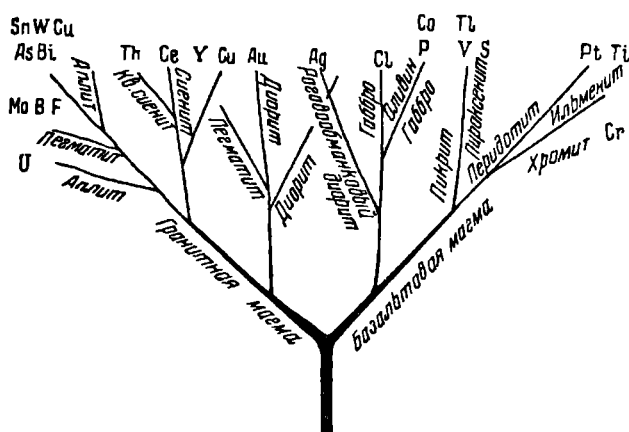


Рис. 7. Диаграмма вероятного распределения элементов в дериватах разных магм и горных пород (по Расталлю).

Что касается халькофилов, то и для них мы можем привести такую же классификацию, как и для приведенных выше пород:

Ведущие элементы: S, Fe, Cu, Zn, As, Se, Ag, Sn, Sb, Pb.

Главные элементы: Co, Ni, Mo, Cd, Te, W, Au, Hg, Bi.

Нормальные элементы: Si, P, Mn, C.

Малоизученные элементы: Ga, Ge, платиновая группа (особенно Pd), In, Re, Tl, Ma.

Акцессорные элементы (из соседних полей): K, Li, Be, Cl, Ba, B, Al, (Mg).

Поскольку дифференциация горных пород представляет очень важный процесс разобщения отдельных химических элементов, нет никакого сомнения, что именно с этим процессом связаны (в широком его толковании) самые главные процессы накопления и рассеяния химических веществ. Приведенный выше список элементов двух крайних точек магматических кристаллизационных процессов показывает особо резкое различие в их минерализации, причем в настоящее время эта связь элементов с отдельными типами выяснена настолько детально, что может быть схематически изображена в виде дерева как это было намечено американскими исследователями и передано с некоторыми дополнениями и исправлениями на рис. 7 и 8.

Мы не входим в более детальный анализ самого этого явления, имеющего исключительное значение как поисковый признак, но мы можем высказать одно положение, с которым геохимику необходимо считаться в районе кристаллических пород: тип горной породы

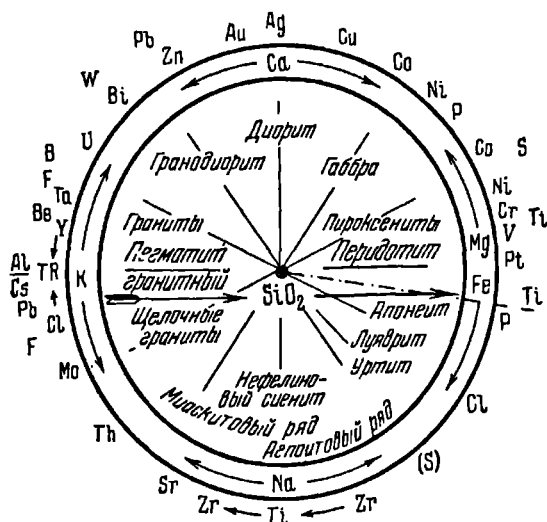


Рис. 9. Геохимическая диаграмма соотношений пород и типичных для них химических элементов.

Схема в основном построена на поляности гранита и перотита, с чем связано различие в геохимической истории Fe и Mg , с одной стороны, и Na и K , с другой. Стрелки в большом круге направлены в сторону уменьшения данного элемента. Пунктирный радиус устанавливает границу между ультраосновными (т. е. щелочноземельными) и щелочными магмами. Диаграмма удобна для запоминания геохимических соотношений.

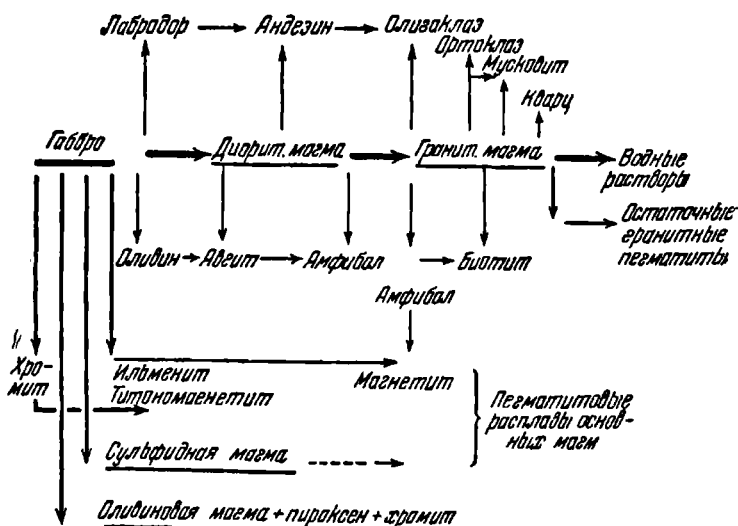


Рис. 10. Схема дифференциации габброидной магмы и выделения из нее отдельных минералов остаточных расплавов (по В. М. Гольдшмидту).

их дериватов. В основе правила Розенбуша лежала правильная мысль, что последовательность кристаллизации следует падению валентности и переходу от активно поляризующих ионов малых размеров к ионам сферическим (без поляризации), больших объемов и малых экв, а также к образованию решеток с комплексными анионами. Теория Боуэна в значительной степени углубила эти представления.

Связь с тектоникой

Мы не будем долго останавливаться на очень сложной и вместе с тем очень важной связи скоплений полезных ископаемых с тектоническими процессами. Тектоника в значительной степени предопределяет ход геохимических явлений. Тип тектонических процессов, глубина и характер разломов, специфическая роль дизъюнктивной или пликативной дислокации (в особенности в районах с боковым давлением и шарижами), — все это налагает свои черты на миграцию химических элементов и требует специального анализа.

В томе V «Геохимии»¹ намечено дать развернутую картину этих соотношений на примере отдельных районов Союза, а пока мы отметим лишь следующие эмпирические правила.

Районы глубинных дизъюнктивных дислокаций обычно сопровождаются подъемом из глубин или магм, или их горячих дериватов и выносом и накоплением элементов жильных образований (в частности халькофилов). Наиболее богаты регионально-складчатые области.

Районы местных тектонических образований и пликативных типов орогенеза более типичны для перемещения элементов внутри самих осадочных свит, накопления солей, угля и т. д.

Районы геосинклиналей характеризуются накоплением химических осадков в разных частях морского бассейна, начиная с образований береговой линии и кончая глубинными осадками (карбонатов или частью фосфатов).

Районы шарижей обычно не приносят с собой новых элементов из глубин, а характеризуются жилами альпийского типа.

Чем сложнее тектоническая история какого-либо района, тем значительнее процессы миграции и тем интенсивнее и вероятнее возможность образования крупных минеральных скоплений (см. также гл. V).

Связь с литогенезом и палеогеографией

Уже предыдущее изложение нам показало, что очень серьезные вопросы связаны с процессами, протекающими в осадочных свитах, начиная с их первичного накопления, диагенеза, перегруппировки в процессах катагенеза и кончая выветриванием под влиянием гипергенных факторов.

Мы коснемся этого вопроса более детально в гл. IV при анализе возможных и вероятных полезных ископаемых в отдельных типах осадочных свит, но должны сказать, что руководящими идеями при поисках в породах осадочных является детальное изучение условий их образования, фациального изменения пород в горизонтальном направлении и выяснение тех специфических черт палеогеографии, которые положили начало их скоплению.

¹ Том V «Геохимии» не был закончен автором. — *Ред.*

В настоящее время палеогеографический анализ не ограничивается реконструкцией распределения суши и моря в определенные геологические эпохи, он стремится установить общий характер климатического режима прошлого, подсказывает распределение физико-химических факторов в морских бассейнах на разных глубинах и этим путем даст наведения для геохимика, углубленно работающего в районе осадочных свит.

Установление геохимических систем

В земной коре можно установить определенные геохимические системы, т. е. такого рода природные соотношения элементов, которые вызываются основными генетическими циклами земной коры или климатическим режимом определенных широтных зон.

Мы можем различать следующие основные типы геохимической системы:

1. **Щ и т ы - п л а т ф о р м ы** — более или менее устойчивый тип. Здесь господствуют образования магматических выделений; даже среди отдельных типов пегматитов мы встречаем преимущественно их наиболее высокотемпературные корни.

2. **П о я с а**. К щитам непосредственно примыкают, их облекают или окружают орогенические пояса, образующиеся из ослабевших геосинклиналей между соседними более устойчивыми щитами.

Самые крупные процессы образования жильных руд связаны с этими поясами, распределение которых в нашем Союзе подсказывает те направления, в которых должны идти поиски наиболее важных рудных элементов.

3. **Г е о х и м и ч е с к и е п о л я**. Этим термином мы обозначаем геохимически однородные области, связанные с пространственно большими скоплениями каких-либо ассоциирующих элементов, по преимуществу с определенными свитами осадочных пород, и представленные сериями химических осадков. Последовательность этих осадков гораздо более закономерна, чем мы это думали раньше, и, следовательно, весьма закономерной является и последовательность связанных с ними полезных ископаемых. Последние в значительной степени зависят от условий жизни водного бассейна, его углубления с постепенным переходом от прибрежных образований к осадкам глубинным или, наоборот, его обмеления с превращением в мелководный бассейн, образованием отдельных лиманов, озер и т. д.

Геохимические особенности таких полей подсказывают распределение полезных ископаемых в зависимости от их геологической истории.

4. **Г е о х и м и ч е с к и е у з л ы**. Геохимическими узлами мы называем такого рода районы, которые испытали повторные наложения многих геохимических циклов, благодаря чему в них миграция химических элементов носила особо интенсивный характер. Для них особенно характерны обильный минерогенез и явления омоложения процессов, т. е. перекрытие низкотемпературных образований высокотемпературными, с чем связаны нередко специфические, мало обычные скопления полезных ископаемых.

Понятие о геохимических узлах приобретает сейчас большое теоретическое и практическое значение и ведет с промышленной точки зрения к тому, что называют геохимическими центрами сырья.

5. **Г е о х и м и ч е с к и е п р о в и н ц и и и г е о х и м и ч е с к и е а с с о ц и а ц и и**. Геохимические провинции характеризуются определенными типами свойственных им элементов и находятся в зависимости от геологического и тектонического районирования страны. Совокупность химических элементов, встречающихся в таких геологически обособленных областях земной коры, можно назвать естественной

геохимической ассоциацией. Сравнение таких естественных ассоциаций с типическими составляет одну из задач геохимического исследования отдельных районов.

Этим понятием о геохимических провинциях мы считаем правильным заменить старые представления о петрогенических, металлогенических провинциях, так как новый термин более широко объединяет определенные ассоциации химических элементов.

7. ПЕРИОДИЧЕСКИЕ МИНЕРАЛЫ, МИНЕРАЛЫ-ХРОПОКСЕНЫ

Связь геохимических образований с определенными стратиграфическими горизонтами или геохимическими эпохами уже давно намечена и притом в нескольких направлениях. С одной стороны, де Лоне, Ниггли, Эммонс и др. выдвинули идею металлогенических эпох, расширенную позднее советскими исследователями до элементо-генетических или вернее геохимических, и суммировали огромный материал произведенных наблюдений, отметив хронологию наиболее резких выступлений определенных групп элементов в отдельные моменты истории геологии и магматических процессов.

С другой, в области осадочных и гипергенных образований наметились аналогичные эпохи концентрации определенных элементов (А. Д. Архангельский, Я. В. Самойлов, Л. В. Пустовалов), которые равным образом установили определенные эпохи (например, для стронция, бария, алюминия), связали их с циклами эрозии, а последние подчинили тектоническим движениям и магматическим процессам.

К этому же циклу относятся идеи о периодических минералах, возникающих в связи с годовым или суточным ходом метеорологического режима; таковы — гидрогалит, выцветы весной различных солей, особенно галита и мирабилита в условиях пустынного климата, периодические осадки мирабилита в заливе Кара-Богаз-Гол, образования леонгардита летом на обращенных к солнцу склонах крымских лакколитов и т. д. (Б. К. Поленов, П. Л. Драверт, А. Е. Ферсман).

Эти идеи связывают устойчивое состояние минерала лишь с определенными термодинамическими условиями времени года или даже дня и утверждают необходимость его изменения или растворения при изменении этих условий (температуры, влажности). Этот тип процессов связывает сохранение минерала с определенными отрезками геологического времени и как поисковый признак имеет значение для нагорных областей, с одной стороны, и тропических, пустынных, с другой.

Если сравнить списки минеральных видов¹ и характерных элементов по отдельным отложениям геологических эпох, то мы должны будем убедиться в довольно резком различии минерализации, начиная с архейских пород и кончая послетретичными и современными. Мы можем наметить ряд эмпирических фактов, которые помогут нам далее и теоретически разобратся в этом явлении.

Характерно отсутствие как натриевой, так и калиевой селитры в отложениях раньше верхнего мела, солей калия — раньше конца палеозоя², соды и мирабилита — раньше нижнетретичных отложений; для галита

¹ Речь идет, конечно, лишь об анализе соединений, синхронных с тем осадком или магматической породой, в которых они встречаются.

² См. R. L. Rutherford. Geological ages of K-deposits. Bull. Geol. Soc. Am., 1936, XLVII, № 8 (два типичных максимума — верхний палеозой и третичная эпоха).

мы имеем нижний предел — верхний кембрий, для соединений иода — только современные отложения или верхнетретичные. Характерно, что соли бора отсутствуют в рассеянном виде ниже пехштейна, а в концентрированных месторождениях встречаются не ниже олигоцена. Любопытно, что скопления стронция и бария известны лишь начиная с перми, соединения фосфора приурочены к очень многим осадочным отложениям, но не ниже кембрия. Соединения углерода в виде углей и битумов известны лишь с верхнего архея, причем академиком П. И. Степановым намечается ряд совершенно определенных эпох угленакопления, только начиная с девона. Крупные месторождения мусковита нам известны лишь в докембрийских (или эопалеозойских) метаморфических сланцах.

Очень интересно сравнение относительной роли некоторых групп элементов: в углекислых осадках магний определенно во времени постепенно сменяется кальцием, который в меловых и третичных породах играет все большую и большую роль¹; увеличиваются роль и скопления калия и бора (по сравнению с натрием).

Наиболее богатые первичные скопления золота связаны с археем или эопалеозоем. Вместе с тем целый ряд минеральных видов оказывается связанным лишь с временной гипергенной обстановкой и исчезает, когда те или иные терригенные или морские осадки покрываются новообразованиями и входят в нормальные свиты осадочных пород. Таковы, например, многочисленные минералы железных шпатов, особенно оксигалоидные соединения меди и свинца, роданистые соединения, возгоны типа нашатыря, азотнокислые соли щелочей, кальция и бария, сульфаты железа, самородная сера и т. д. Все эти образования исчезают, превращаются в новые минеральные виды и, таким образом, не сохраняются во времени; их можно было бы, по существу, называть хроноксенами — враждебными времени.

Таковыми же хроноксенами являются другие элементы, скопления которых оказываются во времени неустойчивыми и максимальные концентрации которых приурочены к более поздним или современным процессам.

Таковы: калий, рубидий, цезий, стронций, барий, частично ртуть, бор, углерод, азот, мышьяк, сурьма, а также хлор, бром, иод и некоторые другие.

Каковы же возможные объяснения этих несомненных фактов, связывающих минералогию и геохимию с геологическим временем? Мы можем наметить несколько основных причин, а именно:

1. Развитие органической жизни и связанное с ней изменение в миграции ряда элементов (углерод, азот, кислород, может быть, ванадий, стронций и др.).

2. Постепенный ход радиоактивного распада одних элементов с накоплением других: накопление свинца, гелия и уменьшение содержания урана, тория (частично калия, рубидия). Как общее правило накопление гелия в наиболее древних свитах (*ceteris paribus*²) и увеличение содержания урана и тория в конечных геофазах дифференциации каждого магматического бассейна (Седергольм).

3. Разрушение и размыв верхов и дистальных (отдаленных от очага) частей терм пневматолитов, пегматитов, что для более древних геологических эпох ведет к дисперсии в гипергенной зоне мышьяка, сурьмы,

¹ Этот интересный вопрос был поднят Штейдманом (E. Steidmann, Econ. Geol., 1911, XIX, 333—345 и 392—428). Объяснение ему может быть дано двоякое: с одной стороны, древние карбонатные отложения подверглись в течение долгого геологического времени замещению более устойчивым ионом магния; с другой, по мнению автора, сейчас реки несут в своих водах больше кальция, чем магния, так как последний уже нашел себе более прочные соединения.

² При прочих равных условиях.— *Ред.*

ртути, с одной стороны, лития, цезия, рубидия, фтора, с другой (в пегматитах). Характерное сохранение лишь корней термальных процессов ведет к специфическому обеднению архейских и частично догерцинских палеозойских свит элементами и минералами более холодных геофаз.

4. Однако основным фактором, определяющим существование хроноксенных минералов, является определенный геохимический процесс дифференциации химических элементов с постепенным накоплением наиболее устойчивых, наименее подвижных систем, с замещением в более древних отложениях, с выносом более растворимых соединений, и т. д. Длительные процессы, идущие в земной коре, ведут благодаря этому одновременно к выносу на поверхность и к частичному накоплению на земной поверхности наиболее подвижных, растворимых, дисперсных элементов, ионов, комплексов и минеральных сочетаний. Эта постоянно идущая дифференциация вещества в земной коре получает свое точное выражение, особенно если мы рассмотрим ее с точки зрения энергетики природных процессов.

Устойчивость кристаллических решеток в схеме выражается величиной ее энергии и, в частности, величиной энергии входящих в нее ионов. Сами эки и вэки, являясь тем паем, который вносится ионом при вхождении его в кристаллическую решетку, определяют собой подвижность иона в геохимических условиях, его относительную растворимость, механическую прочность и т. д. Не отгачая точно отдельным перечисленным свойствам, эки в схеме намечают общую суммарную стойкость данного соединения, т. е. как раз являются очень удобным геохимическим параметром, позволяющим в общих чертах грубо количественно сравнивать между собой геохимическую стойкость как самих решеток, так и входящих в них ионов.

Приведем для примера три ряда:

	Mg	Ca	Sr	Ba	Cl	Br	J	S	Se	Te
вэки:	1,05	0,87	0,76	0,67	0,25	0,22	0,18	0,57	0,55	0,47

В этих рядах энергетически более сильные ионы (левые) будут вытеснять правые: магний должен накапливаться в течение долгих процессов метаморфизма за счет кальция и его соседей; наоборот, бром и иод должны максимально вымываться и, переходя в растворы, собираться на поверхности земли. Чисто теоретически мы можем наметить список тех ионов, которые в нашем смысле будут хроноксенами и которые будут собираться в гипергенной обстановке и накапливаться в наиболее молодых (третьих и четвертичных) отложениях. Для этого мы приведем лишь список ионов с наименьшими вэками (энергией иона в решетке на одну валентность по расчету на 1 моль):

Cs	Rb	K	NH ₄	TP ¹	[JO ₃]	J	[NO ₃]	Br	SH	CN	Cl	[SO ₄]
0,30	0,33	0,36	0,37	0,42	0,14	0,19	0,18	0,22	0,23	0,25	0,25	0,34

Энергия решеток этих соединений (на 1 моль и на 1 ион) колеблется между 56 и 100 ккал., тогда как U такого, например, устойчивого минерала, как оловянный камень, по тому же расчету на 1 ион равна 940 (=2820 ккал). Все соединения малых энергий решеток в ходе геологической истории должны по законам термодинамики замещаться соединениями наивысших величин U , вытесняя слабые энергетически ионы в растворы или расплавы.

¹ Сильно поляризующий ион — будет легко поглощаться почвами.

Но наравне с абсолютными величинами энергии играют роль в образовании стойких или подвижных соединений и типы кристаллических решеток.

Действительно, ионы высоких валентностей (выше 4) обладают очень малым радиусом, сильной активной поляризацией, что ведет к образованию решеток с замкнутыми молекулами, решеток атомных или сложных, повышенной поляризации с возникновением внутри решеток отдельных комплексов — островов (в смысле Вейсенберга); это приводит к увеличению летучести, к образованию подвижных и, особенно часто, газовых систем ($TiCl_4$, NbF_5 , особенно BF_3 и т. д.) и летучих соединений тяжелых металлов (меди, сурьмы, вольфрама и т. д.).

Таким образом, относительной геохимической подвижностью отличаются в первую очередь ионы низких валентностей (преимущественно 1 и 2), низких валов и больших радиусов; во вторую — ионы очень высоких валентностей (выше 4), высоких валов и малых радиусов. Только средние величины, и особенно с четными валентностями 2 и 4, определяют собой поле наиболее устойчивых, наименее подвижных кристаллических систем (типы накопления в россыпях и шлихах).

Указанные выше соображения могут быть полностью расшифрованы применительно к поискам некоторых полезных ископаемых: такие соли как селитры, сода, мирабилит, мы можем искать или в современных отложениях или в самых молодых, не глубже третичных.

То же относится к большим концентрациям солей борной кислоты, к скоплениям цезия и рубидия. Месторождения углерода, соединений фосфора и фтора, солей калия, брома, иода, бора практически мало вероятны в докембрийских отложениях. Соединения теллура преобладают в молодых образованиях (см. стр. 709) — киммерийских и альпийских, что, например, характерно для части Монголо-Охотского и Верхоянского поясов (но не исключено и в древних). Преобладание доломитов над чистыми известняками характерно для древних архейских щитов и создает для последних ряд технических трудностей (отсутствие сырья для извести). Для сингенетических месторождений серы мы не можем идти ниже верхнего мела, хотя это не исключает возможности образования в более позднее время скоплений серы в гипсах древних отложений.

Приведенные примеры показывают, что целый ряд минералов и элементов в своих больших скоплениях связан лишь с гипергенной геозоной, что вызывает необходимость в особенно углубленном ее изучении геологами, геохимиками, минералогами и почвоведом. Несомненно, что только путем сочетания методов геохимического анализа и углубленной геологической съемки можно будет успешно разрешить задачу поисков таких соединений — хроноксенов.

Но наравне с хроноксенами мы можем установить ряд минералов — хронофилов, которые постепенно накапливаются при процессах длительного разрушения. Эти минералы тоже связаны преимущественно с поверхностной геозоной, особенно в новейших россыпях (например, циркон, монацит, касситерит).

Геохимические эпохи

Приведенные выше соображения относятся не только к осадочным породам, но и к магматическим и метаморфическим, что привело к установлению понятия о геохимических эпохах.

Очень хорошо описывает общий характер геохимических эпох В. А. Обручев в своей «Полевой геологии» (1932, т. II, стр. 186—187):

«Скопления полезных ископаемых, имеющие практическое значение, образовывались в течение всех минувших эпох жизни Земли, образуются и настоящее время. Но в связи с характером господствовавших в ту или иную эпоху геологических процессов состав этих скоплений, т. е. род полезных ископаемых, изменялся весьма существенно. Эпохи орогенезиса, т. е. тектонических нарушений земной коры, всегда связанных в большей или меньшей степени с интрузиями и эффузиями изверженных пород, которые являются первоисточником различных металлических соединений, выносимых ими из недр Земли, представляли эпохи усиленного образования рудных месторождений глубинного генезиса — магматических, эманационных и гидротермальных. Эпохи тектонического покоя, которые считают более продолжительными, чем эпохи орогенезиса, характеризуются процессами эрозии и денудации форм земной поверхности, созданных горообразовательными силами. Благодаря этим процессам обнажались и разрушались рудные месторождения, находившиеся ранее на большей или меньшей глубине от земной поверхности, и из их материала создавались рудные месторождения вторичные, поверхностного генезиса — осадочные и выветривания. В те же эпохи тектонического покоя, к которым приурочивают и медленные колебательные движения земной коры, так называемые эпейрогенетические, благодаря которым происходили перемещения границ морей, образование и исчезновение озер, в связи с этим имело место также образование месторождений ископаемого угля, нефти, фосфоритов, каолина, разных солей, вообще большинства так называемых нерудных месторождений, накопление которых требует известного постоянства условий в течение более продолжительного времени. Установленные в науке геологические периоды обнимают каждый как эпохи орогенеза, так и эпохи покоя, но в различном соотношении; одни характеризуются преобладанием первых, другие — преобладанием вторых. Интенсивность процессов, создававших рудные и нерудные месторождения, также колебалась не только в различные эпохи, но и в различных местностях Земли, почему и результаты их были очень различны. Например, хотя уголь мог образовываться во все эпохи с тех пор, как появилась «наземная растительность», т. е. начиная с девона, но особенным развитием месторождений угля отличаются эпохи периодов каменноугольного, юрского и третичного, тогда как в других периодах они образовывались только кое-где в виде исключения, например, в пермский период в Китае, в меловой на Сахалине. Месторождения соли главным образом подчинены пермским, отчасти и третичным отложениям, нефть приурочена особенно часто к последним.

В связи с эпохами орогенезиса различают главные металлогенетические эпохи докембрийские (две или три), каледонскую (конца силура), герцинскую (верхнепалеозойскую), которую также нужно расчленить на 2 или 3 (послесреднедевонскую, среднекаменноугольную и верхнепермскую), и альпийскую, также обнимающую несколько эпох или субэпох.

Главнейшая литература

- Я. В. Самойлов. Paläophysiologie [Палеофизиология]. Monatsberichte Geol. Ges., 1922, 227.
 С. С. Смирнов. Зона окисления сульфидных месторождений. ОНТИ, 1936.
 F. Blondel. La géologie et les mines des vieilles plateformes. Paris, 1936, 150—271.
 J. Hibbsch. Die Mineralien des Böhmischen Mittelgebirges. Jena, 1934.
 P. Niggli. Ore deposits of magmatic origin. London, 1929.

Глава III

ОБЩАЯ ГЕОХИМИЧЕСКАЯ МЕТОДИКА

1. ВВЕДЕНИЕ

Настоящая глава посвящена тем исследовательским методам, которые выдвинуты геохимической наукой за последнее время и которые пытаются обосновать новые пути поисковой и разведочной работы. Нередко встречаются указания на то, что геохимической методики нет, что геохимия в своей работе пользуется различными методами других дисциплин и что в этом смысле геохимическая методика есть лишь взаимное согласование других методов. Однако постепенное развитие геохимической науки за последние 20 лет показало, что геохимия постепенно вырабатывает и ряд своих собственных методологических подходов, конечно, в первую очередь пользуясь обычными методами физического и химического анализа. Многие из этих методов уже влились в научную практику и обещают еще гораздо глубже подойти к решению поставленных нами задач. Мы ограничиваемся в настоящей главе лишь пятью основными методическими приемами, развитие которых как раз обещает и теоретику и практику ряд ценных методов. Все они связаны с теми общими задачами геохимического исследования, которые были выдвинуты за последние годы и которые имеют всего в конечном результате дать геохимический и минералогический анализ определенной территории.

По существу всякая геохимическая методика комплексна; она имеет целью не установление каких-либо отдельных, разрозненных фактов, а установление связи между этими фактами; пользуясь поэтому отдельными наблюдениями и фактическим материалом, она устанавливает те взаимоотношения, которые существуют прежде всего между распределением, миграцией и сочетанием химических элементов между собой.

Отсюда вытекает и характер тех пяти главнейших чисто геохимических методов, о которых будет преимущественно идти речь в настоящей главе:

1. Первый метод — применение менделеевской таблицы. Исходя из списка и характера распространения всех наблюдаемых в районе химических элементов, устанавливается связь этого списка с менделеевской таблицей, что подсказывает возможность отыскания новых элементов и вместе с тем выявляет те закономерности в сочетании атомов, которые вытекают из особенностей менделеевской таблицы.

2. Вторым методом является составление геохимических диаграмм и их анализ. Эти диаграммы наглядно вскрывают взаимоотношения между отдельными минералами или элементами, время их образования, взаимное их расположение (накопление) в пространстве и во времени.

Геохимическая диаграмма в общем должна быть признана важнейшим методом для анализа самого природного процесса и выяснения генезиса месторождения.

3. К следующему методу геохимической работы мы относим геохимическое картирование, т. е. установление пространственного распределения как на поверхности, так и в глубинах отдельных химических элементов (или минералов) и проведение изолиний их содержания.

4. Четвертый метод связан с определением специфических кларков данного элемента в исследуемом месторождении. Установление кларков концентрации является первой попыткой количественного анализа геохимических процессов.

5. Наконец, пятой задачей является географо-экономический анализ изучаемого геохимического объекта и установление связи между геохимическими данными, географическим распределением и технико-экономическими показателями полезного ископаемого данного района (или месторождения).

Как видно из приведенной краткой характеристики главнейших геохимических методов, осуществление их требует знания тех основных минералогических, геологических и геохимических показателей, о которых мы говорили в главе II.

К этим пяти методам присоединяется еще ряд других, более частных методик (геотектонической, литологической и петрографической). Необходимо, однако, иметь в виду, что как в поисковой, так и в разведочной работе единственно правильным надо считать одновременное использование нескольких методов, взаимную проверку и согласование их результатов и наведений. Так, особенно полезно сочетание геофизических и чисто геохимических методов исследования, одновременное применение к анализу природного явления как методики менделеевской таблицы, так и геохимических диаграмм и т. д.

2. ОБЩИЕ ЗАДАЧИ ГЕОХИМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ПОЛЕ

Старое проспекторство, успех которого нередко основывался лишь на большом практическом опыте и интуиции, сейчас сменяется глубоким научным анализом всех минералогических и геохимических признаков и их сочетаний.

В настоящей главе я попытаюсь дать краткое изложение нескольких примеров из известной мне поисковой практики, чтобы показать, как разнообразно складывается поисковая работа в разных условиях земной коры. Но предварительно необходимо еще раз привлечь внимание к основному правилу, которым геохимик должен руководствоваться нсюду, где бы ни велись поиски и при помощи которого легче и скорее всего можно найти то, что ищешь: искать нужно в данном районе прежде всего то, что при данном сочетании геологических, физико-химических и геохимических факторов **м о ж е т и л и д о л ж н о** здесь находиться.

Поэтому практика последних лет и выдвинула вместо попутных работ, как побочной задачи при геологическом картировании какой-нибудь территории, организацию специальных отрядов поискового характера и необходимость направленности работы на поиски строго определенных минералов или химических элементов. При этом, как показала практика, нахождение какого-либо соединения стимулируется не только целеустремленностью поисков, но и уверенностью исследователя в существовании того или иного вещества в данных условиях. Опыт хибинских работ (1920—1937) показал, что достаточно открыть какой-либо новый минерал в одном из районов тундры и показать его другим работникам, чтобы они его нашли и в целом ряде других районов. Успешные поиски всегда связаны с активностью самого исследователя и его убеждением в том, что в данных условиях, в данной геологической обстановке такое-то полезное ископаемое должно быть и не может не быть найденным.

Всякий иной подход — без веры в успех своей работы, не приводит обычно ни к каким результатам.

Поисковая работа всегда связана с геохимической интуицией, особенно необходимой в тех районах, где недра земной коры скрыты и не позволяют сразу обнаружить наличие тех или иных минеральных скоплений. Таковы,

например, условия полярных областей, где поверхности горных пород покрыты обычно лишаями и мхами и где по едва только заметным признакам можно скорее догадываться, чем непосредственно подмечать глазом, какая порода или какой минерал находится под лишайником.

Столь же трудна работа в субтропиках и песчаных пустынях, где мы имеем дело с огромными областями механического разрушения, с накоплением лёсса, галечных плащей, толщ конгломератов или грандиозных осыпей.

В обоих случаях геохимический прогноз и анализ геохимических возможностей играют при поисках ведущую роль.

Поиски никеля на Урале. Как должен себя вести поисковик при поисках на Южном Урале месторождений никеля? Прежде всего он должен чисто теоретически (по литературе) проанализировать те условия, в которых никель встречается в земной коре, изучить геохимические процессы, его ведущие в тех или других местах концентрации и, таким образом, полностью освоить поведение данного химического элемента в разнообразных условиях земной коры.

Приступив к самим поискам на Южном Урале, он прежде всего будет искать те условия, которые в других местах характерны для накопления никеля, т. е. в первую очередь районы основных и ультраосновных пород; но в них ему придется обращать особое внимание или на специфические сульфидные месторождения, о которых он будет судить по бурным натекам при окислении, или же на кору выветривания с присущей ей вторичной концентрацией никеля и железа.

Поэтому полевые работы всегда надо начинать с нанесения на карту каждой мельчайшей находки никелевых соединений, ибо, как бы ни были малы эти находки, но в сочетании с другими они могут подсказать по карте те участки, в которых можно рассчитывать встретить более крупные (промышленные в иных случаях) месторождения.

Поиски апатита в Хибинских тундрах. Значение таких мельчайших, как говорят, «минералогических», находок особенно наглядно сказалось в наших геохимических исследованиях на Кольском п-ове. Начиная с экспедиции 1920 г., мы установили желтый (золотистый) значок на наших картах для каждой находки апатита и отмечали этим значком не только крупные месторождения, но даже и отдельные обломки породы в осыпях. Уже в конце 1923 г. мы стали убеждаться в том, что большинство желтых точек на карте может быть соединено в сплошную дугу. В это время и для других минералов Хибин было уже установлено дуговое расположение их месторождений, и понятно, что идея распределения и апатита по дугам сделалась конкретным методом дальнейших поисков.

Установление Монголо-Охотского пояса. После геохимической экспедиции 1916 г. в Забайкалье мною был намечен пояс, названный Монголо-Охотским, в котором в известном закономерном порядке следовали месторождения металлов.

Статья, посвященная установлению этой геохимической провинции, протягивающейся на пространстве нескольких тысяч километров, вызвала критику со стороны некоторых исследователей, выступивших против этого пояса как геологического понятия и указавших, что граниты, с которыми я связывал эти месторождения, хронологически весьма разного возраста. Тем не менее на основании этой гипотезы стали вестись поисковые работы, которые в течение уже первого десятилетия полностью подтверждали наличие здесь совершенно закономерного геохимического пояса (рис. 14) и привели к открытию ряда ценных месторождений. Любопытно, что хотя обсуждение этой гипотезы в 1936—1938 гг. и заставило коренным образом пересмотреть некоторые связанные с ней представления, тем не менее это геохимическое понятие осталось в силе, особенно после того как было установлено единство этого пояса и в основном киммерийский возраст тех гранитов, с которыми связано главное оруденение и его общая минерализация.

Пегматиты Забайкалья. Благоприятные результаты приведенного выше опыта установления определенного геохимического пояса побудили в дальнейшем применить его к анализу и отдельных месторождений. В том же Забайкалье в 1926—1928 гг., после осмотра месторождений пегматитов, флюоритовых жил и вольфрамитовых пневматолитов, мы попытались идею пространственной закономерности распределения металлов во всем Забайкалье перенести на анализ геохимической последовательности процессов в отдельных месторождениях. На рудниках мы довольно безошибочно, на основе намеченной нами схемы, только по образцам музеев, могли делать заключение о свойствах отдельных жил и вероятности их изменения с глубиной.

шим ошибкам и даже роковым результатам при организации промышленного предпринятия.

Так, подойдя к какому-либо выходу мрамора, необходимо прежде всего правильно определить его генезис. Если мрамор носит контактный характер, то надо начать поиски с отыскания самого контакта с изверженной породой — с гранитом, что приведет к открытию одних минералов и одних полезных ископаемых, или с породами основными, что заставит искать совершенно иной комплекс химических соединений. Если образование данного мрамора связано не с контактным воздействием магмы, а с перекристаллизацией известняков под влиянием динамометаморфических причин, то весь комплекс связанных с ним минералов и полезных ископаемых будет совершенно иным.

Поэтому мы призываем геохимиков при полевых исследованиях с исключительным вниманием относиться к проблеме генезиса. Открыв какое-либо новое месторождение или изучая рудник и копь, поисковик-геохимик должен прежде всего ставить перед собой вопрос, как могло образоваться данное месторождение, каковы те физико-химические (геологические) условия, которые могли привести к накоплению данного минерального тела, каков характер тех наиболее вероятных химических реакций, которые могли положить начало образованию данного соединения?

Вопрос этот далеко не столь прост. Он сводится к восстановлению, на основе наблюдений и фактов, тех процессов, которые некогда имели место в данной геологической обстановке. Он требует одновременного восстановления как всей геологической истории, так и прошлого геохимических процессов. Успешное и правильное решение генезиса облегчается опытом поисковика, его наблюдательностью, его знанием данного типа месторождений и умением пользоваться сравнительным анализом. Хороший поисковик должен много видеть. От него требуется, чтобы он практически работал в разных месторождениях, но он должен заострить свой глаз на большом количестве уже изученных месторождений.

Правильное определение генезиса требует разрешения нижеследующих частных задач:

А.

1. Выяснение геологической обстановки на основе детальной геологической карты.
2. Изучение тектоники и отдельных периодов усиленного тектогенеза и изучение связи тектоники с характером и накоплением осадков в одних случаях и заполнением рудных жил в других.
3. Установление возрастных соотношений между вмещающими породами, тектоническими явлениями и минералообразовательными процессами.
4. Петрографический и петрологический анализ пород и их соотношений в месторождении.
5. Для месторождений, связанных с осадочными свитами, необходим, кроме того, детальный анализ палеогеографического прошлого и восстановление тех условий, при которых шло образование как самой осадочной породы, так и полезных ископаемых.

Б.

6. Составление детального списка и характеристика всех встречающихся минералов (с точным их определением).
7. Установление пространственных, хронологических и генетических соотношений минералов между собой и построение общей геохимической диаграммы последних.
8. Изучение типоморфных минералов и характера их изменения в ходе процесса.
9. Учет всех участвующих в процессе химических элементов, определение их кларков, сравнение их со средними кларками земной коры, связь их с менделеевской таблицей.
10. Установление картины миграции, рассеяния и концентрации отдельных элементов в данном районе.

Правильное решение вопроса о генезисе дается, таким образом, лишь на основе совокупного исследования в указанных многочисленных направлениях.

Хронологически геохимик должен прежде всего знакомиться с первыми четырьмя пунктами наших положений и особенно пунктами 1, 2, 3-м, поскольку 4 и 5-й нередко могут быть выполнены лишь после длительных камеральных работ.

Главная задача геохимика заключается в освоении пунктов 6—10. Геохимик должен быть хорошим минералогом с зорким, внимательным и привычным к определению минералов глазом. К сожалению, наши геохимики весьма часто грешат тем, что создают теории о генезисе на основании неверно определенных на глаз минералов. Геохимику и минералогу не надо забывать, что основным отправным пунктом при установлении типа геологического процесса являются сами объекты—минералы, а также химические элементы, из которых слагаются их решетки.

Дальнейший этап геохимической работы — установление сочетания отдельных минералов, что еще ближе к вопросу генезиса. Если отдельная находка полевого шпата (без точного его определения) ничего не говорит о его происхождении, то установление сочетания полевого шпата + кварц + шерл + биотит говорит уже совершенно определенно о наличии гранитного пегматитового процесса.

Больше того, если геохимик при этом определит последовательную кристаллизацию указанных минералов: биотит — полевой шпат — шерл — берилл — кварц, то он не только установит, что имеет дело с гранитными пегматитами, но сможет даже сказать, что геофаза кристаллизации этого комплекса отвечает примерно 600° и что пегматит должен быть в общем довольно близок к материнскому граниту.

4. ПРИМЕНЕНИЕ МЕНДЕЛЕЕВСКОЙ ТАБЛИЦЫ

Одним из методов углубленного анализа соотношений между отдельными химическими элементами, составляющими данный минеральный комплекс, является использование таблицы Менделеева. Поэтому мы должны изложить, с одной стороны, те основные черты, которые характеризуют таблицу Менделеева, а с другой — те практические мероприятия, которые помогают использовать закономерности менделеевской таблицы для геохимических выводов в полевой работе.

Таблица Менделеева, ее формы и отдельные направления

Как известно, менделеевская таблица может быть дана в самых разнообразных формах как на плоскости, так и в пространстве, причем для целей геохимии наиболее удобной является развернутая форма, данная на рис. 12—16. Короткая форма таблицы, являющаяся в общей химии общепотребительной, мало удобна для геохимических целей, и поэтому мы предпочитаем давать таблицы в развернутом виде (длинные периоды).

Первая форма такой таблицы была предложена мной в 1921 г., причем в середине ее располагалась группа благородных газов, вправо от которых лежало поле металлов щелочных и щелочноземельных, влево — металлоидов и тяжелых металлов (рис. 12). Здесь же для удобства могут быть нанесены те или иные, необходимые для нас показатели: радиусы ионов, эки или вэки, атомный вес, атомный объем и т. д.

В этом виде таблицей широко пользовались многие авторы. Однако в дальнейшем выяснилось, что еще более удобной формой является такая

же развернутая таблица, но в которой благородные газы располагаются в конце и в начале каждого длинного периода (рис. 13 и 14). В этом случае мы имеем возможность гораздо более четко наносить на таблицу изменения свойств, например, щелочности и кислотности, легче устанавливать различие типов ионов (шаровых, промежуточных и купро) и т. д.; поэтому в нашей работе мы обычно применяем сейчас этот вид менделеевской таблицы.

В ней мы можем различать три направления: **в е р т и к а л ь н о е**, которое лежит в основе самого закона периодичности и по которому мы

Ряды	I	II	III	IV	V	VI	VII	0	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	Ряды
1	—	—	—	—	—	—	H	He	Li	Be	—	—	—	—	—	—	2a
2b	—	—	B	C	N	O	F	Ne	Na	Mg	—	—	—	—	—	—	3a
3b	—	—	Al	Si	P	S	Cl	Ar	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe, Co, Ni	4
5	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Pd	Ru, Rh, Pd	6
7	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	J	Xe	Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os, Ir, Pt	8
9	Au	Hg	Tl	Pb	Po	At	?	Rn	?	Ra	Ac	Th	Pa	U	—	—	10

Рис. 12. Менделеевская таблица в развернутой форме с нанесением на нее геохимической характеристики отдельных элементов.

Простой круг — элементы мезокристаллизации (т. е. габброидных и диоритовых пород); двойной круг — элементы протокристаллизации, т. е. ультраосновных пород (дунитов, пироксенитов и т. д.); подчеркнутые элементы конечной кристаллизации (телокристаллизации), т. е. связанные с гранитными и нефелинситовыми пегматитами; перечеркнуты халькофилы, т. е. те элементы, которые образуют в жилах преимущественно сернистые соединения и генетически связаны с пневматолитическими и гидротермальными образованиями. Без всякого значка оставлены те элементы, которые носят название атмофилов и гидрофилов, т. е. входят в состав воздуха и вод.

учимся общей химии; горизонтальное, из коротких и длинных периодов, и, наконец, **д и а г о н а л ь н о е**, причем из двух его направлений только одно, идущее сверху слева вниз направо, имеет определенное физическое и геохимическое значение. Эти три направления, сочетаясь между собой, делят таблицу на ряд отдельных блоков или больших полей.

В е р т и к а л ь н о е н а п р а в л е н и е. Наиболее интересный тип связи как графически, так и по существу приурочен к вертикальному направлению. Элементы, расположенные в одной вертикальной группе, в общем характеризуются одинаковой валентностью, одинаковым расстоянием и направлением от соответственных узловых точек благородных газов (или сходных с ними элементов). В общем они характеризуются более или менее одинаковым орбитальным строением внешних электронных оболочек и, следовательно, в схеме должны обладать особым сходством химических свойств. Еще по данным Ретгерса, а затем академика В. И. Вернадского эти вертикальные группы хорошо известны в геохимии по изоморфному замещению принадлежащих к ним элементов в природных смесях.

В каждой группе нормально, за некоторыми исключениями, сверху вниз увеличивается радиус иона, и одновременно с увеличением объема уменьшается его энергетический показатель — эк и вэк. Таким образом, элементы, расположенные наверху в каждой группе, энергетически сильнее, дают решетки большей энергии, большей прочности, тогда как атомы элементов, расположенных внизу таблицы в той же группе, характеризуются меньшей энергией решеток в своих соединениях, следовательно,

легче ионизируются, дают более растворимые соединения (с простыми анионами) и обладают в общем большей миграционной подвижностью.

Горизонтальное направление. До последнего времени горизонтальное направление не привлекало к себе достаточного внимания, между тем как оно имеет огромное химическое, кристаллохимическое и геохимическое значение. Хотя в общем в горизонтальном направлении каждый последующий элемент отличается от предыдущего увеличением валентности на единицу, но в середине таблицы мы наблюдаем особое сход-

18	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
H ₈																	H	He
He	Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Ne	Na	Mg	Al											Si	P	S	Cl	Ar
Ar	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Kr	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Ta	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Xe	Sr	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Rn	Fr	Ra	Ac	Th	Pa	U												

Рис. 14. Менделеевская таблица с распределением элементов по техническим группам.

I — щелочные и щелочноземельные металлы; II — редкие металлы кислотного типа; III — тяжелые металлы кислотного типа; IV — цветные металлы; V — благородные металлы; VI — металлоиды; VII — радиоактивные элементы.

ство в свойствах атомов, что связано с особыми чертами их электронного строения. Рядом лежащие элементы оказываются здесь очень тесно связанными общностью свойств, что заставляет их объединять в особые семейства.

Максимальное сходство свойств при постепенном увеличении общего заряда будет наблюдаться только при таких атомных структурах, в которых прибавление нового валентного электрона происходит не в самой наружной ячейке, а внутри уже существующей оболочки. Исходя из этого, мы можем установить следующие характерные семейства:

1. Семейство железа (21—28) — важная группа, определяющая сырье для черной металлургии.
2. Семейство редких земель (57—71) — очень ясная группа, в которой несколько особняком стоит лантан.
3. Семейство рения (73—78).
4. Семейство урана (89—92).

Внедрение в анализ менделеевской таблицы понятия о семействах имеет огромное, еще не оцененное в геохимии значение. Элементы, несмотря на различие в величине заряда и валентности, объединяются вместе так, что их свойства, оказывается, меняются постепенно без особых скачков. Геохимически это значит, что, с одной стороны, в природе должны быть обычными явления совместного их нахождения, а с другой, что при миграции и разделении ионы должны выходить из системы в определенной последовательности справа или слева в зависимости от условий процесса. Соотношение ряда элементов в природных геохимических системах определяется в этих случаях, главным образом, свойствами соседей по горизонтали и в меньшей степени по вертикали (как мы это раньше думали, когда принимали изоморфизм за основную или даже единственную причину парагенезиса элементов).

Диагональное направление. Успехи изучения и использования радиусов ионов подсказывают, что, помимо указанных выше двух геометрических направлений, имеется еще одно — исключительного значения. Это — диагональ, идущая сверху слева вниз направо, т. е. линия, идущая от начала координат таблицы. По этой диагонали намечается прежде всего закономерность в ходе величин радиуса ионов R , поскольку последние в схеме изменяются так, что по горизонтали уменьшаются вправо, а по вертикали увеличиваются вниз; очевидно, что начерченная на схеме диагональ будет соединять ионы примерно равной величины, но разной валентности (рис. 16).

Этим определяется способность расположенных по диагонали ионов к максимальному взаимному замещению. При этом энергетика ионов нам подсказывает, что при равном объеме ионы большей валентности обладают большей энергетической активностью и с точки зрения равновесия системы более выгодны в решетке, чем ионы меньшей валентности.

Поэтому в нашей диагонали мы должны различать оба направления — сверху вниз и снизу вверх. Мы говорим о полярном изоморфизме, т. е. о том, что вхождение в решетку по диагонали всякого иона, расположенного ниже, энергетически выгоднее, чем иона, расположенного выше (рис. 17).

Подчеркиваем, что в данном случае мы наблюдаем соотношение, обратное тому, которое характеризует энергетику ионов одной и той же вертикальной группы; в этом случае ионы, расположенные ниже, энергетически слабее, чем ионы, расположенные наверху.

Однако диагональное направление имеет большое геохимическое значение не только по вышеуказанным причинам. Если внимательно просмотрим ряд свойств элементов так, как они даны, например, у Мейснера или Шемякина, то убедимся, что границы ряда свойств идут примерно в этом же направлении, благодаря чему геохимические поля, объединяющие атомы определенных свойств, делят таблицу не по вертикали, а всегда по какой-либо диагонали слева сверху вниз направо.

Б л о к и. Совокупность трех направлений — горизонтального, вертикального и по одной диагонали — взаимно подтягивает и связывает элементы по этим трем направлениям и чисто теоретически делает возможным разделение менделеевской таблицы по геохимическим и кристаллохимическим свойствам на ряд полей, или блоков, причем наличие лишь одной связующей диагонали обуславливает вероятность вытягивания этих блоков не просто по вертикали, а с некоторым отклонением влево вверх.

Таким образом, полями таблицы грубо намечается как бы состав тех геохимических и космохимических дифференциатов, для которых данные элементы являются характерными.

Необходимо отметить, что только три элемента, Mg, Au и Sn, не вполне укладываются в намеченное разделение на ряд полей. Следует отметить, что намеченные поля в общем отвечают трем главным типам ионов: ионам типа благородных газов, ионам промежуточным, ионам типа купру.

В основу толкования таблицы, изображенной на рис. 12, мы можем положить деление ее на три главных поля, причем каждое характеризуется своими чертами.

П о л е о б ы ч н о е, кончающееся на никеле (28), характеризуется наиболее типичными элементами, наиболее распространенными в земной коре и составляющими основу лито-, атмо- и гидросферы. Как мы знаем, на 28-м элементе резко обрывается ряд физических и химических свойств и структурных черт атома, круто ломается и кривая кларков. Это поле

O	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII-O
—	H ⁺¹	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	H ⁻¹	He ⁰
He ⁰ 1,22	Li ⁺¹ 0,78	Be ⁺² 0,34	B ⁺³ 0,20	C ⁺⁴ 0,15	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	F ⁻¹ 1,54	Ne ⁰ 1,60
Ne ⁰ 1,60	Na ⁺¹ 0,98	Mg ⁺² 0,78	Al ⁺³ 0,57	Si ⁺⁴ 0,39	P ⁺⁵ 0,35	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Cl ⁻¹ 1,81	Ar ⁰ 1,92
Ar ⁰ 1,92	K ⁺¹ 1,33	Ca ⁺² 1,05	Sc ⁺³ 0,63	Ti ⁺⁴ 0,68	V ⁺⁵ 0,64	Cr ⁺⁶ 0,52	Mn ⁺⁷ 0,52	Fe ⁺² 0,67	Cu ⁺¹ 0,96	Zn ⁺² 0,83	Ga ⁺³ 0,62	Ge ⁺⁴ 0,44	As ⁺⁵ 0,35	Se ⁺⁶ 0,31	Br ⁻¹ 1,96	Kr ⁰ 1,98
Kr ⁰ 1,98	Rb ⁺¹ 1,49	Sr ⁺² 1,27	Y ⁺³ 1,06	Zr ⁺⁴ 0,87	Nb ⁺⁵ 0,69	Mo ⁺⁶ 0,68	Ma ⁺⁷ 0,55	Ru ⁺⁴ 0,65	Ag ⁺¹ 1,13	Cd ⁺² 1,03	In ⁺³ 0,92	Sn ⁺⁴ 0,74	Sb ⁺⁵ 0,62	Te ⁺⁶ 0,45	I ⁻¹ 2,20	Xe ⁰ 2,18
Xe ⁰ 2,18	Cs ⁺¹ 1,65	Ba ⁺² 1,43	TR ⁺³ 1,22	Hf ⁺⁴ 0,86	Ta ⁺⁵ 0,88	W ⁺⁶ 0,68	Re ⁺⁷ 0,55	Os ⁺⁴ 0,67	Au ⁺¹ 1,37	Hg ⁺² 1,12	Tl ⁺³ 1,49	Pb ⁺⁴ 1,05	Bi ⁺⁵ 0,74	Po ⁺⁶ 0,74	N ⁺⁵ 2,20	Rn ⁰ 2,18
Rn ⁰ —	Ra ⁺² —	Ac ⁺³ —	Th ⁺⁴ —	Pa ⁺⁵ —	U ⁺⁶ —	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Рис. 16. Менделеевская таблица в развернутом виде.

Нанесены наиболее характерные валентности и свойства ионов. Нанесены также диагонали, соединяющие ионы близких объемов.

развернутой таблицы довольно резко делится на две части: на поле металлоидов — анионов и электроотрицательных элементов с ясно кислотными свойствами и очень большими или очень малыми радиусами ионов, и на поле, состоящее только из катионов с щелочными свойствами, ослабляющихся вправо, с радиусами ионов средних величин (наиболее ходовыми) от 1 по 0,60 Å, с постепенным усилением элементов, характерных для ультраосновных пород и глубинных геосфер Земли.

Поле сульфидное, или металлическое (нижнее левое), состоит из очень характерных элементов, тоже катионов, но дающих более прочные и более экзотермические постройки с S, Se и Te, чем с кислородом. Потенциал ионизации у них выше, чем у элементов кислотного поля, вследствие чего они труднее переходят в ионизированное состояние и, следовательно, дают не столько ионные, сколько атомные или металлические постройки. В результате они халькофильны.

Поле кислое, в левой стороне состоит из щелочей и щелочных земель, но далее вправо наблюдается определенный переход к элементам кислотного типа (так называемые металлические кислоты), легко дающим ионные решетки из комплексных анионов. Отсюда их литофильный характер, приуроченный преимущественно к кислым кристаллическим породам (и остаточным гранитным магмам).

Особое место в этой схеме занимает группа платиновых металлов, стоящих ближе к полю металлическому; несколько неопределенно положение галлоидов.

Практическое использование Менделеевской таблицы

Как мы видели в предыдущем изложении, в менделеевской таблице намечается ряд направлений, определяющих совокупность атомов близких химических и геохимических свойств. Сочетание этих направлений позволяет говорить о возможности выделения внутри менделеевской таблицы некоторых блоков или целого ряда поясов, которые отвечают ассоциациям элементов в природе. Поэтому совершенно понятной является возможность использовать приведенные соображения для анализа

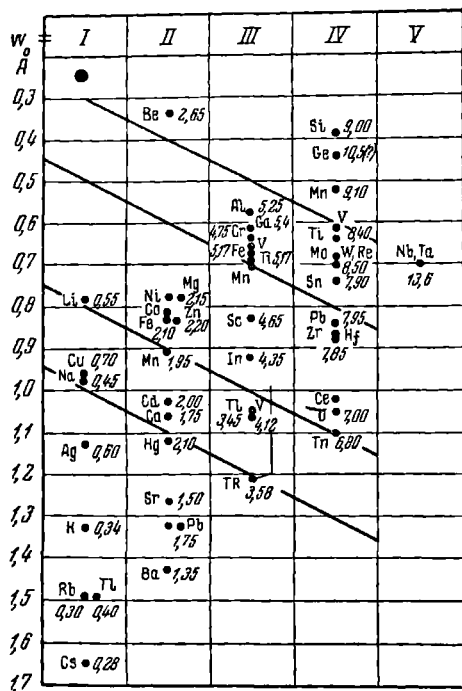


Рис. 17. Номограмма полярного изоморфизма, определяющая возможность взаимного замещения ионов разной валентности (см. рис. 15).

Эта диаграмма дает наглядное выражение сочетания катионов в решетках. Она построена на величинах радиусов ионов (по Вертикальной координате) и валентностей, отложенных по горизонтали, причем около точки каждого катиона поставлена величина его энергии в кристалле (эв). Косые диагонали показывают энергетически наиболее выгодные замещения гетеровалентными ионами. Подробное описание метода пользования этой таблицей см. в томе III «Геохимия», 1937, стр. 370—374.

тех природных сочетаний элементов, которые устанавливаются в полевой геохимической работе и характеризуют определенную территорию или месторождение (см., например, для элементов Урала, рис. 18).

Практически метод заключается в следующем. Для данной территории или лучше для данного замкнутого массива или отдельного месторождения путем минералогического и спектроскопического анализа устанавливается полная сводка всех химических элементов, из которых складывается данный минеральный комплекс. В полученном списке химических элементов можно установить какие-либо градации, хотя бы чисто ориен-

18	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
	H																H	He
He	Li	Be	B	C	N	O											F	Ne
Ne	Na	Mg	Al	Si	P											S	Cl	Ar
Ar	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Kr	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Md	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	J	Xe
Xe	Cs	Ba	TR	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	N ⁸⁵	Rn
Rn	N ⁸⁷	Ra	Ac	Th	Pa	U												

Рис. 18. Характерная таблица элементов Урала, нанесенная на таблицу Менделеева.

Кружками обозначены элементы кислых гранитных магм, черными точками — элементы основных и ультраосновных магм, крестом — элементы жильных образований халькофилов. Тире обозначены элементы, связанные с осадочными свитами. Для некоторых элементов значки сочетаются. Таблица заслуживает особого внимания, так как показывает, что элементы ультраосновных магм располагаются в среднем в центре менделеевской таблицы, от них налево — элементы гранитных магм, направо — рудных сульфидных жил; по краям таблицы — элементы осадков соляных бассейнов.

тировочного характера, для того чтобы оттенить элементы более распространенные и элементы более редкие. Такой метод тем более необходим, что, как мы знаем из последних исследований, в сущности, при применении очень точных методов все почти химические элементы менделеевской таблицы могут быть найдены в каждом природном комплексе. Поэтому правильнее было бы разделить установленные для данных месторождений элементы на следующие четыре группы и нанести их на бланковку менделеевской таблицы для данного месторождения следующим образом:

- 1) жирно — элементы наиболее характерные, специфические, отличающиеся особым накоплением;
- 2) нормальным шрифтом — элементы средние, обычного распространения;
- 3) петитом — элементы, имеющие небольшое распространение;
- 4) в скобках (простых или двойных) — элементы, устанавливаемые лишь путем спектроскопического исследования. При пользовании этими четырьмя типами значков, символы элементов наносятся на чистые бланки развернутой менделеевской таблицы, в которых названия элементов наметены лишь для ориентировки сбоку мелким шрифтом. Каждый элемент, таким образом, попадает в особую клетку в соответствии с его распространением выражением. Совокупность всех найденных элементов позволяет устанавливать взаимоотношения природной ассоциации с теми закономер-

ностями, которые существуют в менделеевской таблице и о которых мы кратко говорили выше.

Так, элементы гранитных пегматитов распределяются в определенном участке 3, 4, 5 и отчасти 6-й вертикальных групп. При этом можно подметить, что элементы пегматита оконтуриваются в определенное поле, которое устанавливает характерные черты данной ассоциации пегматитового типа и указывает на связь ее с гранитным массивом. Интересно, далее, что усиление этого поля кверху переводит его в область щелочных пегматитов, а налево вверх — говорит о некоторой связи с основными и ультраосновными магмами.

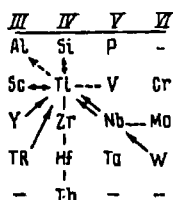


Рис. 19. Геохимическая звезда, показывающая изоморфное замещение и сочетание элементов для титана из окружающих его элементов менделеевской таблицы.

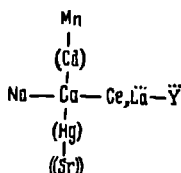


Рис. 20. Геохимическая звезда, показывающая изоморфное замещение и сочетание элементов для кальция.

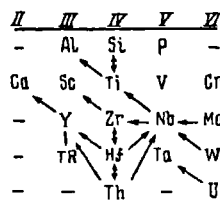


Рис. 21. Геохимическая звезда, показывающая изоморфное замещение и сочетание элементов для ниобия по менделеевской таблице.

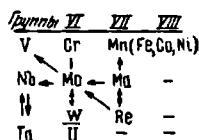


Рис. 22. Геохимическая звезда, показывающая изоморфное замещение и сочетание элементов молибдена.

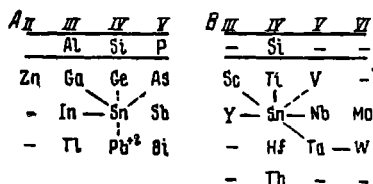


Рис. 23. Геохимическая звезда, показывающая изоморфное замещение и сочетание элементов для олова. В этой таблице даны две звезды: А — олово занимает нормальное положение между германием и свинцом; В — оно поставлено условно на место циркония, между титаном и гафнием.

Каждый из элементов, отмеченных в нашем поле, характеризует как бы центр возможной геохимической звезды (рис. 19—23). Так, если намечается повышенная роль циркония и этот элемент на таблице будет обозначен жирно, то мы, соединив его горизонтальной осью с соседями — иттрием и ниобием, отмечаем вероятность нахождения этих элементов в общем парагенезисе.

Вертикальная линия связи подсказывает нам прежде всего связь с гафнием (что напрашивается из тождества радиусов ионов) и отчасти с торием; обычная диагональ подскажет связь со скандием и т. д.

Каждый элемент, отмеченный в менделеевской таблице, получает как бы свое место среди своих соседей. Его положение позволяет определить

не только, какие еще элементы надо искать в месторождении, но и на какие элементы необходимы химические или спектроскопические анализы.

Менделеевская таблица в этом отношении подсказывает гораздо больше, чем мы думали до сих пор. В поисковой работе она является истинным компасом, как назвал ее Содди, говоря о физике и химии.

Парагенезис химических элементов вытекает из тех закономерностей, которыми определяются их положение и свойства каждого элемента в Менделеевской таблице.

Для практического использования приведенных соображений советую ближе ознакомиться с характером геохимических звезд, подробно освещенных в томе I «Геохимии», 1932, 122—129, и в томе IV «Геохимии», 1939, 1—350.

5. ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ДИАГРАММЫ

Введение

Одним из важнейших методов геохимической работы является составление геохимических диаграмм, частично еще во время полевых исследований, но, главным образом, после обработки материала в институте и в лаборатории.

В основу геохимических диаграмм мы ставим графические изображения природных процессов, причем принимаем во внимание, что необходимо не столько учитывать статическое состояние того или иного комплекса, сколько отобразить динамику процесса, т. е. ход его во времени.

Сама диаграмма имеет целью, следовательно, выявление взаимоотношений между отдельными входящими в состав комплекса минералами, временем их образования, ходом изменения температуры и давления и пространственных взаимоотношений. Совершенно понятно, что точная диаграмма такого типа может быть построена лишь на основе диаграмм равновесия, подобных тем, которые были даны Вант-Гоффом для систем солей или Геофизической лабораторией Карнеги в Вашингтоне для кристаллизации расплавов. Однако природный процесс не позволяет так точно дешифровать факты, определяющие его течение, как в лаборатории, и поэтому нам приходится прибегать к несколько условным диаграммам, изложению методики которых и посвящена настоящая глава.

Мы знаем в настоящее время, что при кристаллизации какого-либо комплекса нужно считаться со следующими явлениями:

- 1) с первичной концентрацией реагирующих веществ;
- 2) с ходом изменения температуры процесса;
- 3) с ходом изменения давления;
- 4) с хронологической последовательностью отложений;
- 5) с пространственностью последовательности кристаллизации.

Мы не будем останавливаться детально на этих пяти явлениях и отметим лишь особую роль первых двух факторов, которые в основном определяют характер пунктов 4 и 5. Давление в общем мало влияет на ход кристаллизации и сказывается, главным образом, лишь косвенно, благодаря накоплению или, наоборот, удалению летучих компонентов из системы. Поэтому ход всякого геохимического процесса в основном определяется концентрацией реагирующих веществ и изменением температуры процесса.

Многочисленными исследованиями последних лет доказан любопытный факт, что концентрация дериватов, выделяемых отдельными магмами, в общем колеблется в довольно определенных интервалах. Она сама является

как бы результатом всей предыдущей истории (предистории) данного геохимического комплекса и поэтому гораздо более закономерна и менее изменчива, чем мы могли бы думать. Это положение представляет огромный теоретический и практический интерес, ибо если бы концентрация реагирующих веществ в каждой геохимической системе варьировала в произвольных отношениях, то вопрос о последовательности кристаллизации и типичных кристаллизационных путях не мог бы решаться так однозначно и сравнительно просто, как он решается современным геохимическим анализом.



Рис. 24. Схематическая диаграмма минеральных образований.

Основные обозначения: минерал, характеризующий ту или другую геофазу, называется типоморфным; по типу отложения минералы называются: единичными (1), проходными (2), прерывистыми (3). Крестиком в диаграммах отмечается момент изменения или замещения соответственного минерала; так, в данном примере разрушение минерала 1 шло, вероятно, под влиянием образования третьей генерации минерала 3. В случае нескольких генераций данного минерала они обозначаются римскими цифрами (I, II и т. д.). Определенным генерациям в общем свойственны определенный химический состав, определенная окраска и определенный кристаллографический облик.

Гораздо более важным фактором является температура, определяющая в основном направление хода кристаллизации, особенно благодаря тому, что 90 % всех геохимических процессов накопления вещества связано с понижением температуры, охлаждением магматических очагов, и, следовательно, подавляющая часть изучаемых нами явлений находится в зависимости от главного фактора — понижения температуры во времени.

Отсюда делается очевидным, что основной координатой для построения наших выводов должна служить координата температура — время, откладывающаяся в большинстве применяемых нами диаграмм в горизонтальном направлении (рис. 24).

Каждый отрезок прямой, расположенной горизонтально на этой диаграмме, определяет собой прежде всего время данного образования, во вторых, отвечающую ему температуру.

При анализе какого-либо природного образования на основании эмпирических данных мы можем таким образом каждому минералу или элементу приписать определенное положение на нашей диаграмме и этим путем установить взаимоотношения его как с другими, так и с основными координатами диаграммы (рис. 25).

Однако для того, чтобы можно было сравнивать отдельные диаграммы, очень важным является установление некоторой, хотя бы условной шкалы, которая позволила бы градуировать процесс и хотя бы с небольшой точностью рассматривать все природные явления в одних и тех же масштабах отрезков времени. Такая шкала была выработана мною на основании многолетних исследований гранитных пегматитов; хотя она не полностью

применима к другим процессам, тем не менее с известными допущениями она дает удобную схему и для анализа других образований, как то: пневматолитов рудных жил, а также остаточных дериватов других магм.

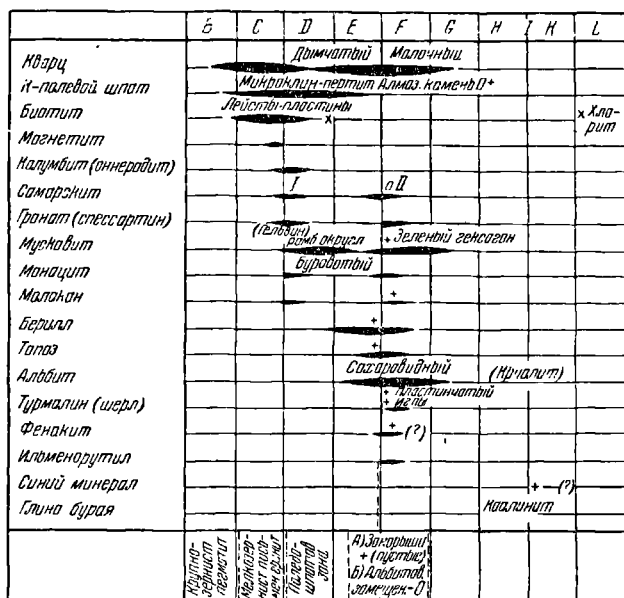


Рис. 25. Обычная геохимическая диаграмма минерализации гранитных пегматитов Ильменских гор.

Эта диаграмма намечает весьма определенно две главные геофазы кристаллизации: на границе С и D и E и F. Альбитовые замещения отмечены кружком. Кристаллизация минералов в микрорах отмечена прямым крестиком, косые кресты указывают на разрушение.

Я разделяю весь участок природного процесса охлаждения на ряд отдельных этапов, объединяющих несколько геофаз, которые обозначаю латинскими буквами в нижеследующем порядке:

геофаза А	этап магматический
геофазы В и С	этап эпимагматический (пегматитовый)
» D, E, F, G	» пневматолитический
» H, I, K	» гидротермальный, постпегматитовый
» L, M, N	» гипергенный (поверхностный)

Эти этапы и отдельные геофазы были условно проградуированы для нормального гранитного остаточного расплава, причем граница

А — В отвечает 800°	Г — Н отвечает 400°
С — D » 600°	К — L » 100°
Е — F » 500°	

Для установления этой шкалы мною были взяты в основу две критические точки. Первая, между С и D, очень удобно наблюдаемая, отвечает постоянной точке перехода высокотемпературного кварца в низкотемпературный. Она удобна тем, что сравнительно мало изменяется от давления

(от 573° примерно до 625°) и объективно определяется на образцах одного из самых обычных минералов — кварца — на основании ряда кристаллографических признаков (частично только после травления). Как показал опыт последних 10 лет, эта схема выдержала многочисленные проверки со стороны сотен полевых исследователей и сохраняется до настоящего времени как важный опорный пункт для установления отдельных этапов в тех или иных природных процессах.

Гораздо сложнее обстоит вопрос со второй точкой — критической температурой воды, которая располагается по моей диаграмме между G и H и отвечает, следовательно, примерно, 360—420°. Эта точка выбрана в общем правильно, но для нее мы не имеем столь объективных признаков, как для верхней, тем более, что долгое время господствовало убеждение, будто критическая точка воды не определяет собой какого-либо перелома на кривых растворимости солей в перегретых парах воды.

Однако многочисленные исследования последнего времени показали, что такое предположение неверно. В критической точке для всех солей, особенно содержащих комплексные анионы, наступает резкий перелом. Он характеризуется катастрофическим понижением или увеличением растворимости и если не является характерным для солей с одновалентными ионами, то имеет большое значение для соединений сложных комплексных ионов, как, например, кремнекислых или углекислых. Несмотря на отсутствие явных, прямых признаков, ряд внешних черт позволяет уже в поле устанавливать вероятное положение этой точки. Переход от двухфазной системы к трехфазной, т. е. от кристаллизации газовой к осадкам из водных растворов, характеризуется рядом специфических черт, как то: послойным отложением, крустификацией, резким различием между верхней и нижней стенками жилы и т. д. Особенно характерно для этой точки P, что ей обычно отвечает быстрая массовая кристаллизация, выражающаяся в появлении мелких кристаллических образований хлоритов, слюд, турмалина и т. д.

Таким образом, наша основная геохимическая диаграмма проградирована на основании указанных двух точек и представляет собой смену фазовых состояний сложной системы с очень многими компонентами, очень сложными взаимоотношениями труднолетучих и легколетучих веществ. Поэтому было бы большой ошибкой думать, что такая упрощенная схема позволяет с полной точностью решать природные задачи и что к их анализу могут быть приложены законы физики и химии в чистом виде. Применяемая нами диаграмма есть лишь метод для наглядного изображения пространственных, хронологических и генетических взаимоотношений наблюдаемых в природе явлений. Это есть попытка примерно одним и тем же масштабом температуры и времени измерять различные процессы в разных районах, разного типа, разных магм. В такой диаграмме каждый минерал какой-либо системы находит свое положение в виде точки или некоторой горизонтальной линии. Определение этого положения для каждого природного соединения в определенной геофазе и определенном парагенезисе, свойственном ему в данном процессе, и является основной задачей нашей работы.

К принятой нами схеме обозначений необходимо, как сказано, относиться с теми оговорками, которые вообще нужно иметь в виду при анализе всякого природного процесса. Изменчивые внешние условия давления, концентрации и температур не позволяют говорить о строго определенных моментах отложения минералов, которые в идеальном случае должны были бы выразиться на диаграмме точками. Практически время отложения большинства минералов выливается в горизонтальные линии, большей

или меньшей протяженности, смещение которых вправо или влево может быть весьма значительным, особенно для некоторых химических соединений. Специфическое разнообразие отдельных месторождений еще более усложняет картину, а явления омоложения, палингенеза и метасоматоза могут внешне приводить к весьма серьезным кажущимся несогласиям. Тем не менее в схеме такая диаграмма является основой для понимания всех тех месторождений, которые генетически связаны с понижением температуры магматических очагов.

В ходе разработки этого вида диаграммы, мною были выработаны некоторые условные значки. Время отложения в диаграмме выражается горизонтальной линией с расширением в тех местах, на которые приходится максимальная кристаллизация. Если для минерала известно несколько периодов кристаллизации, то мы получаем на диаграмме в той же строке несколько линий, расположенных в разных геофазах и относящихся к разным римским цифрам (отдельные генерации минерала). Если кристаллизация хотя и продолжается, но в очень слабых масштабах, то линия заменяется пунктиром или делается прерывистой. Момент замещения отмечается опрокинутым крестиком, момент начала кристаллизации — черной точкой.

Переходим к анализу различных типов геохимических диаграмм, построенных на изложенных мной принципах.

Обычная форма геохимической диаграммы

Наиболее простой формой, принятой еще французскими петрографами, является диаграмма, в которой по горизонтали откладываются отдельные геофазы по вышеприведенной системе, а сверху вниз, в той или иной последовательности, главные минералы, принимающие участие в данном химическом комплексе.

Эти минералы располагаются в списке в такой последовательности, чтобы значки, приходящиеся на них в самой диаграмме, распределялись закономерно, перемещаясь слева направо. Этим резко выявляется последовательность и взаимоотношения отдельных минеральных видов. Однако не всегда легко построить такую диаграмму с достаточной полнотой и очевидностью. Как показал опыт моих исследований, первые мои диаграммы, построенные для пегматитовых жил Мурзинки, потребовали осмотра свыше 2000 образцов и проверки наблюдений для каждого данного образца на основе целого ряда подходов. Нередко в полевой обстановке можно поступить несколько иначе: взять готовый напечатанный бланк и в имеющуюся шкалу последовательности геофаз вписать название каждого минерала на то место, на которое приходится его кристаллизация, причем если минерал занимает довольно широкий интервал, то можно его наметить стрелкой от данного названия вправо или влево (в нужную сторону). Такая упрощенная схема дается нами на рис. 26 и является очень удобной, особенно в полевой работе.

Второй тип диаграммы этого же характера построен не на минералах, а на элементах. Вертикально располагаются элементы, участвующие в процессе. В самой же диаграмме отмечаются те типичные минералы, которые характерны для данного элемента в определенной геофазе.

В этом случае мы можем иметь несколько типов диаграмм для данного месторождения. Можно расположить в вертикальном столбце все встречающиеся в нем химические элементы, а минералы распределить по диаграмме только по соответственным линиям. Можно строить отдельную диаграмму для каждого элемента; в этом случае мы получаем общую геохими-

ческую картину данного элемента в земной коре и можем распределить те же значки по разным типам природных ассоциаций.

В общем вышеприведенные методы практически применимы к анализу каждого отдельного месторождения. Они могут сводиться вместе после

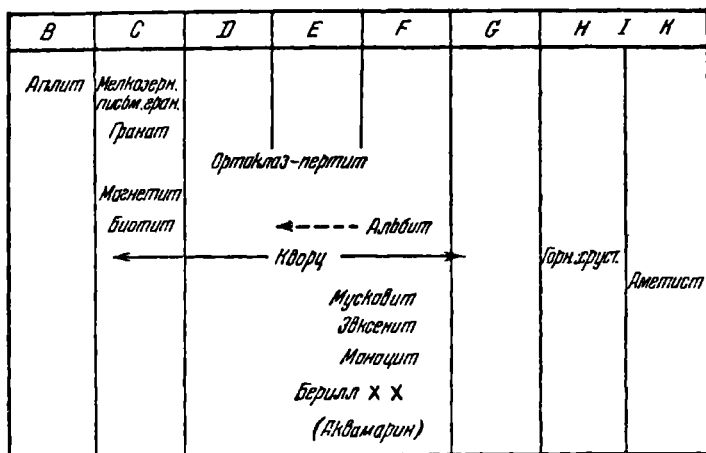


Рис. 26. Геохимическая диаграмма гранитной пегматитовой жилы.

Опрокинутыми крестиками обозначено, как и в других диаграммах, начало разведения берилла и замещения его новыми образованиями. Это наиболее простой тип геохимической диаграммы, легко составляемый в поле, на основе просмотра большого количества штучков.

проработки целой серии месторождений, в результате чего получится сводная диаграмма, где для каждого данного месторождения отмечена геофаза наибольшей кристаллизации, т. е. дается его суммарная геохимическая характеристика.

Диаграммы в форме кривых

Несколько иную форму я предложил в 1932 г. для геохимической характеристики таких процессов, в которых принимает участие небольшое количество компонентов. По горизонтальной оси, как и в предыдущих случаях, откладывается хронологическая и пространственная последовательность, но температуры откладываются по вертикали, начиная с более низких температур у начала координат. Такая форма особенно удобна для характеристики тех процессов, где мы имеем дело со сложным ходом изменений температур, их глубин и наложением новых геофаз.

Мы получаем в этом случае некоторую температурную кривую и на ней условными значками отмечаем те минеральные комплексы, которые осаждаются в тот или иной момент природного процесса (рис. 27).

Практическое использование диаграмм

Мы должны рассмотреть два типа диаграмм: одни носят теоретический сводный характер, даются в различных монографиях и представляют собой сумму всех наших наблюдений в области данного геохимического процесса; они служат как бы сравнительной теоретической основой для второго типа диаграмм, диаграмм практического характера, которые составляются

исследователями для каждого данного месторождения (или их серии) путем сопоставления встречающихся в них минералов.

На рис. 51 мною дается такого рода сводный ключ для всех дериватов гранитных магм; ниже излагаются те методы, которыми надо пользоваться при анализе месторождений при помощи этого ключа.

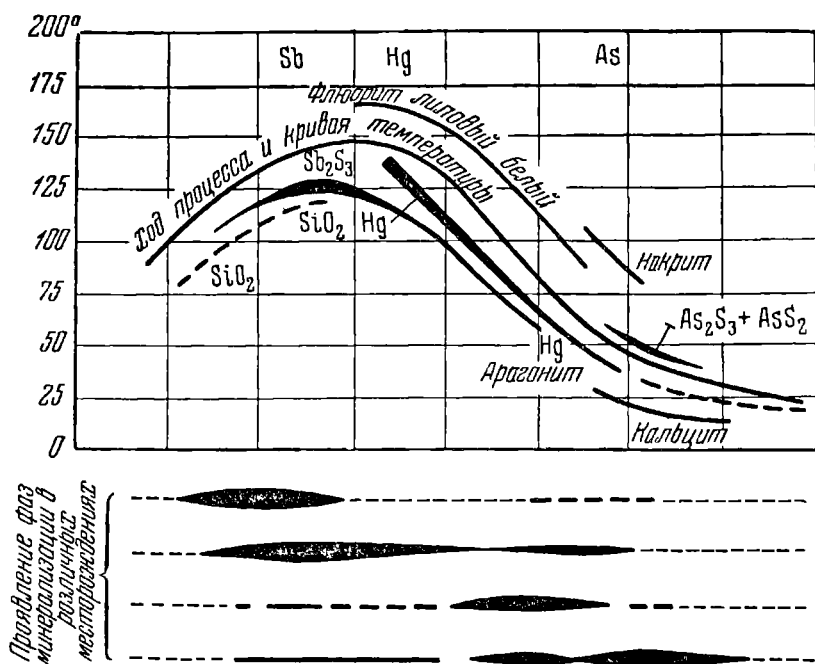


Рис. 27. Геохимическая схема концентров сурьмяно-ртутных месторождений.

Практические диаграммы дают нам в общем целый ряд ценных указаний.

Вертикальное направление всегда указывает на совокупность минеральных образований, пространственно, хронологически и генетически отвечающих определенным геофазам, т. е. определенному участку данного образования. Это есть выражение парагенезиса или, вернее говоря, отдельных ассоциаций в парагенетическом ряду.

Если в каком-либо месторождении мы нашли определенный минерал, то, отыскав его на теоретической диаграмме и проведя от него вертикальную линию вверх и вниз, мы получаем список тех вероятных минералов или элементов, которые обычно его сопровождают в аналогичных геохимических условиях. Не менее важным представляется по отношению к каждому данному минералу направление влево и вправо от него. Влево располагаются минералы более ранних кристаллизаций, более высоких температур, находящихся ближе к очагу или к краям жилы. При этом правые минералы могут замещать левые, левые же будут образовывать включения внутри правых, вызывая этим те или другие технологические их дефекты.

Все минералы, расположенные вправо, относятся к процессу более позднему. Они могут замещать левые, могут их обрастать, изменять, перекристаллизовывать — словом, минералы правые будут располагаться

ближе к центру жилы, будут отвечать более низким температурам, будут в свою очередь более перекрываться процессами поверхностного разрушения, будут чаще накапливаться в пустотах, миаролах и т. д.

Таким образом, наша диаграмма устанавливает ряд важнейших практических моментов и для каждого данного минерала говорит о следующих явлениях:

- 1) о вероятном интервале температур по кристаллизации;
- 2) о времени его выпадения по отношению к другим минералам;
- 3) о вероятном физико-химическом состоянии расплава или раствора;
- 4) о расстоянии отложений данного минерала от глубин магматического очага;
- 5) о расстоянии его от стенок жилы, т. е. от начала процессов кристаллизации.

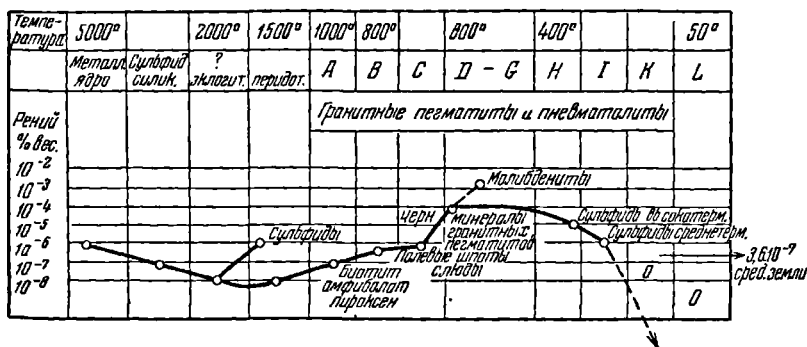


Рис. 28. Метод обозначения распределения элемента в образованиях разных геофаз.

Геохимическая диаграмма рения по данным В. и И. Ноддаков (1931 г.). Такие диаграммы, построенные на точных величинах кларков, возможны, однако, лишь для очень немногих элементов, для которых имеется большое количество аналитических данных и специальных исследований кларков для различных геохимических систем.

Диаграмма устанавливает характер геохимических концентров, устанавливает нарушение в общем порядке последовательности, наличие процессов омоложения, легко определяет вопросы телескопии, т. е. наложение последовательных геофаз и т. д. и т. п.

Значение диаграмм определяется, однако, прежде всего тем, насколько точно они отображают природные соотношения и насколько удачно исследователю удалось на сотнях и тысячах экземпляров проверить и установить эти взаимоотношения.

Особый тип диаграмм Г. П. Барсанова

Особый тип диаграмм, представляющий некоторое видоизменение нижеуказанных методов, предложен был Г. П. Барсановым, причем, как видно на рис. 29—33, в его диаграммах были более дробно расчленены гидротермальные и гипергенные геофазы.

Для выявления геохимических закономерностей Г. П. Барсанов по вертикальной ординате наносит полный список минералов, содержащих данный элемент в заметном количестве, в порядке, отвечающем генетической последовательности, начиная с магматической и кончая гипергенной фазой. Отметив моменты главной кристаллизации каждого минерала точкой, автор соединяет эти точки кривой и получает возможность по ее характеру судить

о большей или меньшей геохимической показательности элемента для отдельных геофаз.

Момент наиболее крутого повышения кривой отвечает моментам наибольшего геохимического накопления данного элемента. Перерывы

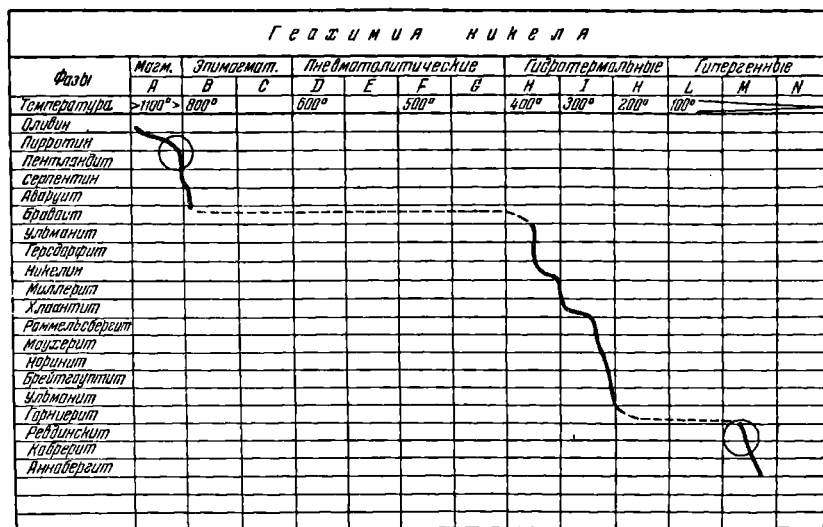


Рис. 29. Геохимическая диаграмма Г. П. Барсанова. Бросаются в глаза два периода концентрации никеля — высокотемпературный и гипергенный.

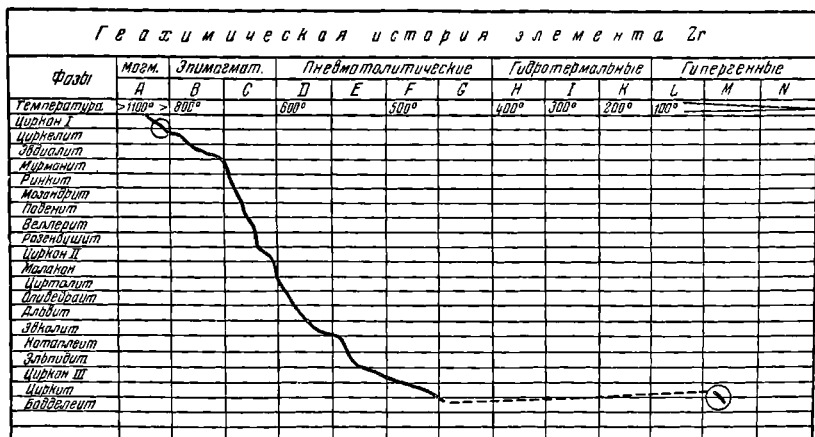


Рис. 30. Геохимическая диаграмма циркония, по Г. П. Барсанову. Бросаются в глаза два периода концентрации циркония, причем первый период охватывает геофазы А и В.

показывают отсутствие элемента в данном ряду геофаз и отсутствие возможности его геохимического накопления.

Кружками на кривой отмечены поля наибольшей концентрации данного элемента, дающей промышленные типы скоплений.

Обычно я отмечал намечающиеся взаимоотношения на бланке диаграммы при помощи отдельных линий. При этом для каждого минерала надо было оставить достаточно места, чтобы можно было располагать одну под другой большое количество линий, отвечающих каждому данному образцу.

Уже после просмотра 20—30 образцов, а иногда и соответственных шлифов, намечается наиболее характерное положение минерала в данном комплексе. Постепенно вырисовываются места, наиболее характерные для кристаллизации данного минерала, а после просмотра 2—3 сотен штучек диаграмма обычно вырисовывается в довольно определенном виде и позволяет уже подойти к ее окончательному вычерчиванию.

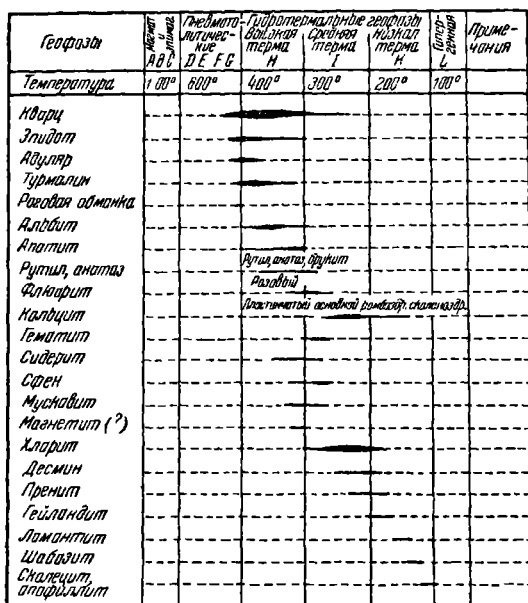


Рис. 34. Сводная геохимическая таблица альпийских жил, согласно данным месторождений Швейцарии и Полярного Урала.

Диаграмма характеризует положение радиоварпа и генетические взаимоотношения его с другими минералами жил альпийского типа.

Как я указывал, очень важным является составление таких диаграмм для каждой жилы в отдельности, ибо отдельные жилы всегда отличаются некоторыми специфическими особенностями их кристаллизации.

Только когда диаграмма составлена по отдельным жилам, она может быть суммирована в общей диаграмме всего поля пегматитов с выявлением доминирующих геофаз всего процесса (рис. 34). Установление доминирующих геофаз позволяет перейти и к определению того типа пегматитов, с которыми мы имеем дело. Иногда является возможным перейти от этих местных диаграмм к диаграммам количественным. Такая работа была мной проделана на многих сотнях штучек Хибинских туфдр, при помощи измерения миллиметровой линейкой в трех измерениях каждого штучка. Пересчет линейных отношений сначала на объемные, а потом на весовые позволяет по данным всех образцов получать с достаточной точностью средний весовой состав определенного минерального агрегата.

Если такая работа произведена для отдельных геофаз или для отдельных минералов, то мы получаем возможность не только отмечать значками расстояние пространственно-хронологического положения минерала, но и давать некоторые количественные показатели его относительной роли.

Подобно пегматитам можно анализировать и другие сложные парагенезисы. Это особенно относится к рудным жилам и пневматолитам. Но гораздо труднее

подобный анализ для таких процессов, как скарновый или контактных образований, в которых мы имеем дело с замещениями одних минералов другими, с гораздо более сложными пространственными и хронологическими соотношениями.

Тем не менее опыт изучения шеелитовых месторождений Союза показал, что этот метод может быть применен и к анализу скарновых процессов.

Главнейшая литература

- А. Е. Ферсман. Геохимия, 1932, I, 122—129; 1934, II, 115—124, 167—199; 1939, IV.
 А. Е. Ферсман. Пегматиты, 1932, I, 106—114.
 А. Е. Ферсман. Geochemische Diagrammen. [Геохимические диаграммы].
 N. Jb. Min., Geol. u. Paläont., Brauns-Festband, 1931, 663—680.

6. ГЕОХИМИЧЕСКОЕ КАРТИРОВАНИЕ

Методы геохимического картирования до сих пор еще не проработаны, и, в сущности, мы не имеем до настоящего времени сколько-нибудь систематически проведенных попыток дать настоящую геохимическую карту.

Существующие геологические и петрографические карты в общем дают смешанную картину пространственных взаимоотношений отдельных минеральных образований, так как на одной и той же карте применены разные принципы для пород осадочных и кристаллических. Для первых опи- ставят в основу возрастные соотношения, для вторых — их петрографический и отчасти химический состав. Эта двойственность и нелогичность существующих карт побудила перейти от них к так называемым литологическим картам, которые и для пород осадочной свиты дают химическую и петрографическую характеристику, независимо от их возраста. Такие карты, несомненно, позволяют решать ряд вопросов чисто геохимического характера, однако все же не решают геохимической задачи в целом.

Мы можем в настоящее время наметить следующие типы геологических карт в широком смысле этого понятия: карты географо-геоморфологические, карты стратиграфические, карты петротектонические, карты литологические. К этим типам мы должны присоединить еще четыре типа карт, по существу, ближе всего отвечающих проблемам геохимии, а именно «геотехнические» карты, геохимические разных типов, минералогические и шлиховые.

Одной из наиболее интересных попыток в этом направлении явилось составление известной геотехнической карты Швейцарии проф. П. Ниггли и его помощниками. Эта карта в масштабе 1 : 200 000 может служить образцом того, как нужно разрешать задачи, стоящие на грани геологии и геохимии.

На основании многолетних работ и технически блестяще выполненных частных и детальных карт П. Ниггли остановился на необходимости прежде всего выработать такую легенду, которая исходила бы из петрографических и химических свойств горных пород, вне зависимости от их возраста, но с учетом их фациальных особенностей и отчасти структуры. Эти карты с огромным количеством значков, с одной стороны, дают распределение на территории Швейцарии отдельных типов пород — глин, мергелей, обломочных пород, песков разных типов, конгломератов, известняков (кристаллических, слошных, мергелистых, окремненных) и т. д. Говоря геохимически, такая карта дает представление о распределении на территории страны химических комплексов — глинистых веществ, кремнезема, углекислого кальция и т. д. Более сложный характер эта легенда принимает в области кристаллических пород, но и здесь в основу ее положены не тонкости петрографического состава, а химическая характеристика, например, нанесены породы кислого типа, сланцы, богатые калиевой слюдой, метаморфические филиты, богатые кальцием, и т. д. Таким образом, эта классификация кладет в основу не признаки петрографически родственных соотношений, а химические и технические черты кристаллических пород.

На такую основу, очень детально продуманную, со многими десятками обозначений, накладываются значки месторождений отдельных полезных ископаемых, скоплений гилса, строительных материалов, сырья для цементной промышленности, солей, торфа, асфальта и т. д. Соответствующий значок намечает существующие каменоломни, добычу песка, кирпичные заводы, при помощи разных шрифтов отмечается большее или меньшее практическое значение того или иного месторождения. В последних листах Сан-Готардского района помещены главнейшие рудные месторождения, а также выявлены многочисленные отдельные точки расположения жил (альпийского типа).

Каждая из таких карт по отдельным районам снабжается дополнительными схематическими картами — почвенными и петротектоническими, в которых породы обозначены различными цветами не по их возрасту или составу, а по их отношению к тектонике района, метаморфизму, складчатости, тектоническим разломам и т. д.

Таким образом, законченная в 1938 г. геотехническая карта Швейцарии представляет прекрасный образец попытки по-новому характеризовать те или иные участки земной коры, исходя из принципов чисто практического характера, с одной стороны, и геохимического, с другой.

Что же касается чисто геохимических карт, то мы можем представить себе несколько их типов:

Геохимическая карта общая. В ее основу кладется карта литологическая, на которую наносятся соответственно химические значки, указывающие на присутствие того или иного менее обычного химического элемента. При этом различными шрифтами можно выделять более крупные скопления элементов среди более случайных отдельных находок. Такая чисто качественная карта с возможно более полным нанесением химических значков представляет несомненный шаг вперед для решения геохимических задач, но вместе с тем ее построение практически возможно только для редких и мало распространенных элементов.

В данном случае можно применять нижеследующие правила:

1) совсем не наносятся или лишь в особых случаях наносятся: благородные газы, H, He, Ra, Rn, O;

2) наносятся лишь в особо резких скоплениях: Al, Fe, K, Ca, Si, Mg, Na, C, Mn, Cr;

3) наносятся после специального исследования: Ba, Br, Y, Ga, Hf, Ge, In, J, Cd, Rb, Ru, Se, Tl, Te, P, Cs, Re, Sc;

4) безусловно наносятся только после определения минералов и химического анализа: Be, B, Bi, W, Th, Au, Ir, V, Co, Li, Cu, Mo, As, Ni, Nb, Sn, Os, Pd, Pt, Hg, Pb, Ag, Sr, Sb, Ta, Ti, Th, U, F, Cl, Zn, Zr.

Элементы наносятся жирным шрифтом в случае наличия скоплений их в количествах, значительно превышающих типичные кларки.

Элементы групп 3 и 4 не могут окончательно наноситься без специального минералогического и спектроскопического обследования. Особенно это относится к последней группе, хотя и здесь можно пользоваться в полевой обстановке чисто минералогическими признаками. При этом желательно отмечать петитом чисто «минералогические» находки (в отдельных образцах). Нормальным шрифтом отмечаются средние скопления промышленного типа, жирным — скопления весьма значительные, заслуживающие, по всей вероятности, практического использования. Если данным элементом занято определенное поле на карте, то оно, по возможности, оэнтуривается сначала чисто условно. Такая схема с нанесенными на нее по полевым наблюдениям химическими значками является как бы первым приближением к настоящей геохимической карте каждого района. Но и она может быть весьма полезной для первоначального выяснения концентрации элементов и для установления их связи с определенными петрографическими и литологическими типами образований. Конечно, при этом необходимо иметь в виду, что для составления такой карты нужны

многочисленные данные наблюдений и очень детальный анализ данной территории, что может быть достигнуто лишь путем применения быстрых методов, например, спектроскопического и особенно шлихового.

Геохимические карты частные. Гораздо важнее карты другого типа, дающие представление о распространении на известной территории только строго определенных химических элементов. Эти карты могут служить для нанесения как наиболее редких, так и ряда обычных элементов. Построенная для отдельного химического элемента карта представляет огромную ценность для геохимика, так как устанавливает не только качественное, но и количественное распределение данного элемента и, следовательно, места наиболее вероятного нахождения его концентраций. Незакрашенными остаются те участки, для которых установлено содержание элемента ниже соответственного кларка; светлая окраска должна объединять поля распространения данного элемента несколько выше его кларка; средняя густота окраски может быть применена для кларков концентрации порядка 5; густая окраска — для высоких кларков концентрации, около 10 и выше. Темная, почти черная окраска должна намечать места особого сосредоточения элементов (кларки концентрации 100—200) или полей промышленных объектов.

Такой тип карт может дать, например, для дунитового массива (на основании большого количества аналитических материалов), ясное представление о распределении в нем кальция, магния, железа, хрома или никеля, причем для каждого из этих элементов получится необыкновенно интересная картина по отношению к петрографическим или тектоническим особенностям массива.

К сожалению, до сих пор ни одно из крупных месторождений полезных ископаемых нашего Союза не проработано в указанном направлении, несмотря на то, что это представило бы большой теоретический и практический интерес.

К этому же типу карт относятся и карты шлиховые.

Карты изолиний. Другой тип изображения количественных соотношений и распределения какого-либо элемента связан с построением изолиний. Для каждого данного элемента по определенной сетке, на основании таких же химических и иных определений (как мы говорили выше), наносятся абсолютные величины содержания того или иного элемента; точки с равными величинами соединяются вместе и дают изолинии, расположение которых устанавливает места концентрации данного химического элемента. Сочетая эти точки между собой, можно строить геохимические профили и разрезы, которые, будучи наложены на литологическую основу, дают кривую распределения элемента по определенным геологическим или геотектоническим направлениям.

Эта методика по отношению к отдельным элементам за последние годы стала применяться довольно широко в нашей и в американской практике. Она получила даже особые названия в зависимости от химических элементов, являющихся объектом исследования. Так, мы знаем сейчас особые купрометрические карты, впервые примененные американцами для выяснения законов распределения меди в больших массивах вторичных кварцитов. Широкое распространение, особенно на основе изучения вторичных месторождений, получило для олова применение станнометрического анализа и станнометрических карт. Д. И. Щербаковым намечается этот же метод и по отношению к сурьме (стибнометрические карты) и к ртути.

По отношению к ртути А. А. Сауков намечает аналогичную методику профилирования и геохимических разрезов по образцам пород и минералов, взятых по определенному профилю. Ряд последовательных профилей

позволит перейти к карте изолиний содержания этого элемента. Он предлагает проверить эту методику на соответственных профилях в районах рудных месторождений Ферганы, Ойротии, Донбасса или Кавказа.

Описываемая выше методика получила прекрасное применение в работе по составлению вообще первых геохимических карт двух китайских ученых Ли и Шу в 1924 г. Метод, который был ими назван методом изомарт, сводился к проведению изолиний одинакового распространения отдельных окислов в интрузивном массиве диорита. По расположению изомарт оказалось возможным судить о ходе дифференциации элементов, о роли при этом контактов и т. д. В результате этой работы были выявлены не только черты и распространение включенного в массив потока железных руд, но и степень ассимиляции им известняка и влияние последнего как на процессы изменения диорита, так и на образование руды.

Из сказанного видно, что изолинии могут проводиться как по отдельным химическим элементам, так и по окислам и даже отдельным минералам.

В последнем случае мы получаем ценные выводы не только чисто геохимического, но и технологического характера. Так, например, заслуживают внимания карты изолиний распространения медных соединений, ибо наглядно показывают, в каких частях месторождений мы имеем дело с сульфидными минералами и в каких — с вторичными медными образованиями. Такие минералогические карты медных изолиний с успехом применялись у нас в Союзе.

Об щ е е з а к л ю ч е н и е. Как видно из сказанного, намеченные выше принципы геохимических карт требуют еще дальнейшей проработки.

Приведенные выше указания носят несколько теоретический характер и скорее намечают будущие работы, а не являются проверенной и разработанной методикой. Между тем для нас несомненно, что значение таких карт для практических целей особенно велико, что вопросы поисков и особенно разведок в отдельных месторождениях будут облегчены наличием такого рода карт, указывающих на места концентрации данного элемента и на соотношения элементов между собой. Необходимо привлечь геохимиков к составлению детальных геохимических карт отдельных районов, имеющих особое значение.

7. АНАЛИЗ ОТДЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ КЛАРКОВ

Основной задачей изучения геохимии отдельных территорий необходимо считать изучение распределения отдельных химических элементов в данном геологическом комплексе и всего их поведения в земной коре — форм концентрации, рассеяния, процессов миграции и т. д. Каждый элемент, по существу, является неотделимой частью общего сложного процесса, который совершается в определенной хронологической последовательности и в котором отдельные генетические типы следуют один за другим в определенной закономерности.

Задачей исследования является установление списка всех химических элементов, принимающих участие в данной области. Одновременно с этим для каждого химического элемента и в особенности для тех, которые представляют особый интерес, необходимо установить нижеследующее:

- 1) формы распределения, концентрации и рассеяния данного химического элемента;
- 2) в случае наличия крупных концентраций, выражение их в общепринятых единицах, весовых и объемных (запасы);
- 3) закономерности совместного нахождения различных элементов;

- 4) общую закономерность распределения на данной территории данного элемента;
- 5) процессы, вызывающие концентрацию и рассеяние;
- 6) хронологию этих процессов;
- 7) пути возможного промышленного использования;
- 8) наконец, последним и наиболее важным результатом исследования должно явиться определение кларков данного элемента в данном комплексе.

При этом речь должна идти о выводе среднего кларка, с одной стороны, и об определении так называемых кларков концентрации.

Несомненно, что поставленная выше задача не может быть со всей детальностью проведена по отношению ко всем элементам данного комплекса. Но она должна быть углубленно поставлена по отношению к тем из них, которые имеют практическое значение и по отношению к которым ведутся поисковые работы.

Хотя до сих пор не было проведено настоящего геохимического изучения в каком-либо районе с достаточной полнотой по отношению ко всем вышесказанным восьми проблемам, но наиболее полно и углубленно геохимические методы применялись при изучении геохимии в Средней Азии.

Пример работ в Средней Азии

Многолетние поисковые работы в разных районах Средней Азии в достаточной мере показали, что геохимические идеи в целом ряде случаев являются весьма реальным методом для отыскания новых месторождений, особенно если они органически связаны с изучением геологического и тектонического строения данной территории. Особенно полезным в этих случаях оказалось установление определенных геохимических поясов и концентров в отдельных районах Средней Азии, что в результате привело к установлению определенных рудных узлов, связанных с определенными тектоническими явлениями.

При этой работе приходилось пользоваться чисто визуальными наблюдениями маршрутного характера. Однако самым важным являлась тесная увязка полевых исследований с химическими, лабораторными и минералогическими данными.

Интересны неоднократные указания в отчетах экспедиций по Средней Азии, что чем детальнее изучались взятые в поле образцы и чем скорее полученные результаты химических определений сообщались отрядам, тем плодотворнее были их выводы и тем успешнее шло развитие дальнейшей работы.

Особую роль при этом оказало предварительное спектроскопическое исследование образцов руд и пород. Благодаря им были открыты в скарнах соединения висмута, молибдена, вольфрама; наличие литиевых линий привело к указанию на пневматолитический характер процессов, а это, в свою очередь, указало на необходимость поисков олова и т. д.

Химический анализ мышьяковых руд высокотемпературных пород привел к открытию мышьяковых колчеданов разных генераций и т. д.

Одновременно с этим отдельные партии широко применяли методы геохимических диаграмм, о которых мы говорили выше; далее увязывали процессы минералообразования с геологическим возрастом и намечали пути картирования геохимических выводов.

Хотя настоящей геохимической карты мы до сих пор для Средней Азии еще не имеем, тем не менее первым приближением к разрешению этой задачи, как и в других районах, являются литологические карты, учитывающие петрографические и химические особенности горных пород и закономерности распространения в них тех или иных минералов.

В результате этих работ было установлено для одной Таджикской республики наличие 60 химических элементов менделеевской таблицы.

Я остановился более детально на конкретном примере работ в Средней Азии, ибо они доказали, что путем широкого применения геохимических идей возможно сравнительно быстро овладеть основными геохимическими чертами громадных областей и наладить поисковую работу на основе не просто интуиции и опыта поисковика, а глубоких теоретических схем чисто научного характера.

Определение кларков. Наиболее точным и законченным выводом при изучении геохимии района должно явиться установление количественных соотношений между химическими элементами данного ком-

плекса и сравнение этих соотношений с нормальной величиной средних кларков земной коры. Если чисто формально ассоциация химических элементов, нанесенная на менделеевскую таблицу, устанавливает качественно типы данной геохимической ассоциации, то сравнение средних кларков земной коры с кларками элементов данного комплекса¹ дает возможность точно установить количественное соотношение соединений и выяснить специфические особенности геохимии каждого данного района.

Анализируя эту проблему в 1937 г., академик В. И. Вернадский высказал мысль (по отношению к марганцевым рудам) о необходимости не только говорить о среднем содержании какого-нибудь элемента в данном месторождении, но и выражать его определенной величиной, которую он назвал кларком концентрации.

Под кларком концентрации мы подразумеваем величину, определяющую отношение между имеющимся для данной территории кларком и его средней величиной по таблице. Понятно, что кларк концентрации равен единице, если в данном комплексе не произошло ни увеличения, ни уменьшения в содержании элемента. Все величины больше единицы говорят о накоплении и концентрации, величины ниже — о рассеянии и уменьшении роли данного элемента. Эта идея не получила вначале практического применения, до тех пор, пока проф. М. И. Кантор в своей работе по генезису керченских руд² не определил на конкретном примере кларки концентрации и на основании огромного количества анализов дал картину геохимии этого грандиозного месторождения.

Подсчитав средний процент содержания элементов в рудах, М. И. Кантор определил величину кларков концентрации в таких цифрах:

Мышьяк . . . 200	Сера 2	Кальций . . . 0,5
Марганец . . 17	Водород 1	Титан 0,5
Железо . . . 9,8	Магний . . . 0,5	Кремний . . . 0,3
Фосфор . . . 9	Алюминий . . 0,5	Натрий 0,1
Кобальт . . . 5		Калий 0,1

Мы видим из этих цифр, что характерными чертами геохимии керченских руд является накопление не только железа, но и марганца, с очень высокими кларками концентрации для фосфора, кобальта, железа, марганца и особенно мышьяка, т. е. преимущественно для элементов нечетных.

Нет никакого сомнения, что таким образом мы получаем совершенно точные цифровые выражения для процессов миграции химических элементов.

Конечно, при этом мы должны сделать одну серьезную поправку. Кларк концентрации говорит о соотношении кларка данного месторождения и среднего кларка земной коры. Между тем самый процесс далеко не всегда начинается с перегруппировки элементов какого-либо комплекса, отвечающего среднему кларку, и поэтому наши цифры имеют ограниченное значение. Но тем не менее во всех случаях, когда образование того или другого скопления является результатом процессов, связанных с целым циклом осадочных или изверженных пород, принятие кларков земной коры за исходный материал является допустимым. Особенно это допустимо,

¹ Определение средних кларков района или месторождения требует значительного количества химических анализов образцов, собранных по особо продуманному плану.

² М. И. Кантор. Генезис керченских руд. Труды С.-х. Акад. им. К. А. Тимирязева, 1938, 35—65 и др.

если исходным комплексом являются продукты глинистого характера, так как в общем их состав очень близок к среднему кларку земной коры.

Кларк концентрации, как мы это устанавливаем для целого ряда месторождений, является, таким образом, очень ценной величиной. Пользуясь этой величиной на основе более или менее конкретных показателей и особенно изучая кларки концентрации не только по отношению к месторождению в целом, но и в разных частях данного комплекса, можно устанавливать точные взаимоотношения между отдельными химическими элементами.

8. ГЕОГРАФО- И ТЕХНО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Геохимик-поисковик не может ограничиться при поисках полезных ископаемых только отвлеченной научной характеристикой тех веществ, которые встречаются при его исследовании. Сама идея полезных ископаемых в настоящее время и в особенности в условиях социалистического хозяйства испытала резкие изменения и находится в зависимости от тех техно-экономических показателей, которые связаны, с одной стороны, с месторождением и его географией, а с другой, с самим полезным ископаемым и его техническими свойствами и запасами. Поэтому геохимик в своей работе не может не касаться этих задач и не дополнять свои исследования анализом указанных выше экономических проблем.

Не входя в детальное изучение первой проблемы, мы считаем возможным подчеркнуть, что основными задачами при оценке географо-экономической стороны вопроса являются нижеследующие:

1) точное географическое положение района месторождения и взаимоотношение его с путями сообщения, железнодорожными пунктами, крупными населенными центрами;

2) общие климатические условия района (температура и ее колебания, осадки, ветры и их направления и т. д.);

3) выяснение возможностей транспорта и наиболее выгодные направления как для вывоза полезных ископаемых, так и для связи с центральными хозяйственными районами;

4) обеспеченность рабочей силой, возможности для хозяйственного освоения данных районов и для организации рабочих поселков (их снабжение);

5) вопросы водоснабжения как самого предприятия, так и рабочих поселков;

6) вопросы энергетики, наличие местных источников топлива или других видов энергии; возможность связи с крупными линиями электропередач;

7) наличие строительных и дорожных материалов, нужных как для организации выработок, так и для жилого и промышленного строительства.

Второй цикл экономических вопросов связан с технологией самого производства. Горное дело требует для организации целого ряда условий, определяющих тип возможной эксплуатации данного месторождения: открытые разработки или подземные, характер вмещающих пород с точки зрения горной добычи, возможности вывоза пустой породы и хранения полезного ископаемого, свойства полезного ископаемого при укладке, перевозке и т. д. и т. п.

Я не перечисляю тех многочисленных моментов, о которых в деталях могут говорить лишь специалисты, знающие горное дело, но думаю, что в первом приближении поисковик, найдя то или другое месторождение,

должен ответить на основные вопросы, которые определяют характер горного хозяйства в будущем.

Наконец, третьей стороной в экономическом анализе месторождения является чисто технологическое изучение данного полезного ископаемого.

В этом отношении прежде всего необходимо углубленное знание свойств полезного ископаемого, а также тех видов промышленности, в которых данное сырье находит свое применение, и тех требований, каковые к нему предъявляются.

Работа геохимика в поле и поиски полезных ископаемых могут быть рациональны, только если геохимик обладает общими технологическими сведениями о тех продуктах, на которые ведутся поисковые работы.

Старая чисто морфологическая геологическая разведка сейчас ставит необходимым условием оценки запасов — их технологическую изученность. Ценность месторождения в новых условиях промышленности оказалась поставленной в зависимость не только от величины самих запасов, но прежде всего от качества ископаемого.

Разведочные работы все более и более приходится увязывать с углубленным технологическим подходом. Время упрощенного решения задачи, когда единственным показателем являлась количественная сторона, прошло. Геохимик в настоящее время подходит к совершенно новой области, которую можно было бы назвать качественной разведкой месторождений.

Список полезных ископаемых раньше был сравнительно простым. Сейчас, когда сотни новых полезных веществ внедряются в химическую и экономическую промышленность, геохимик-поисковик должен смотреть на природное сырье другими глазами.

Когда в 1912 г. мною и акад. В. И. Вернадским на Южном Урале были осмотрены месторождения кианита, последний для нас был просто интересным минералом, и нам не приходило в голову, что он через 10 лет сделается важнейшим полезным ископаемым, сейчас широко применяемым как лучший огнеупорный материал для металлургии.

Еще больший интерес представляет редчайший синий минерал дюротьерит. Еще 10 лет назад трудно было допустить, что этот минерал будет сейчас¹ стоить около 800 руб. за тонну и явится основой тонкой огнеупорной промышленности.

Поисковик должен знать потребности современной промышленности. Он должен знать заводскую и фабричную практику использования каждого минерала, и только тогда он может правильно решать вопросы поисков и разведок. Он должен быть в курсе масштабов потребления и порядка цен!

Так, например, когда ставится проблема использования нефелина в стекольной, геохимику надо знать, что 0,7% железа в нефелине приемлемо для получения полужелтого стекла, при содержании свыше 1% получается стекло темное, цена которого значительно ниже. Экономика диктует нередко и границы практического использования: руда апатита с 20% P_2O_5 не выдерживает экономики обогащения, тогда как с 25% уже позволяет с достаточной степенью экономичности вести очень крупную промышленную добычу. Но если одновременно с апатитом будут извлекаться и другие полезные составные части апатитовой руды, то весьма вероятно, что руды и с 20% P_2O_5 окажутся рентабельными и будут пригодны для использования в промышленности.

Однако, поскольку вопросы минеральной технологии и минералогии получили за последние годы громадное развитие в самых разнообразных направлениях и поскольку почти все химические элементы и огромное

¹ В 1939 г. — *Ред.*

количество минералов за последние годы делается объектом промышленного использования, трудно говорить о геохимиках, которые были бы достаточно сведущими во всех областях технологии. Очевидно, что для геохимиков-поисковиков необходима определенная специализация, которая позволила бы им работать более углубленно и в более тесной увязке с тем или иным типом промышленных предприятий.

Один геохимик-поисковик может специализироваться по процессам высокотемпературным (магматическим), другой будет изучать пегматитовые процессы. За последние 10 лет мы наблюдаем прекрасные примеры именно такой специализации, связанной, например, с поисками элементов в районах гранитных массивов.

Мы можем также говорить о геохимиках-осадочниках, изучающих полезные ископаемые в осадочных породах.

Только такая специализация позволит сделать эффективной работу геохимиков и направить их поиски по правильному техно-экономическому пути.

9. ТОПОГЕОХИМИЧЕСКОЕ И ТОПОМИНЕРАЛОГИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ

Я подхожу к заключительной работе, которую должен произвести каждый исследователь определенного месторождения или целого района полезных ископаемых, заканчивая свои полевые и лабораторные исследования. Венчать работу будет продуманное сопоставление всех наблюдений, фактов, анализов, подсчетов, освещение их идеями прикладной геохимии и сравнительный анализ с другими сходными месторождениями. Старые простые списки полезных ископаемых, приложенные в конце геологических описаний, не могут сейчас удовлетворить ни практика, ни геолога-разведчика, они не могут дать освещения связанным с ними промышленным проблемам; не могут нас удовлетворить и детальные химические исследования месторождений без установления связи между минералами, их элементами, без установления их связи с горными породами, со всей историей, геологической и геохимической, данного участка земной коры. Нужны, наконец, технологические опробования, нужен, словом, комплексный метод исследования всего природного тела (месторождения). Это и есть цель научного обследования месторождения, и мы не можем не отметить, что этот путь с особым успехом был использован в ряде случаев б. Ломоносовским институтом Академии Наук как единственный правильный путь исследования.

Сообразно с современными задачами минералогии и геохимии в новом свете вырисовываются основные запросы топоминералогических описаний, и по отношению к ним совершенно одинаково должны быть поставлены те три вопроса, которые составляют основу нашего современного химико-минералогического мировоззрения — изучение системы: элемент — процесс — минерал.

Первая задача — это описание минералов и их свойств, т. е. то, что мы до сих пор называли минералогическим описанием.

Начальную и, по существу, самую основную часть каждого минералогического описания составляет полное и по возможности детальное описание каждого минерального вида, встречаемого в данной области, независимо от его использования. Поэтому первой задачей полевых исследований представляется составление списка всех тех минералов, кои в данном районе встречаются или встречались и которые сопутствуют руде.

Для каждого данного минерала необходим далее учет всех тех пунктов, в которых он наблюдался; в области же горных разработок — установление

нахождения его в определенных глубинах или частях копи. Для каждого данного пункта должна быть нарисована картина количественного распространения данного ископаемого, т. е. в грубых чертах дана оценка его редкости или распространенности. Здесь же необходимо внимательное изучение, в каких породах минерал встречается, т. е. приуроченности минерала к определенному геологическому телу, и выяснение взаимоотношений самого минерала с этим телом; таковым является непосредственное включение минерала в породу (как, например, порфировидный полевой шпат в жильном граните), нахождение по трещине (в жиле кристаллы кварца) или на внешней поверхности (корочка кальцита) и т. д. Точное морфологическое описание самого минерала и условий его нахождения составляет одну из важных, но, к сожалению, сейчас часто пренебрегаемых задач минералогического описания. Особенно интересным является изучение изменений минерала при современных условиях, его выветривания, изменения окраски и т. д.

Конечно, особое внимание должно быть в этом отношении обращено на самые рудные минералы или полезные ископаемые. Мы все более и более убеждаемся, что не знаем минералогических свойств наших руд и поэтому не можем учитывать их в процессах использования; даже такие мелочи, как рассыпчатость или хрупкость, получают в вопросах перевозки или погрузки особое промышленное значение.

Вторую группу вопросов топоминералогических наблюдений составляет изучение парагенезиса минерала и тех естественных минеральных ассоциаций, которые в данной области наблюдаются. До сих пор на эту сторону почти не обращали внимания и не пытались дать объективный и полный материал наблюдений. Между тем в каждой естественной группировке минерал занимает свое место не только территориально, но и хронологически. Последовательность осаждения минералов, совместное нахождение при одновременном процессе их образования, замещение одного минерального вида другим и т. д. — все это вопросы, имеющие огромное значение для выяснения тех процессов, кои положили им начало. Поэтому внимательное и полное изложение условий совместного нахождения минералов является первостепенной задачей исследователя. Лучшим способом этих наблюдений является вышеприведенное графическое изображение геохимической последовательности по методу, намеченному еще французской петрографической школой и развитому позднее мною (см. стр. 544).

Наконец, третью группу вопросов чисто минералогического изучения минералов составляет их детальное химическое и кристаллографическое исследование: качественный и количественный состав, содержание примесей, определяемых лишь точным анализом или спектроскопом, наблюдения над колебаниями состава в зависимости от цвета, места нахождения, момента образования, свежести образца и т. д. Особое значение в последние годы приобретает кристаллографическое изучение, которое, помимо ряда вопросов кристаллохимического характера, может установить наличие определенных полиморфных разностей, характерный внешний облик, отвечающий определенным условиям образования и т. д., т. е. целый ряд типоморфных свойств. Этот цикл минералогического исследования должен дать базу для геохимических выводов, и без детальных точных данных о всех минералах всякое геохимическое изучение месторождения теряет почву под ногами.

Вторая задача — это изучение происхождения и образования минералов, т. е. то, что мы сейчас называем генетическим описанием.

Эта сторона вопроса является исключительно важной при каждом топоминералогическом описании, так как вводит нас в ту физико-химическую обстановку, при которой минерал образовывался и подвергался изменению в сложной геологической истории соответствующего участка земной коры, в котором он находится.

Такое генетическое описание, как это будет более детально разобрано в гл. V, складывается из нескольких последовательных подходов, которые мы можем назвать минералогическим, геологическим и физико-химическим. Под первым мы подразумеваем изучение парагенезиса данного минерала, связи его с определенными горными породами, последовательности осадчения, а также изучение всех деталей взаимных отношений минералов с целью выяснения тех «первичных» тел, из которых данный минерал образовался, и тех последовательных стадий, которые он при этом прошел. Попутно изучается форма залегания данного минерала среди других, намечающая часто определенный генетический тип.

Вторым подходом к генетическому описанию мы считаем выяснение, на основании всего комплекса имеющихся налицо условий, геологической обстановки всего района и, в частности, той непосредственной области, в которой минерал встречается. Это выяснение имеет целью определение генетического типа, т. е. в общих чертах того геологического процесса, который положил ему начало, например поствулканический, магматический, катагенетический и т. д. Выяснение типа генезиса есть не что иное, как приурочение химического процесса образования минерала к определенному комплексу геологических факторов во времени и пространстве. Таким образом, этим путем устанавливается та термодинамическая зона (по Ван-Хайзу или Зюссу), в пределах которой шло образование минерала, время, к которому в геологической хронологии относится данный процесс, и, наконец, та последовательность, в которой шли отдельные генетические процессы. Последнее намечает то, что я называю генетическим циклом, подразумевая под этим термином совокупность тех генетических процессов, которые связаны определенной последовательностью, как естественный результат тех или иных геологических явлений, например, магматический процесс, поствулканические процессы, гидротермальные жилы и т. п.

Наконец, третьей стороной генетических описаний является выяснение, на основании предыдущего определения геологического процесса, той физико-химической обстановки, в которой процесс протекал. К нахождению точных законов и точной математической формулировки величин основных факторов должно стремиться при каждом научном описании минералообразовательных процессов. Основными задачами в этом направлении являются: выяснение форм и источников энергии как причин химических реакций, выяснение вероятных температур и давления, концентрации реагирующих веществ, применение закона масс и закона Оствальда (о фазах неустойчивого равновесия), учет химических факторов и т. д. К сожалению, на этот путь точного анализа явлений природы мы можем становиться лишь в редких случаях, но частично разрешение этих физико-химических задач всегда возможно и необходимо.

Третья задача (выводы и обобщения) — распространение и роль отдельных химических элементов; это та область современных исследований, которую мы называем часто геохимией.

Не меньшей важности задача при топоминералогических исследованиях лежит в определении распространения и роли отдельных химических элементов. На этот путь научная работа становилась уже неоднократно, при изучении распространения каких-либо полезных элементов, тяжелых

металлов, калия, фосфора и т. д., но никогда этот вопрос еще не рассматривался независимо от полезности того или иного тела. Между тем полная геохимическая картина каждого района может дать ключ к выяснению целого ряда вопросов большой практической важности, причем в первую очередь необходим точный учет всех встречаемых в данной области химических элементов, качественная и количественная оценка каждого из них. В этой области, конечно, точное знание может быть достигнуто только путем количественных определений отдельных элементов, а это, в свою очередь, может базироваться лишь на большом количестве точных аналитических данных.

Далее, задачей таких геохимических описаний должно явиться установление связи между отдельными элементами при генетических процессах, связи этих элементов с определенными участками земной коры, породами, геологическими явлениями и геологическими эпохами. В этом направлении мы подходим к ряду интереснейших вопросов и сообщений, позволяющих гораздо более определенно, чем раньше, подводить под основу геологических явлений определенные физико-химические начала.

Наконец, на основании изучения всей геологической и химической обстановки представляется интересным и вполне возможным для каждого данного элемента наметить последовательные этапы его соединений в земной коре и нарисовать, таким образом, его историю и роль в геохимических процессах. Несомненно, что в этом случае изложение вопроса выходит за пределы описания самой твердой земной коры; судьбы химических элементов на земной поверхности определяются в большой степени процессами биохимического характера, жизнью растений и животных и культурно-хозяйственной деятельностью человека. С этой точки зрения полнота геохимических представлений может быть достигнута лишь путем привлечения к решению ее задач почвоведения, агрономии, метеорологии, бактериологии и т. д.

В этом направлении химия живого вещества даст нам еще ряд интереснейших данных.

Приложение I

АНАЛИЗ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НА ГЛУБИНУ

В начале XX века и особенно в XIX веке масштабы горных выработок редко достигали особенно крупных размеров и не требовали создания таких крупных горных предприятий, которые должны были бы в год выдавать 5—10 млн. т руды или 10—20 млн. т горной массы. Но в настоящее время, особенно у нас в Союзе, перешли к грандиозным масштабам производства, и рудники не только потребовали значительных количественных запасов, но и достигли своими выработками значительных глубин до 1000 и даже 1500 м. В гористых районах, где отдельные выработки могли создаваться на разных горизонтах, амплитуда охвата месторождения по высоте могла быть еще более значительной и превышала 2000 и даже 3000 м. Мы знаем из учения о геохимических концентрах и геохимическом градиенте, что эти цифры достаточны для перехода от одного минерального комплекса к другому и что в области жильных рудных месторождений даже весь геологический ряд от перимагматических до телемагматических месторождений того или иного элемента может быть охвачен одним промышленным предприятием.

Нетрудно видеть, что в связи с этим точное знание и возможно точный прогноз глубин имеют первостепенное значение при эксплуатации месторождений; детальное же изучение глубины зон позволяет сделать целый ряд важнейших выводов, касающихся основных вопросов горного дела, как то: определение близости магматического очага и глубины минерализации месторождения, изменение состава руд с глубиной, геохимический характер других соседних месторождений одинаковой или разной глубины, различие в металлогении разработок, расположенных на разных высотах рельефа, пространственное соотношение различных геохимических ассоциаций и

направления поисков по отношению к магматическому очагу, симметрия расположения зон на поверхности и их связь с тектоникой и т. д.

Правильное разделение всех этих вопросов возможно лишь при условии точного знания геологической карты местности и ее геологической истории. На фоне этих данных теория первичных и вторичных геохимических концентров превращается в закономерности огромного значения.

Приведем несколько примеров чисто практического характера, так как в работах о геохимических концентратах¹ мы уже детально рассмотрели этот вопрос.

Серебро-свинцовый рудник Пршибрам в Чехословакии. В 1909 и в 1936 гг. мне пришлось посетить этот серебро-свинцовый рудник и ознакомиться с его минеральным и геохимическим комплексом на тех больших глубинах, на которых велись работы (1100—1300 м от устья шахты). Как отмечали местные инженеры, на этих глубинах руда стала более богатой цинком и, что особенно обращало на себя внимание, стало попадаться при выплавке олова, «что они относили к отрезкам жести, бросавшимся в печи при процессах». Но не прошло и нескольких лет, как выяснилось, что плотные руды глубинных зон рудника действительно обогащаются не только цинком, но и небольшим количеством олова, повторяя совершенно аналогичную схему жил Фрейберга.

Мы видим, что это явление, не находившее себе объяснения, могло быть полностью предсказано на основании теории геохимических концентров, где ряд Pb — Zn — (W) — Sn является естественным рядом приближения к магматическому очагу.

Блейберг и Райбль в Крайне (Восточные Альпы). Один из крупнейших знатоков этого района Торнквист обратил внимание на геохимическое сходство и различие этих двух метасоматических рудников цинка и свинца и в 1931 г. наметил такое положение, что с глубиной Блейберг, как тип, будет переходить в тип Райбля, с чем будет связано появление ряда более глубинных фаз с усилением As и Au. Этот переход от телемагматического к перимагматическому месторождению, в сущности, отвечал изменению геохимических концентров.

Это предсказание в 1932 г. начало сбываться, и, по полученным в 1936 г. сведениям, действительно, рудничные анализы показали изменение рудного тела в указанном выше направлении.

Приложение II

ИЗУЧЕНИЕ ГЕОХИМИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Имеется еще один очень большой и серьезный вопрос, который в настоящее время приобретает большое промышленное значение и, вместе с тем, определяет и ход научного исследования — это вопрос об использовании и исследовании природных комплексов полезных ископаемых.

Трудно найти другую область, в которой законы геохимии сыграли бы большую роль, так как именно они определяют ту совокупность минеральных видов, которую необходимо целиком использовать при поисках и разведках, подсказывают ту совокупность элементов, которую надо искать и, наконец, выявляя черты парагенезиса, помогают в разрешении комплексной технологии. Это вопрос огромного значения, и ему был посвящен мой специальный доклад на конференции Госплана в Москве весной 1932 г. по вопросам распределения производительных сил в Союзе². Я заимствую из отдельно изданной речи наиболее важные места:

«...мы можем наметить следующие основные типы горнопромышленного комбинирования:

1. Закономерное сочетание полезных ископаемых в одном районе, но не в одном и том же рудном теле, — комбинирование горнопромышленное (как пример, пегматиты и кварцевые жилы).
2. Закономерное сочетание нескольких полезных веществ в одном и том же минералогическом теле — горнохимическое комбинирование (как пример, титаномагнетиты Урала и Хибин).
3. Комбинированное использование различных ископаемых тел определенной района — территориальное горнохимическое комбинирование (как пример, Хибинский комплекс).
4. Комбинированное использование различных производительных сил данной территории — территориально-промышленный комбинат (как пример, Березники, Ангарострой).

¹ А. Е. Ферсман. Геохимия. 1934, II, 159—212.

² А. Е. Ферсман. Комплексное использование ископаемого сырья. Изд. Акад. Наук СССР, 1932, 1—20.

5. Межрайонное промышленное комбинирование (как пример, Уралокучабасс).

Анализ отдельных примеров. Сочетания полезных ископаемых подчинены совершенно определенным законам геохимической науки, и поэтому на какой-либо определенной территории мы не встречаемся с многочисленными произвольными сочетаниями веществ, а наоборот, имеем ряд, и даже не очень длинный, типичных случаев совместного нахождения металлов и полезных ископаемых. Таким образом, сами законы геохимии нам подсказывают промышленные возможности и говорят о так называемых типичных сочетаниях нерудных и рудных тел. Эти постоянные природные сочетания позволяют говорить о некоторых постоянных чертах промышленных комбинатов, которые с небольшими изменениями встречаются в различных местностях. Как пример, мы можем привести совместное нахождение следующих веществ:

- 1) олово, вольфрам, висмут, соли лития (иногда и бериллия);
- 2) золото, олово, монацит, шеелит и др.;
- 3) калий, магний, бром, хлор;
- 4) титан, железо, ванадий;
- 5) уголь, колчедан, огнеупорные глины и др.;
- 6) никель, кобальт, медь, палладий.

Мы, например, знаем, что в гранитных пегматитах совместно встречаются полевой шпат, чистый кварц, слюда, драгоценные камни, некоторые редкие металлы, как, например, бериллий и литий. Этими полезными ископаемыми определяется всяма обычный комплекс совместной их добычи и использования (Индия и др.). Больше того, мы хорошо знаем, что нужно искать в таком природном комплексе, и если есть слюда, то должны вместе с ней искать уран и радий, а если есть литий, то обязательно должно найтись олово и редкие соединения металлов — рубидия и особенно цезия.

Комплексное использование всей горной массы в данном случае диктуется самими законами геохимии, и неудивительно, если в Южной Дакоте из одной пегматитовой жилы одновременно добывается до 15 полезных ископаемых.

Совершенно новая область и, может быть, несколько неожиданная намечается в старой и, казалось бы, установившейся отрасли нашей промышленности — в нефтяной. Добыча газа сделалась в ряде наших крупных нефтяных районов совершенно неотъемлемой частью нефтяной промышленности (Баку, Грозный и др.), хотя далеко еще не все промыслы поставили у себя эту задачу.

Но вместе с газом новый источник полезных веществ начинает намечаться в водах как самих нефтяных источников, так и в разнообразных водных струях нефтеносных районов. Сначала это были только проблемы иода с их значительными запасами в Беокишорском р-не, но потом к ним прибавился бром, ряд галогенных солей калия, кальция, стронция, бария и магния, а также радия и мезотория. Если в одних местах нефтяные рассолы содержат эти элементы на границе рентабельной их эксплуатации, то в других месторождениях при комплексном использовании мы с несомненностью подойдем к разрешению блестящей проблемы в крупном заводском масштабе, которая должна дать сотни тонн иода, отдельные тысячи тонн брома, десятки тысяч тонн разнообразных хлористых солей, в особенности ценные соли хлористого бария и хлористого калия и, наконец, значительное количество солей радия и мезотория, масштабы которых должны удивить промышленный мир! Если мы еще к этому присоединим нахождение в некоторых из районов благородных газов и в особенности гелия, то этим самым намечается совершенно исключительный комплекс полезных веществ, который впервые открыт исследовательскими работами нашего Союза. И если он не всюду полностью выдерживается, то все же в общем намечает необычайно интересные промышленные предприятия, в которых одновременно будут добываться нефть, углеводородные газы, гелий и соляные рассолы с бромом, иодом, радием, мезоторием и т. д.

Переходим к выводам: комбинированное использование полезных ископаемых не есть арифметическое сложение отдельных различных производств — это техно-экономическая задача огромного значения, это хозяйственно-организующий принцип отдельных территорий Союза.

Методы комбинирования мы должны прежде всего внедрить в разведку, где нельзя искать отдельные ископаемые независимо друг от друга, например, слюду или гранат, а надо, оценивая геохимическую обстановку данного района, одновременно искать и то и другое. Надо территориально охватывать проблему всех полезных ископаемых, и только таким путем ставя поисковые и разведочные работы, мы сможем прийти к желательным результатам.

Мы должны внедрить методы комбинирования в эксплуатацию с целью полного извлечения всей горной массы, полного использования золотых шихов и всех сульфидных комплексов. В целом ряде случаев надо идти на использование боковых пород, применять отходы обогатительных фабрик и т. д.

Идеей комбинирования должно быть проникнуто также промышленное строительство, которое еще далеко не сумело полностью использовать свои же материалы и отходы, широко применяя в различных сочетаниях местное сырье, шлаки производства, золу и мусор, отбросы металлургических и химических установок.

Наконец, идею комбинирования надо вложить в технологию, т. е. в изучение процесса всякого рода металлургических, химических и механических производств. Здесь открывается грандиозная область совершенно новой научной и научно-технической работы, которая сможет поставить по-новому ряд задач.

Использование низкосортного сырья, которое при других условиях не имело бы никакой ценности, может и должно, на основе имеющихся материалов, создавать новые полезные ископаемые, новые вещества. Именно здесь место геохимика, который знает свойства природных соединений и который должен вместе с технологом создавать новые ценности, комбинировать процессы и решать их в свете общей экономической целеустремленности всего комбината в целом.

География промышленности есть в значительной степени география комбинированного использования местного сырья, — таков конечный вывод, к которому я прихожу, однако, со всеми теми оговорками, которые вносятся в современное хозяйство новой экономической или политической географией, построенной на основах диалектического материализма. Комплексная идея есть идея в корне экономическая, создающая максимальные ценности с наименьшей затратой средств и энергии, но это идея не только сегодняшнего дня, это идея охраны наших природных богатств от их хищнического расточения, идея использования сырья до конца, идея возможного сохранения наших природных запасов на будущее. Эта идея позволяет максимально эффективно использовать производительные силы, открывая пути для приложения самых высоких технических методов и вместе с тем группируя предприятия не только по типу продукции, но по типу технологических процессов и свойствам местного сырья.

Таковы эти важные идеи, которые должен иметь в виду всякий полевой исследователь-геохимик.

Глава IV

СПЕЦИАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ПОИСКОВ

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящей главе мы намерены дать краткое изложение важнейших специальных методов геохимических поисков. Эти методы могут быть весьма разнообразными и специфическими и по мере развития геохимических и минералогических исследований будут развиваться и специализироваться. В их основе лежит изучение законов распределения элементов в земной коре, согласно данным В. М. Гольдшмидта¹. Две группы явлений опре-

¹ M. Goldschmidt. Geochemische Verteilungsgesetze. Oslo, 1923—1939, I—IX.

деляют пути миграции химических элементов: одни связаны со свойствами самого вещества и ведут к установлению поисковых признаков, основанных на физических, химических и минералогических свойствах природных соединений; другие кладут в основу изучение свойств среды и распределения тех специфических условий, которыми определяется концентрация или рассеяние элемента. В результате сочетание этих двух типов факторов ведет к установлению некоторых «физико-химических методов» поисков, принципы которых по отношению к солям были с успехом применены В. И. Николаевым и частично намечались А. П. Виноградовым. В. И. Николаев в 1937 г. писал:

«Геологическая разведка нефтяных и соляных месторождений обычно предшествует физико-химическим исследованиям. Не следует, однако, забывать, что со времен знаменитого Вант-Гоффа физико-химические исследования соляных месторождений приобрели совершенно особое значение и не только при разрешении вопросов, связанных с установлением характера солевых отложений, их происхождения, но и с нахождением способов их практического освоения.

Физико-химические исследования и, в частности, приложение физико-химического анализа к решению практических вопросов позволяют нам говорить о своеобразной «физико-химической разведке (вернее, геохимической)» природных богатств.

На Казахстанской сессии Академии Наук СССР отмечалось, что химия располагает своими поисковыми признаками, правильное использование которых может дать и дает уже положительные результаты как по линии обнаружения скрытых природных богатств, так и в смысле направления дальнейших поисковых работ.

В частности, в поисках калийных месторождений большую роль могут сыграть ионы калия, брома и борной кислоты, которые по справедливости можно назвать химическими поисковыми признаками».

На ряде конкретных примеров В. И. Николаев доказал, что путем ряда систематических анализов на калий, бром или борную кислоту можно оконтурить районы наибольшего обогащения и этим путем на основе диаграммы, «выражающей движение ионов калия и брома с изменением географических координат», говорить о наличии в глубинах солей калия и брома, как остаточных рассолов пермского моря (см. ниже, стр. 577)¹.

Еще глубже были поставлены эти задачи А. В. Казаковым² при изучении им фосфоритных фаций и генезиса природных фосфатов. Он подчеркивал значение при поисках комплексной методологии и сочетания палеогеографии, физической химии и геолого-геохимических исследований.

2. МЕТОДЫ ГЕОХИМИЧЕСКОЙ КОРРЕЛЯЦИИ

Вопросы геохимической корреляции элементов и минералов очень многообразны, так как, в сущности, к ним относится вся область установленных в минералогии и геохимии естественных ассоциаций и парагенезисов.

Всякий парагенезис является определенным закономерным сочетанием элементов и минералов, связанных с определенным типом химических процессов. И в этом смысле каждое сочетание в природе определенных комплексов подсказывает те элементы или полезные ископаемые, которые могут быть в данном парагенезисе встречены и, наоборот, эти же сочетания подсказывают и запрет, или, вернее, малую вероятность нахождения в данной области какого-либо вещества.

Достаточно, как особо очевидный пример, привести необходимость искать литий в сочетаниях альбита, кварца, светлого берилла и микроклина, как определенной парагенетической ассоциации геофаз F — G в гранитном

¹ В. И. Николаев, О. К. Янатьева и В. Д. Поляков. Физико-химическая характеристика районов соляных куполов Сталинградского края. Изв. Акад. Наук СССР, сер. хим., 1937, № 4, 857—869.

² А. В. Казаков. Сов. геол., 1938, № 6, 34—47.

пегматите, и столь же, следовательно, необоснованными и совершенно неверными будут поиски в тех же условиях руд никеля или хрома.

Поэтому мы ограничимся лишь перечислением некоторых типичных закономерных сочетаний:

Li — Be — B	V — U — Ra — (битумы)
Fe — Ba — Pb	Cr — Ni — Mg — Fe
F — Al — (P)	Fe — Co — Ni — Cr
Mg — Fe — Cr — (Ni)	Co — Ni — Fe — Mn
P — Ca — (TR)	Ni — Co — Fe
S — тяжелые металлы	Zn — Cd — Ga — Ge — In
S — Sr — битумы	Zn — Pb — Ag
Cl — Na — (K, Rb, Cs, Ca, Mg)	As — Au
Br — Cl — J — (Cs, Rb)	Sn — W — Li
Rb — Cs	Sb — As — S
Sr [SO ₄] — S — доломиты	Te — Au — Ag — Hg
Zr — Ti — (Nb, Ta)	J — Br — Cl
Nb — Ta — Ti — Zr	Cs — Rb — (Li)
Mo — W — (Sn)	Ba — [SO ₄] — (Pb)
Ag — Pb — Co	W — Sn — (Au)
Cd — Zn	Au — Ag — As — (Te)
K — Rb — Cs — (Li)	Hg — As — Sb
Ca — Na	Pb — (Zn)
Sc — Mg	Th — TR
Ti — Fe — (Ca)	U — Ra — (V, As, P)

Помимо вышеприведенной корреляции элементов, вытекающей из общих законов геохимического сочетания, мы имеем целый ряд частных случаев и частных закономерностей, которыми можно пользоваться в конкретной обстановке. Так, например, ряд авторов отмечает очень интересную корреляцию разных степеней окисления ванадия: V^{+5} связан с битумами, V^{+3} — с первичными силикатами, что дает возможность при поисках нефти по увеличению соотношения $V^{+5} : V^{+3}$ судить о повышенной роли и содержании битумов в породе¹.

Особенно интересным является использование корреляции стронция как поискового признака в Европейской части Союза и на Урале². Нет никакого сомнения, что целестин наравне с гипсом, каменной солью, ангидритом и медными соединениями принадлежит к наиболее характерным минералам отложений пермских морей. В. И. Николаев обратил внимание на то, что между составом Каспийского моря и его отложений и вероятным составом пермского моря и его отложений наблюдаются значительные различия, вызванные особенно большим содержанием хлористого натрия в отложениях пермского моря и накоплением сернокислых солей магния и кальция в каспийских отложениях. Это явление должно было закономерным влиять на содержание сернокислого стронция в пермских морях, большее по сравнению с Каспийским, что и подтверждено рядом анализов. Ввиду этого совершенно логичным является следующий вывод автора:

«Мы приобретаем в настоящее время право рассматривать не стронция как новый поисковый признак, который наряду с поисковыми элементами K и Br, а также бором, позволяет нам судить о природе и генезисе солевых отложений и природных вод и различать каспийские солевые отложения от пермских. Концентрации иона Sr, превышающие 0,02%, мы можем рассматривать как характеризующие явно пермскую

¹ В. П. Батурин. Доклады Акад. Наук СССР, 1938, XIX, № 6—7, 503—506.

² В. И. Николаев и С. К. Калинин. Стронций как один из химических поисковых признаков. Доклады Акад. Наук, СССР, нов. сер., 1938. XX, № 6, 465—466.

природу солевых осадков; концентрации же, не превышающие 0,01—0,02%, можно рассматривать как характеризующие каспийские осадки.

Такие водоемы явно каспийского происхождения, как озеро Балхаш, характеризуются концентрациями иона Sr, выражаемыми только тысячными долями процента. В рапе же оз. Индер и в водах ряда источников при оз. Индер мы находим содержание Sr от 0,02 до 0,08%, что уже указывает на их связь с пермскими соляными отложениями».

Нет никакого сомнения, что при дальнейших исследованиях и некоторые другие элементы смогут для отдельных районов получить значение поискового признака.

На основании приведенных примеров мы можем так формулировать понятие геохимической корреляции: под корреляцией мы понимаем вообще метод сопоставления по преимуществу осадочных (но можно говорить и о магматических и метаморфических) пород; в частности же будем называть геохимической такую корреляцию, которая основана на методах сопоставления содержания отдельных химических элементов.

Для осадочных пород применение каких-либо специфических показателей химического характера для параллелизации слоев в сложных свитах представляет огромный интерес и неоднократно выдвигалось разными исследователями, в особенности у нас в Союзе (Я. В. Самойлов «О руководящих химических элементах, аналогично руководящим ископаемым», 1913; А. Ф. Фиолетова в ряде очень интересных работ по глинам, 1925—1929; А. Везир-Заде и М. Мирчинк «Опыт корреляции нефтеносных толщ по углеродному коэффициенту»)¹. Значительный накопленный материал не позволяет пока наметить общие закономерности в этом очень сложном вопросе, тем более, что нет достаточно систематических анализов разрезов целых осадочных свит ни в вертикальном, ни в горизонтальном направлении. Тем не менее в принципе метод, конечно, заслуживает самого большого внимания геологов-стратиграфов, особенно при изучении угольных и нефтяных месторождений. Надо пожелать, чтобы такие великолепные работы, как корреляция нефтеносных пород Апшеронского п-ова по петрографическим и минералогическим признакам², были дополнены столь же систематически и последовательно проведенным методом геохимическим.

Как пример, приведу очень интересное исследование В. Левинсона и А. Кочкарева, в котором проводится мысль о стратиграфической корреляции по ванадию и, в частности, по степени его окисления³.

Авторы исходили из законов геохимического распределения V_2O_5 и V_4O_{10} в породах, причем первый относится к силикатным системам первичного характера, а второй связывается с органомогенным веществом: таким образом V_2O_5 может служить для корреляции, как вещество сильно дисперсное, второй, наоборот, как показатель битуминозности пород.

3. МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ РАССЕЯНИЯ

Уже вышеприведенный пример роли стронция, бора, брома, как поискового признака, нам показывает, что для поисков имеет особое значение характер распределения и рассеяния отдельных элементов.

Р а с с е я н и е может быть генетически двух типов: в одних случаях оно имеет вторичный характер и связано с механическим или химическим рассеянием ранее существовавшего месторождения — места концентрации; в других — имеет место первичное рассеяние данного элемента или

¹ В заграничной литературе геохимическая корреляция отмечается, например, в работах Лейта и Мида и др.

² В. П. Батурин и П. Губков. Микропетрографический метод параллелизации нефтяных отложений. Азерб. нефт. хоз., 1929, № 6—7, 10.

³ В. Левинсон и А. Кочкарев. Некоторые вопросы нефтяной геологии и редкие элементы. Азербайджанское нефтяное хозяйство, 1930, № 7—8, 74—89.

вещества. Задачей метода является выявление мест концентрации в такой первичной системе, что, по существу, связано с основными законами геохимического распределения.

А. Ореолы вторичного рассеяния

Рассеяние элементов и минералов в песках и россыпях связано с определенными территориями, причем границы рассеяния зависят от геохимических и геоэнергетических свойств данного соединения.

Н. И. Софронов на основании ряда экспериментальных работ пришел к интересным выводам, которые мы приводим по его статье¹:

1. Ореолом рассеяния месторождения мы называем зону элювия — делювия (в некоторых случаях аллювия), обогащенную ценным или характерным для месторождения элементом, вне зависимости от его состояния.

В указанный термин вкладываются, во-первых, понятие территориальное и, во-вторых, понятие динамики процесса перехода полезного ископаемого из состояния концентрации в месторождении во вторичное рассеянное состояние.

2. Важнейшими агентами образования и формирования «ореолов рассеяния» являются факторы гипергенного поверхностного выветривания.

3. Все «ореолы» могут быть классифицированы прежде всего по состоянию в них рассеянного элемента, а затем по генезису, понимая под этим временные отношения образований элювия — делювия, с одной стороны, и рассеиваемой фазы, с другой.

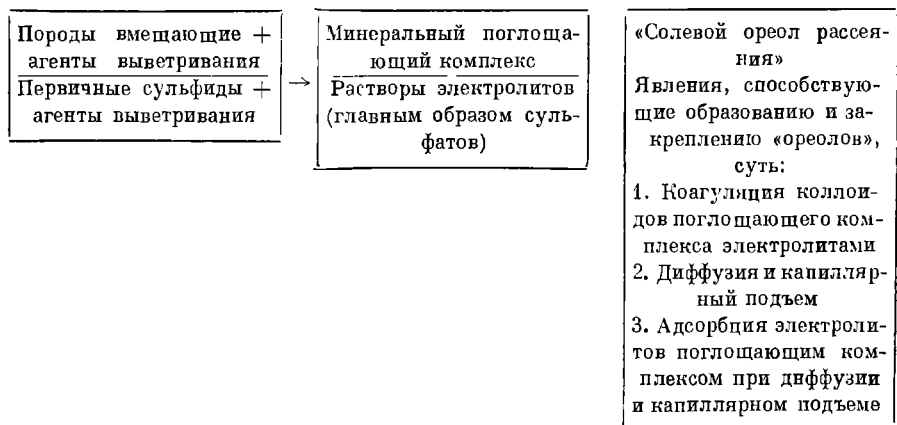
I. «Солевые ореолы рассеяния»

В указанных ореолах ценный или характерный элемент находится в виде новообразования, обычно в виде растворимой, устойчивой в зоне выветривания соли (например, в виде сульфата).

Законы образования «ореола» — химические и физико-химические.

«Солевые ореолы» характерны для легко изменяющихся в зоне выветривания месторождений (например, для сульфидных полиметаллических месторождений и мн. др.).

Схема образования типичного «ореола» сульфидного месторождения может быть представлена в следующем виде:



¹ Н. И. Софронов. К вопросу об ореолах рассеяния. Проблемы советской геологии, 1936, IV, 302—323.

С точки зрения генезиса можно различать:

1. Сингенетические «солевые ореолы». Поглощающий комплекс представлен алювием — делювием, образующимся одновременно с электролитами. В формировании и закреплении «ореола» на первых этапах главное значение имеет коагуляция коллоидов поглощающего комплекса катионами электролитов; в дальнейшем главная роль переходит к диффузии и капиллярному подъему, с сопутствующей им адсорбцией катионов.

С точки зрения поисков эти «ореолы» представляются наиболее доступными.

2. Наложенные «солевые ореолы». Поглощающий комплекс представлен алювием; растворы позднейшего, чем покров, образования. В формировании и закреплении «ореола» главнейшее значение имеют капиллярный подъем и диффузия, сопровождающиеся адсорбцией катионов.

С точки зрения поисков эти «ореолы» представляются менее доступными.

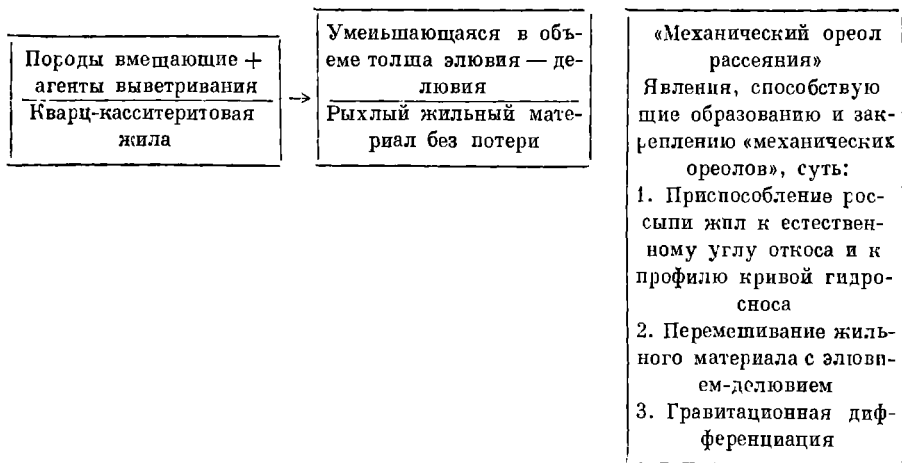
II. «Механические ореолы» рассеяния

В указанных «ореолах» ценный или характерный элемент находится в виде первичных минералов, устойчивых в зоне выветривания.

Законы образования «ореолов» — физические и физико-химические.

«Механические ореолы» характерны для месторождений, по минеральному составу представленных устойчивыми в зоне выветривания минералами (например для месторождений, несущих касситерит, вольфрамит, хромит, самородное золото, молибденит и т. п.)¹.

Схема образования типичного «механического ореола» кварц-касситеритового месторождения может быть представлена в следующем виде:



Среди условий формирования «механических ореолов» отметим, кроме изложенных:

1. Освобождение при выветривании рудных минералов из приконтактных с жилой областей боковых пород, где они обычно присутствуют или во вкраплениях, или в мелких жилках, иногда даже непосредственно

¹ О применении к поискам и разведке хромита см. Б. А. Андреев. Труды ЦНИГРИ, 1931, вып. 10, 34.

незаметных, являясь спутниками главной жилы. Освобождающийся ценный материал поступает на усиление «ореола».

2. Боковой снос или общее оползание элювия — делювия по склону, что приводит к деформации «ореола».

С точки зрения генезиса можно различать:

1. Сингенетические «механические ореолы». Выветривание вмещающих пород, приводящее к образованию элювия — делювия, и самой жилы, дающей россыпь жильного материала, происходит одновременно. Эти «ореолы» с точки зрения поисков являются наиболее важными.

2. Погребенные «механические ореолы». Покровные породы являются аллювием, издавна принесенным. «Ореол» образовался ранее или образуется под аллювием. С точки зрения поисков использование этих «ореолов» представляется делом наиболее трудным.

III. «Газовые ореолы рассеяния»¹

В указанных «ореолах» ценный или характерный элемент находится в виде газовой фазы. Законы образования «ореолов» химические, химико-физические и физические. «Газовые ореолы» особенно характерны для месторождений, несущих газ в качестве полезного ископаемого (гелиевые), в качестве неизбежного спутника (нефтяные) или в качестве продукта радиоактивного распада первичного вещества (уран-радиевые и ториевые месторождения).

Схема образования «газового ореола» может быть представлена, главным образом, как диффузное распространение газовых продуктов в среде первичных горных пород, откуда они поступают в элювий, или как вынос в водной среде в качестве своеобразных растворов.

С точки зрения генетической, «ореолы» газовых и нефтяных месторождений, очевидно, являются наложенными, в то время как «ореолы» радиоактивных месторождений могут быть и сингенетичными.

Общая характеристика вторичного рассеяния. Мы привели выше интересные идеи Н. И. Софронова; они, несомненно, заслуживают внимания, но требуют более конкретной проработки по отношению к отдельным геохимическим процессам.

Мы можем установить, что «механический ореол рассеяния» зависит от величины эков и энергии решеток соединения, так как чем выше энергия решеток, тем больше устойчивость и тем больше ореол сохранения минерала без изменения (см. стр. 660).

Отклонения от этой схемы вносятся механическими свойствами минералов (усиливающими в случаях трещиноватости истираемость).

Для «солевых ореолов» интересно отметить, что их величина связана с характером абсорбции и величиной поляризации ионов; особенно характерна последняя величина, несомненно определяющая степень поглощения и характер коагуляции (согласно В. Ноллю).

Конечно, практическое применение идеи ореолов должно быть детально геохимически изучено и проверено; по отношению к «солевым ореолам» особенно интересным является прослеживание содержания иона $[SO_4]$ в районе гипергенного изменения сульфидных месторождений; для

¹ Г. С. Чикризов. Газовая съемка. Разв. недр, 1938, № 7, 62—64.

«механических ореолов» мы можем наметить такой порядок уменьшения величины ореолов¹:

Алмаз	Циркон	Кварц	Рутил	Кассите- рит	Магне- тит	Шеелит	Гематит	Вольфра- мит
12	4	4	4	4	3,3	2,5	3,0	2,0

Отметим, что этот порядок идет в сторону понижения и среднего эка и века катионов. Дальнейшая проработка этой проблемы на основе идеи парагена, несомненно, сможет уточнить эти положения и дать более точные указания на методы поисков по ореолам на основе теории парагена и обосновать дальность переноса отдельных минералов.

Примеры изучения ореолов вторичного рассеяния

Поиски солей в низовьях Волги. Прекрасным примером применения методов геохимической разведки могут служить работы соляной экспедиции в Прикаспии летом 1937 г.² Было произведено опробование и точный количественный анализ в 20 скважинах и неглубоких местных «кудуках» (колодцах), причем выяснилось неодинаковое, но вообще повышенное содержание брома и особенно бора по сравнению с водой Каспийского моря. При этом высокое содержание борной кислоты (до 0,9%) отмечалось не только в глубинных скважинах (до 200 м), но и в неглубоких колодцах.

«При нанесении на карту точек с ясно выраженными указаниями на увеличенное содержание ионов калия и брома, а также борной кислоты в водах, намечается два района Приморской области, где одновременно можно предполагать наличие и калийных и боратных глубинных отложений.

На вопрос, каким образом воды артезианских скважин и колодцев накапливают столь значительные количества борной кислоты, можно ответить пока предположением, что на глубинах происходит размывание боратных отложений водами, обогащенными сернокислым магнием.

Все озера Приморского района как раз характеризуются высоким содержанием сернокислого магния в рассолах».

Таким образом, в результате произведенной геохимической работы были охвачены районы наиболее вероятных мест концентрации в глубинах солей калия, брома и бора.

Поиски коренных месторождений олова. Прекрасно разработан советскими работниками метод поисков коренных месторождений олова по рассеянным месторождениям; приводим выдержки из интересной работы Б. Л. Флерова³.

«Расстояние переноса касситерита от коренного месторождения, главным образом, зависит от продольного профиля долин. Чем уклон русла больше, тем большей будет живая сила потока, которая определяет размер и вес переносимых частиц породы. В районах с повышенным значением вертикальной эрозии... значительный уклон долин не дает возможности хрупкому касситериту, обладающему к тому же меньшим удельным весом, чем золото, давать крупные концентрированные россыпи. Большая его часть переносится на значительное расстояние и распыляется. Те же месторождения в условиях более спокойного рельефа... без сомнения, образовали бы россыпи с промышленным содержанием и запасом. Конечно, местные благоприятные условия отложения возможны и в горных районах, а следовательно, воз-

¹ А. Е. Ферсман. Геохимия, 1937, III, 321—350. Цифры под минералами дают средний параген по моим подсчетам.

² В. И. Николаев. О. К. Янатьева и В. Д. Поляков. Физико-химическая характеристика районов соляных куполов Сталинградского края. Изв. Акад. Наук СССР. сер. хим., 1937, № 4, 857—869.

³ П. М. Озеров. Станометрическая съемка как поисковый метод. Разв. недр, 1937, № 24.

Б. Л. Флеров. Применение оловометрической съемки при поисках коренных месторождений олова. Редкие металлы, 1935, № 1. Б. Л. Флеров. К методике поисков коренных месторождений олова. Сов. геол., 1938, № 10, 63—81.

можны в этих районах и россыпные месторождения касситерита, особенно при наличии крупных коренных объектов.

На образование россыпи влияют характер распределения касситерита в жильной породе и состав последней. Чем крупнее скопления касситерита или его отдельные зерна, тем концентрированнее и ближе к месторождению должна быть россыпь. Наиболее благоприятно для образования россыпи неравномерное распределение касситерита в жильном теле, при котором образуются крупные галечки большого удельного веса. Мелко вкрапленный касситерит, наоборот, будет переноситься дальше как из-за своего меньшего размера, так и потому, что отделяется он от жильных минералов на большем отрезке пути, чем крупные сростки. Сульфидные жилы с микровкрапленностью касситерита россыпей, как правило, вовсе не дадут.

При крупных сростках касситерита для образования концентрированной россыпи необходимы крепкие жильные минералы. Если последние легко выщелачиваются и разрушаются, в сростках касситерита не будет связи, и они распадутся на отдельные мелкие зерна. Вкрапленный в жильном теле касситерит, ассоциирующийся с твердыми минералами, будет отделяться на большем отрезке пути и даст распыленную россыпь.

В этом случае более благоприятна ассоциация с мягкими минералами, от которых касситерит освобождается быстрее, однако чересчур неустойчивые жильные минералы будут способствовать переизмельчению касситерита еще в делювии» (1938, стр. 64).

«Спутники касситерита самостоятельными поисковым признаком не являются. Касситерит в большинстве месторождений имеет достаточный размер, и потому, если он присутствует в месторождении, то будет присутствовать и в шлихе. Исключение дают только сульфидные жилы с микровкрапленностью касситерита. В этом случае поисковым признаком являются сульфиды или продукты их изменения, если в них констатировано олово, хотя бы качественно.

Минеральные ассоциации в шлихе могут дать указание на тип месторождения. Ассоциация касситерита с сульфидами указывает на гидротермальные месторождения, с топазом — на пневматолитовые, с тапталом-ниобатами — на пегматитовые. Светлый игольчатый турмалин очень характерен для многих месторождений, переходных от гидротермальных к пневматолитовым. Темный турмалин является скорее косвенным признаком, он чаще образуется в более раннюю фазу, чем касситерит. Зеленый хлорит на северо-востоке Союза часто ассоциируется с касситеритом и, повидимому, заменяет турмалин в тех месторождениях, где в эволюциях отсутствовал бор. Ассоциация касситерита с альбитом, ортоклазом и мусковитом может указывать как на пегматитовый, так и на пневматолитовый тип, с адуляром — на гидротермальный. Вольфрамит и шеелит нередко ассоциируются с касситеритом в месторождениях переходного типа, но чаще встречаются пространственно отдельно от него и потому не характерны. Моначит может относиться как к жильным образованиям, так и к самому гранитному массиву и также не характерен.

Золото в шлихах некоторых районов нередко ассоциируется с касситеритом, но вблизи месторождения последнего обычно отсутствует. Однако в сульфидных месторождениях и в некоторых габбиссальных условиях они могут встречаться вместе.

На тип коренного месторождения указывает также форма кристаллов касситерита»¹. (там же, стр. 71).

Образование ореолов рассеяния касситерита. При разрушении коренного тела часть касситерита освобождается от жильной породы еще на месте около самого выхода, другая часть выпадает из обломков при движении их вниз по склону и третья часть в виде сростков с пустой породой доходит до подножия склона. Освобожденный от жильной породы касситерит движется вниз вместе с делювием и под влиянием гравитационной дифференциации стремится проникнуть в нижние его слои.

... Чем угол склона меньше и мощность делювия больше, тем глубже располагается обогащенный слой. Кроме того, глубина его залегания зависит от состава делювия.

Часто можно встретить склоны, покрытые щебеночным материалом или гранитной дресвой. Касситерит через эти рыхлые слои легко опускается до более плотных слоев делювия или даже до коренных пород. Наиболее благоприятным для концентрации касситерита материалом является плотный глинисто-песчаный или глинисто-щебенчатый материал. В таком материале касситерит наблюдался нами почти у поверхности. Касситерит в делювии находится также в виде мелких обломков и сростков, которые имеют небольшой удельный вес и будут располагаться выше, чем мономинеральные зерна касситерита. Распыленный касситерит попадает и в верхние слои делювия, кроме, конечно, растительного слоя. Мощность обогащенного слоя, по наблюдениям автора, измерялась несколькими десятками сантиметров.

В плане ореол рассеяния, повидимому, имеет форму веера с небольшим расширением книзу. В силу рассеяния касситерита в массе делювия содержание его в ореоле

¹ См. ниже, стр. 706 — 707.

меньше, чем в коренных телах, и при удалении от коренного источника вниз по склону или к краям ореола должно уменьшаться. Наибольшее количество касситерита будет наблюдаться непосредственно около жилы, где степень разубоживания жильного материала незначительна. В этом месте обогащенный слой спускается до коренных пород» (Там же, стр. 75—76).

«Содержание олова в ореолах в количестве уже 0,01% надо считать хорошим поисковым признаком. По данным геофизического сектора ЦНИГРИ, в некоторых месторождениях ширина обогащенного ореола поперек простиранию жилы измерилась 25—30 м» (Там же, стр. 77).

С. Г. С а р к и с я н на основании работ в Забайкалье считает, что касситерит сильно механически разрушается и не выдерживает переноса дальше 0,5—2 км от коренного месторождения.

Б. Ореолы первичного рассеяния (ареалы распространения)

Всякое образование мест концентраций какого-либо минерала или химического элемента связано с определенным геохимическим процессом осаждения твердого (по большей части) вещества из более дисперсной — жидкой или газообразной системы. Это осаждение требует для начала кристаллизации определенных условий температуры, давления, химизма пород и охватывает поэтому определенный отрезок времени в ходе процесса и определенный район — ореол, или, вернее, ареал распространения данного соединения. Максимальная концентрация вещества наблюдается лишь в определенных участках, тогда как вокруг самого месторождения мы наблюдаем ореол первичного рассеяния¹. Это типично для хромита, магнетита и титаномагнетита, если говорить о высокотемпературных процессах, для оловянного камня или медных руд — для температур более низких. Поскольку обычно места наивысшей концентрации связаны с рассеянными рудами постепенными переходами, для поисков центров кристаллизации возможно использовать точную съемку ореолов рассеяния, чтобы, проводя изолинии равного содержания данного вещества или элемента, подойти прежде всего к выяснению направления, в котором идет увеличение концентрации, а затем и к отысканию наиболее богатых участков поля. Такой метод очень широко применялся, особенно в американской практике, где он получил даже различные названия в зависимости от природы металла — купрометрический, станнометрический и др. В основу его кладется массовое опробование на данный элемент образцов, взятых в определенной системе по сетке как горизонтальной, так и вертикальной.

Соединив точки равного содержания элемента, получают изолинии, намечающие в пространстве трех измерений те части месторождения, которые наиболее богаты данным элементом².

Такие методы геохимической съемки, как было указано на стр. 556, имеют большое значение не только для практических задач поисков, но и для решения ряда важных теоретических проблем (истодика китайских исследователей Шу и Ли).

Однако массовое опробование и составление геохимических карт может получить еще дальнейшее развитие путем составления так называемых *и н е р л о г и ч е с к и х* карт, т. е. диаграмм распределения в пространственной сетке определенных минералов, а не химических элементов.

¹ Интересно, что об ореолах первичного распространения элементов вокруг гранитных массивов говорил еще Э л и де Б о м о н (1847), называя его «ауга granitica».

² Нередко этот метод называют «геометрическим». См. главу о картировании, стр. 556.

Теоретический анализ ореолов первичного рассеяния

Геохимический анализ¹ дает в общих чертах освещение и объяснение процессам рассеяния, намечая те типы атомов и типы соединений, которые обладают наибольшей подвижностью и в общем должны чаще всего встречаться в больших ореолах. Детальный анализ этого явления см. на стр. 471 (гл. I). Мы отметим только, что в общем наибольшей подвижностью должны обладать соединения с ионами больших радиусов и малых энергетических показателей (эков и эквов), т. е. ионы низкой валентности, частично ионы комплексные с большими радиусами. Примером могут служить:

Cs — катион одновалентный, с самым низким для катионов эком и эквом 0,30 и с очень большим радиусом 1,65 Å;

[NO₃] — анион одновалентный, с очень низким эком и эквом 0,19 и с радиусом 2,57 Å.

Исходя из этих положений, мною было намечено выражение $D \frac{R}{w}$, которое определяет относительную способность иона и его дисперсии к его максимальному отделению от первичных магматических очагов. Как пример, D для Na = 0,98, для Cs = 1,65; в группе металлов D цинка = 0,21, D кадмия = 0,26. Более детальное и углубленное исследование этой величины необходимо.

В. Комбинированные районы первичного и вторичного рассеяния

Наравне с указанными двумя крайними случаями — первичного и вторичного рассеяния элементов — мы наблюдаем и комбинированные районы, в которых вообще в результате той и другой причин наблюдается общий недостаток или же избыток какого-либо элемента. Такие районы дефицитного или избыточного сырья детально изучаются с общей хозяйственной, медицинской и геохимической точки зрения А. П. Виноградовым. Для нас в данном случае имеют значение лишь большие положительные величины кларков какого-либо элемента в данном районе. Такие повышенные величины, например, для ртути, железа, лития, могут служить наведением на общее обогащение данного района и направить поиски в определенном направлении. Впрочем и отрицательные величины кларков² также должны учитываться при внимательном геохимическом анализе; например, отсутствие в водах района иона [SO₄] позволяет ожидать наличия нефти или битумов, с одной стороны, и может вести к обогащению вод радием и мезоторием, с другой; пониженное содержание в водах кальция и магния, особенно в нефтеносных районах, позволяет ожидать повышенного содержания солей и бора и т. д.

Приложение

ИЗУЧЕНИЕ ПРИРОДНЫХ ЭМАНАЦИЙ ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМ РАСТВОРОВ И РАССОЛОВ

В минералогии мы изучаем лишь минералы, т. е. такие соединения, которые обладают относительной устойчивостью и сохраняются как более прочные кристаллические системы наибольшей энтропии и наивысшей симметрии. Однако геохимические процессы, по существу, не ограничиваются этими конечными фазами химических

¹ А. Е. Ферсман. Геохимия, 1937, III, 451.

² Мы называем положительными кларками величины больше среднего кларка земной коры, отрицательными — величины ниже среднего кларка.

процессов, и в промежуточных состояниях мы можем ожидать встретить гораздо более сложную картину растворов и газовых возгонов, чем дают твердые вещества. Более сложной эта картина может быть и по внешнему виду, и по типу показаний, и по комплексобразованию и т. д. Так, если мы говорим о титане, то должны учитывать существование в природе временных соединений TiF_4 и $TiCl_4$, значение которых для миграции титана очень велико. Мы поднимаем вопрос, следовательно, об изучении несуществующих минералов, о геохимии и минералогии временных газовых или жидких систем, что может иметь большое значение при поисках.

В сущности, эта идея возвращает нас к вопросу об изучении прежде всего газовых эманаций, столь блестяще начатом Эли де Бомоном и развитом Вернадским, Лакруа, Замбонини, Каробби и получившем разрешение в работах Геофизической лаборатории Карнеги на Алеске (Катмай). Необходимо провести эти исследования и у нас на Камчатке и на Кавказе.

Равным образом мы ставим вопрос об изучении рудничных вод, как ювенильных, так и вадозных, причем считаем заслуживающим интереса не только их химический характер, но и тип тех сочетаний, которые для них характерны.

Идя по этому пути (В. И. Вернадский), мы можем получить совершенно новые представления о ходе геохимических процессов и в составе растворов и газовых эманаций найдем ряд ценных паведений на поиски полезных ископаемых, особенно редких металлов.

4. ОСОБЫЕ МЕТОДЫ ПОИСКОВ

Остановимся на некоторых особых методах поисков, в основе которых лежат наблюдения над характерными явлениями, сопровождающими окисление сернистых руд или вторичную миграцию и перемещение соляных комплексов, а также наблюдения над такими свойствами окружающей среды, как pH , pH и т. п.

Поиски на основе изучения процессов окисления

Процессы окисления сульфидных жил, линз или других крупных скоплений сернистых соединений служат очень важным диагностическим признаком, о чем будет речь в гл. V, стр. 653. При этом специфичность указанных процессов настолько велика, что позволяет применять к их анализу ряд особых геохимических и геофизических методов.

Большой специалист по процессам окисления С. С. Смирнов¹ широко применил анализ структур вторичных минералов, особенно лимонита, образующих псевдоморфозы по разнообразным сернистым соединениям. Детально изученные типы строения вторичных минералов (форма, размер и характер ячеек, пористость, структура, тип и цвет лимонита и т. д.) подсказывают природу первичного минерала (особенно пирита, халькопирита, пирротина). Использование этих данных может широко применяться особенно при поисках руд Cu , частично Zn и Pb .

Всем, кто работает в области железных шляп, надо рекомендовать изучить эти вопросы по оригинальным работам.

Поиски по термическому эффекту

Процессы окисления сульфидных минералов носят резко экзотермический характер, ввиду чего Н. И. Софронов предложил в таких районах обратиться к изучению термических свойств месторождения. По существу эта методика заслуживает большого внимания, но пока остается без экспериментальной проработки.

¹ С. С. Смирнов. Зоны окисления сульфидных месторождений. ОНТИ, 1936, особенно стр. 123—127.

Поиски по химизму вторичных процессов

Специфические особенности зон и шпал окисления позволяют при их изучении использовать прежде всего повышенную их кислотность, т. е. низкий рН водных растворов, что может служить хорошим поисковым признаком. Равным образом, очень важным признаком при исследовании железных шпал является повышенное содержание в водах иона $[SO_4]$, ореол рассеяния которого в иных случаях довольно велик и позволяет оконтуривать районы концентрации первичных сернистых соединений.

Поиски солей на основе их вторичной миграции

Изучение месторождений боратов в Западном Казахстане привело к ряду очень интересных выводов, имеющих значение для дальнейших поисковых работ. Скопление «первичных» солей бора в основном приурочено к последним продуктам кристаллизации — к калиевым солям. При дальнейшем размывании этих скоплений соли калия легко вымываются, тогда как соль бора испытывает метаморфизм, особенно под влиянием солей Ca и Mg, и накапливается, давая более трудно растворимые соединения; при этом отношение $R_2O_3 : RO$ падает с 1,67 до 1,5, 1,25 и ниже (под RO подразумевается Ca и Mg).

Таким образом, поиски боратов в осадочных образованиях необходимо вести по размытым калийным структурам и, наоборот, по нахождению боратов — искать в глубинах или в более защищенных от вод местах калиевые месторождения. Эти выводы несомненно заслуживают большого внимания и служат прекрасным примером углубленного анализа геохимических признаков и их применения к поисковой работе.

Применение редокса гН (окислительно-восстановительного потенциала)

При приближении к районам выхода нефти и летучих углеводородов резко изменяется гН; по мере приближения имеет место увеличение восстановительной обстановки, которое может быть точно измерено. Такие исследования проведены были Институтом горючих ископаемых Академии Наук СССР на кавказской линии грязевых вулканов¹:

«Знакомясь ближе с окислительно-восстановительными условиями в кратере грязевого вулкана, мы заинтересовались вопросом, как изменяется гН жидкой брекчии на разных глубинах, по мере приближения к очагу вулкана.

Внимательное рассмотрение полученных данных приводит нас к заключению о наличии здесь определенной закономерности, которая может быть выражена следующим образом.

Образцы жидкой брекчии, отобранные из кратера грязевой сопки, в которой или в непосредственной близости от которой (на расстоянии не более одного километра) имеются проявления жидкой нефти, показывают, как правило, с возрастающей глубиной отбора падение гН, т. е. увеличение восстановительной интенсивности (в 9 случаях из 11 исследованных). В вулканах, вокруг которых в зоне указанного сейчас радиуса жидкой нефти нет², такой закономерности не наблюдается (в 6 случаях из 8).

В результате поставленных нами определений гН в коренных породах по линиям приближения к вулкану намечались изменения этой величины, различные для объектов, приуроченных к месторождениям нефти промышленного значения, и для сопкок, не находящихся в непосредственной связи с зонами большого нефтенасыщения. В первом случае мы имеем по мере приближения к ядру вулкана правильное повышение

¹ И. М. Губкин и С. Ф. Федоров. Грязевые вулканы Советского Союза. Изд. Акад. Наук СССР, 1938, 33—34.

² Асфальтизированные битумы могут присутствовать.

восстановительной интенсивности в коренных породах, отобранных не только по одному и тому же пласту свиты, но и принадлежащих к разным пластам ее. Во втором эта тенденция наблюдается только по простиранию одной и той же узкой стратиграфической единицы или не наблюдается вовсе. Соотношения эти, ясно проявляющиеся в нескольких исследованных нами типичных случаях (Лок-Батан, с одной стороны, Тюльки-тапа, Булганакские сопки — с другой), вследствие ряда не зависевших от нас причин не могли быть прослежены до сих пор на массовом материале, достаточном для их окончательного установления».

Таким образом, наблюдения носят еще предварительный характер.

Тем не менее сам метод по существу заслуживает большого внимания. Окислительно-восстановительный потенциал, несомненно, в будущем явится довольно серьезным признаком при поисках полезных ископаемых, вызывающих восстановительные процессы (нефти, углеводородные газы, жидкие и твердые битумы, в меньшей степени угли). Однако непосредственное определение величины редокса возможно лишь при исследовании жидких и газовых фаз и гораздо труднее при изучении твердого вещества.

Но, помимо непосредственного определения редокса, возможны и косвенные заключения о его приблизительных величинах на основе анализов геологических разрезов и их фациального изменения. Так, например, изучение морских осадков и соотношения и распределения в них закиси и окиси железа позволяет сделать выводы о распределении редокса в морском бассейне и этим путем наметить и направление поисков; понижение pH ведет, например, к образованию силикатных руд железа (типа шамозита, турингита), препятствует осаждению MnO_2 и т. д.¹

Применение определений pH

Широкое и продуманное определение величин pH в интересах поисковой работы еще не ставилось и по существу самой проблемы связано с рядом трудностей. Прежде всего, определение величины pH в растворах современных вод говорит лишь о кислотности и щелочности современных процессов и потому геохимически может быть приложено лишь к определению хода таких процессов, как окисление и образование железных шпал, процессов в коре выветривания и т. д. Даже по отношению к анализу древней коры выветривания использование современных данных должно вестись весьма осторожно. Тем не менее определение pH в современных процессах дает очень важные наведения геохимии; так, при низких и очень низких pH (3—5) мы должны ожидать разложения алюмосиликатов с накоплением глины; в рудных месторождениях — выпадения окр тяжелых металлов (W, Mo), образования свободной серной кислоты, с вытеснением CO_2 , с одной стороны, и коагуляцией SiO_2 в опалы и полуопалы, с другой. К сожалению, до сих пор эти проблемы еще не заострены и не изучены геохимиками, и лишь интересные работы Н. И. Хитарова 1938 г. показывают, какую огромную роль играет pH в миграции, например, молибдена в гипергенной обстановке; между тем образование очень низких pH связано с двумя важнейшими процессами: окислением залежей самородной серы и сульфидных месторождений².

Иной тип миграции элементов мы наблюдаем в областях с высоким и очень высоким pH (9—14). Здесь имеет место вынос SiO_2 , с накоплением

¹ См. работу В. В. Щербины о парагенезисе сернистых соединений: окислительно-восстановительный потенциал в применении к изучению парагенезиса минералов. Доклады Акад. Наук СССР, 1939, XXII, № 8, 508—510.

² См. по этому вопросу работы И. Д. Седлецкого о зависимости типа образуемых глины и их свойств от pH.

Fe_2O_3 , MnO_2 , отчасти Al_2O_3 (последнее при не очень высоком pH), в рудных комплексах наблюдается вынос щелочными растворами Mo, W, в районах накопления битумов — извлечение части органических веществ и т. д.¹

Но наравне с этими явлениями, связанными с современным воздействием растворов определенной кислотности или щелочности, мы имеем возможность косвенно судить о величине pH разных геологических процессов и учитывать его величину, исходя из палеогеографических и геологических представлений. Так например, нам известно, что с определенными зонами морских глубин связаны определенные величины pH, а именно:

Зоны	Глубина в м	Температура в °C	pH
1	0—50	20	8,15
2	50—500	20—7	8,1—7,7
3	500—1500	7—4	7,7—8,0
4	Свыше 1500	4	8,0
5	Придонная	Около 0,5	7,95

По палеогеографическим данным мы можем определить, к какой из перечисленных зон относится исследуемый осадок, а следовательно, учитывая природу бассейна, вывести вероятные величины pH для данной породы в момент ее образования; отсюда можно сделать ряд выводов о вероятном накоплении тех или иных минералов или полезных ископаемых. Так, применительно к указанной схеме мы можем ожидать скопления фосфоритов в зоне 2 при pH наиболее низком, близком к нейтральности (7,7).

Более углубленное использование pH возможно, однако, лишь на основе постановки соответственных экспериментальных работ.

Биохимические (ботанические) методы

Уже давно было известно что характер растительного покрова и отдельные виды растительности могут служить индикаторами при поисках и разведках. Этот вопрос вновь был поставлен в качестве практического метода для поисково-геологической работы С. М. Ткаlichem в 1938 г. Ссылаясь на довольно обширную литературу, он напомнил о существовании специальных видов фиалок, связанных с богатыми цинком почвами (галмейная фиалка), о специфическом развитии некоторых трав в районах, богатых свинцом, и, в частности, об известных исследованиях Франца Унгера в 1836 г., установивших различие растительных покровов на кремнистых или известковых почвах. Эти специфические особенности растительного покрова были подчеркнуты мною в 1909 г. при изучении минералогии о-ва Эльбы, так как там вполне ясно наметилось резкое различие в характере растительного покрова в районах змеевиков, с одной стороны, и прорезающих их гранитных массивов, с другой. Не надо было быть ботаником, чтобы подметить это чисто внешнее резкое различие.

Вопрос об использовании растений в качестве индикаторов неоднократно поднимался исследователями угольных районов. Так, Ю. А. Жемчужников в ряде случаев отмечал специфический характер растительного покрова в районе выходов угленосных отложений. Инж. Пвашкевич при

¹ О величине pH в разных геохимических системах см. А. Е. Ферсман, Геохимия, 1937, III, 424—426.

картировании сахалинского угленосного поля обратил внимание на то, что районы, слагаемые меловыми породами, покрыты по преимуществу таежным хвойным лесом, тогда как в предгорьях и на равнинах, сложенных третичными и угленосными отложениями, преобладает лес смешанный — из березы, ольхи и ели.

В работах по изучению апатитовых месторождений в Хибинских тундрах было обращено большое внимание на характер растительного покрова. Совершенно несомненным является то, что в долинах, связанных с размытием апатитовых пород, растительность развивается гораздо пышнее, чем в аналогичных условиях, но при отсутствии обогащения фосфором. Намечалось различие и в характере лишайников, растущих на простых нефелисиенитах и на апатитовой породе, однако это различие, по существу, носило скорее количественный, чем качественный характер.

С. М. Ткалич в своей работе указывает, что с точки зрения поисковика растения-индикаторы можно разделить на две группы.

В одних случаях растения служат прямыми индикаторами, непосредственно указывающими на присутствие того или иного вещества. Таковы, например, солянка, свидетельствующая об обогащении почвы хлористым натрием, *Viola zincifera*, указывающая на обогащение цинком, обилие сфагнома, говорящее о залежах торфа и т. д.

К косвенным индикаторам С. М. Ткалич называет менее постоянные, специфические для данного района растерия и растительные сообщества, которые при определенном биогеохимическом подходе могут несомненно служить полезным признаком при поисках.

Нет никакого сомнения в том, что именно методы биогеохимии могут в этом отношении дать очень ценный материал, показательный для распространения в данных районах того или иного химического элемента в большом количестве. Корни растений в зоне ореола рассеяния какого-либо месторождения несомненно будут поглощать соответствующий элемент в повышенном количестве, и зола растений может служить индикатором для этого процесса.

С. М. Ткалич приводит следующие четыре тезиса в этом вопросе:

1. Если и не существует строгой пропорциональности между концентрацией солей, содержащихся в почвенных растворах, и их концентрацией в растениях, то все же в растениях будет наблюдаться более повышенное содержание указанных солей.

2. При прочих равных условиях содержание одних и тех же солей в двух одинаковых растениях, но одного — выросшего в зоне ореола рассеяния, а другого — вне его, будет различным.

3. Наличие в золе растений заметного количества какого-либо элемента может быть избирательным, и поэтому всегда требует сравнения содержания этого элемента в том же виде растений, но в другом районе.

4. Наиболее благоприятным объектом для получения надлежащего анализа золы следует считать органы растений, наиболее богатые золой, в частности листья.

Аналогичные идеи были высказаны еще 15 лет назад при изучении Южной Ферганы С. П. Александровым.

В последнее время аналогичные методы применялись в Швеции Брундингом и Пальмквистом при изучении золы листьев на Au, W, Mo, Sn и др. Повидимому, их опыты дали положительные результаты в таежных северных районах Швеции.

Более систематически эти идеи были проггерсны С. М. Ткаlichem. Примененный им метод заключался в следующем:

Вкрест простираня рудного тела было разбито несколько линий на

расстоянии 30—35 м друг от друга. Через равные промежутки собирались листья растений, пользующихся наибольшим распространением на площади месторождения. В золе этих листьев определялось содержание искомого элемента, в данном случае железа. Точки, в которых были взяты листья для анализа, нанесены были на план, причем ввиду сложности количественного анализа данной проблемы пользовались условными количественными выражениями среднего содержания соединений металла: отсутствие, следы, присутствие, обилие. Точки с одинаковыми значками дали возможность провести соответственные изолинии и подойти к вопросу о центрах рассеяния данного химического элемента.

В данном случае разбиты были три линии, а в качестве индикаторов были выбраны листья вейника (*Calamagrostis*). Зола собранных растений анализировалась на окись и закись железа. Полученная диаграмма указывает, что растения, выросшие близ штольни верхней жилы, а также в районе нижней штольни по главной жиле, действительно содержат большее количество железа в своей золе. В районах, удаленных от месторождения, количество железа меньше.

Хотя опытная проверка предложенного метода и не дала очень четких материалов, тем не менее по существу сама методика заслуживает очень большого внимания.

Процессы биогеохимические, по данным В. И. Вернадского и А. И. Виноградова, очень чутко отражают изменение в составе той среды, в которой произрастают те или иные виды растений. Клетка является очень тонким индикатором, показывающим избыток или недостаток того или иного химического элемента, и блестящее исследование А. П. Виноградова по установлению определенных биогеохимических провинций доказало, что этим путем можно подойти к решению ряда практических задач. Мы подчеркиваем, таким образом, роль биогеохимического исследования в вопросах поисковой работы и думаем, что в этом направлении должны быть проведены еще дальнейшие исследования в конкретных условиях отдельных месторождений.

Главнейшая литература

Е. Успенский. Железо, как фактор распределения водорослей. Тр. Ботанич. инст. М. — Л., 1925.

5. МЕТОДЫ ВИЗУАЛЬНОЙ АЭРОСЪЕМКИ

Среди геохимических и минералогических признаков, доступных наблюдению при применении аэросъемки в поисковых работах¹, особо выделяются два признака: цвет и устойчивость по отношению к выветриванию. Как мы видели в гл. II, оба эти признака, по существу, связаны с природой строения кристаллических решеток: устойчивости минералов или пород при разрушении в природе отвечает стойкость решетки по отношению к ее разрушению механическими, химическими или физико-химическими факторами. В работах по оконтуриванию нефтеносных горизонтов как у нас, в Туркмении, так и в Калифорнии широко используются специфические цвета той серии пород, в которых залегает нефть. Очень хорошо оконтуриваются на фотосхемах визуальнo рудные, особенно кварцевые жилы; последние нередко характеризуются своей устойчивостью в рельефе

¹ А. В. Гавеман. Аэросъемка и исследование природных ресурсов. Изд. Акад. Наук СССР, 1937, 185—233.

А. Е. Ферсман. Аэросъемка в изучении геологических и геоморфологических проблем. Природа, 1930, № 3, 325—326.

и легко протягиваются на большие расстояния, причем все тектонические сдвиги и даже сбросы намечаются, особенно в районах без растительного покрова, с особой резкостью. Рудные жилы или линзы, богатые сульфидами, выделяются по своим бурым и ржавым тонам, образующим нередко определенные шлейфы; очень резко выделяются белыми полосами выходы серы, квасцов, алунита.

Рудные жилы с большим содержанием гематита и красного доломита в Канаде лучше всего устанавливаются с самолета, что и привело к открытию новых жил урановой смолки около Медвежьего озера.

Области, наиболее удобные для аэросъемки в целях поисков, — это голая, обнаженная тундра, районы коренных пород в пустынном климате и горные районы выше лесной зоны.

6. ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОИСКОВ¹

В мою задачу не входит детальная характеристика поисковых геофизических методов, которые в последние годы столь широко применяются для поисков и разведки месторождений, так как для них уже имеется ряд исследований и практических руководств. Каждый год приносит успехи в их развитии, а область их применения значительно расширяется, давая возможность предсказывать те или иные образования под весьма мощным покровом наносов, галечников, почв, тундр, песков, лесов и т. д.

Я хотел бы обратить внимание на то, что несмотря на название «геофизические», эти методы являются по существу методами геохимическими, так как в целях поисков и разведки используются отдельные геохимические, кристаллохимические и минералогические свойства руд и отдельных их компонентов. Поэтому дальнейшие успехи применения и уточнения геофизических методов будут лежать не только в развитии самой методики и усовершенствовании приборов, но и в детальном и научном изучении тех характерных свойств отдельных минеральных тел, которые служат предметом наблюдений при геофизической разведке.

В основе применения геофизических методов лежат пять характерных методов:

1) геотермика, 2) сейсмометрия, 3) гравитация, 4) электрометрия и 5) магнитометрия.

Методы геотермики основаны на различной теплопроводности пород и минералов, а также на анализе физико-химических процессов, идущих в земной коре и сопровождающихся выделением или поглощением тепла.

Таким образом, пользование этим методом требует очень углубленных знаний собственно теплопроводности как отдельных минералов, так и пород, а также геохимического изучения тепловых процессов, сопровождающих те или иные природные реакции. Ни по тому, ни по другому вопросу до сих пор нет достаточных экспериментальных исследований, а поэтому геотермический метод, хотя и представляет значительный интерес, пока не может дать однозначного ответа на целый ряд вопросов поисковой работы².

Сейсмометрия³. За последние годы сейсмические методы разведки и поисков получили огромное развитие, и нет никакого сомнения,

¹ В. А. Сельский. Развитие прикладной геофизики. Труды Сейсмол. ин-та, 1938, № 79 (9).

² С. М. Красковский. Обзор главнейших результатов геотермических измерений. Изв. Геогр. об-ва, 1938, № 4—5, 612—628.

³ Г. А. Гамбургцев. Сейсмические методы разведки. ОНТИ, 1938.

что в будущем, с дальнейшим их уточнением, они в состоянии будут дать еще гораздо более ценные выводы. В основе этих методов лежит использование способности горных пород к распространению с различной скоростью колебательных движений. Анализ этих механических колебаний позволяет судить в общих чертах о типе породы и особенно об их смене. Отметим, что в гранитах и кристаллических сланцах такие продольные колебания распространяются со скоростью 4,5 и 6,5 км/сек; несколько ниже она в известняках (3,5 и 5,5 км/сек), еще ниже в песчаниках (1,5—3 км/сек) и т. д.

Нет никакого сомнения, что для дальнейшего успеха применения сейсмометрии (при большой заманчивости этой методики) необходимы точные знания распространения упругих колебаний как в отдельных минералах, так и в горных породах¹, — вопрос, до сих пор еще очень мало изученный. Кристаллофизика за последние годы совершенно забросила изучение механических свойств кристаллических веществ; а между тем, успехи сейсмометрии в дальнейшем будут зависеть от того, насколько теоретически обоснованными явятся результаты изучения упругих свойств самих минералов и горных пород.

Г р а в и м е т р и я. Значительно более точными и практически особенно интересными являются методы гравиметрии. В основе их лежит различие в удельных весах вещества, т. е. один из тех поисковых признаков, о которых мы писали на стр. 493 и которые, при большом различии (от 1 до 20) и при очень значительной точности приборов для измерения сил тяжести, дают возможность решать ряд серьезнейших задач геологического и геохимического характера.

Методика гравиметрии позволяет резко наметить границы между такими породами, как гнейс с удельным весом 2,6—2,7, и известняками с удельным весом 2,8—2,9. Уже это различие в 0,1—0,2, лежащее в основе химического состава названных комплексов, совершенно достаточно, чтобы точно оконтурить границы между указанными двумя химическими системами.

Особенно важно применение методов гравиметрии там, где мы имеем дело с наличием резкого различия в удельных весах. Отсюда наиболее характерными являются поиски и разведки месторождений солей, с одной стороны, и железных руд — с другой. Весьма вероятно, что методы гравиметрии с успехом будут применены к поискам хромитовых линз и месторождений.

Удельные веса минералов и горных пород изучены в настоящее время достаточно точно и, таким образом, дают возможность обосновывать гравиметрические методы точными данными минералогии. Конечно, трудности заключаются в том, что природные комплексы состоят из минералов разных удельных весов, что нередко выравнивает резкие колебания и приводит к некоторым средним, не позволяющим методами гравиметрии добиться определенных результатов.

М а г н и т о м е т р и я. Метод магнитометрии является одним из самых важнейших при современном изучении разнообразных минеральных образований. В основу его положено различие магнитной проницаемости минеральных тел и наличие ферромагнетизма в одних случаях и диамагнитных свойств — в других.

Широкое использование магнитометрических методов объясняется точностью приборов, с одной стороны, и резким различием магнитных свойств отдельных минеральных видов — с другой.

¹ Е. А. К о р д а л и н. Труды Сейсмол. ин-та, 1938, № 79 (кора выветривания). См. также его статью: Изучение строения земной коры сейсмическими методами. Изд. Акад. Наук СССР, 1939, особенно стр. 46—73.

Магнитная съемка дает отчетливые результаты даже при незначительных аномалиях, в 100—200 гамм, тогда как различие этой же величины для минералов значительно больше и может, примерно, выражаться в следующих цифрах: магнитное железо 150 тыс. гамм, диабаз 15 тыс. гамм, бурый железняк от 100 до 500 гамм, золотые россыпи до 300, граниты 150—300, соль 30—40 гамм.

Однако необходимо подчеркнуть, что, по существу, применение магнитной съемки достигнет еще гораздо больших успехов, если само явление магнитных аномалий и, в частности, характерные магнитные свойства вещества будут изучены более детально. Магнитные и ферромагнитные свойства, как мы знаем, связаны с особой группой химических элементов, располагающихся в центральной части менделеевской таблицы и в основном связанных с наличием пропусков в заполнении электронных оболочек. Резко выраженными парамагнитными или ферромагнитными свойствами обладают соединения железа, часто никеля, кобальта и марганца, в меньшей степени хрома, некоторые платиновые минералы и т. д. Сплошь и рядом изучение магнитной проницаемости этих минеральных образований представляет важнейшую задачу чисто кристаллохимического и геохимического характера. Это тем более важно, что магнитные свойства зависят не только от природы самого химического элемента, но и от характера кристаллической решетки и распределения в ней данного металла. В последнее время все более и более выясняется, что особое значение усиления магнитных свойств должно быть отведено наличию в данной кристаллической решетке ионов одного и того же элемента, но в разной степени валентности.

Прекрасным примером этого могут служить магнитные свойства железа. Так, магнетит, обладающий особыми магнитными свойствами, состоит из сложного переплета ионов двухвалентного и трехвалентного железа. В самом металлическом железе мы имеем дело с неустойчивой переменной валентностью, в сумме дающей для металла ноль. Аналогичные наблюдения могут быть сделаны и по отношению к кобальту, хрому и марганцу, где всегда наличие ионов с разным числом заполненных электронных оболочек ведет к повышению парамагнитных свойств. Такие соединения, содержащие в себе неустойчивые ионы с переменной валентностью и характеризующиеся наличием как бы свободных электронов, мною были названы берцеллидами. Исследование этого типа соединений тем более важно, что парамагнитные свойства в них сопровождаются поглощением световых лучей, непрозрачностью или обычной окраской в темносиние или зеленые тона.

Таким образом, само развитие магнитометрии требует изучения магнитных свойств природных кристаллических решеток и зависимости этих свойств от условий их образования («предистории»).

Только на основе новых точных данных можно будет подойти к определению и уточнению магнитометрических работ над магнетитом, магнитными разностями гематита, погребенными россыпями золота и платины, если в них заключаются магнитные шликеры. И конечно, они применимы и для поисков и изучения месторождений боксита в случаях, если последний сопровождается гидратами железа повышенной магнитности; равным образом для руд марганца, обладающих неустойчивой валентностью, возможно будет гораздо более точное применение магнитометрии, чем это имело место до настоящего времени.

Второй цикл вопросов связан с изучением магнитных свойств сульфидных руд и, в частности, пирротин, а также некоторых медных руд.

Наконец, третий цикл связан с исследованием соляных месторождений, так как вследствие диамагнитности каменной соли в районе соляных куполов наблюдаются отрицательные аномалии.

Электрометрия. Особый успех и развитие за последние годы получила электрометрия, т. е. изучение электрических и электромагнитных полей, создаваемых токами в земной коре (естественными или искусственными).

Сама идея электрометрического исследования показывает, что здесь могут быть использованы самые разнообразны методы, как для возбуждения, так и для определения электромагнитных полей. Не входя в анализ этого вопроса, мы должны и здесь подчеркнуть, что в его основе должно лежать изучение проводимости тока и электромагнитных свойств кристаллического вещества. К сожалению, в этом вопросе сделано еще значительно меньше, чем в области магнитных свойств. Исследования, которыми пользуется электрометрия, до сих пор не обоснованы точным анализом электрических свойств минералов, особенно сульфидов, для которых эти методы являются наиболее важными. Проводимость тока сульфидами связана с специфическими чертами их кристаллических решеток не ионного, а атомного типа, и находится в тесной зависимости от природы самих решеток и распределения в них отдельных атомов металла и серы.

Помимо указанного искусственного возбуждения электромагнитных полей, мы должны считаться с наличием в природе естественных токов, образующихся в результате некоторых химических реакций, как, например, окисления сернистых руд, а также и в результате соприкосновения тел различного химического состава. Все это лишний раз показывает, что вопросы электрометрии требуют еще углубленного изучения.

Глава V

ПОИСКИ МИНЕРАЛОВ И ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ В ОБЛАСТЯХ ОПРЕДЕЛЕННЫХ ГЕНЕТИЧЕСКИХ ТИПОВ

ВВЕДЕНИЕ

Какие полезные ископаемые и минералы можно встретить и где? В каких геологических и петрографических условиях наблюдаются концентрации и какие? Каковы те геохимические и минералогические комплексы, которые характерны для определенных пород или генетических типов?¹ Ответ на эти вопросы очень важен, особенно для поисковика-геохимика, так как дает ему первое наведение на то, что надо искать и что можно ожидать встретить в данной местности².

Ниже приводимые данные, при всей их неполноте, могут быть полезными для начинающих геохимиков-поисковиков, для краеведов и местных работников и должны служить в качестве первой геохимической ориентировки в поле.

¹ О генетических типах, их свойствах и различии см. А. Е. Ферсман. Геохимия, II, 1934, 136—158.

² Приходится напомнить, что геохимические схемы подсказывают лишь типичные минеральные ассоциации, но в природе процессы много разнообразнее и сложнее схем, приводимых в сводках. Поэтому при поисках возможны всегда неожиданности, особенно в областях магматических пород и их контактов.

Полезными могут явиться эти указания и для работников по геологическому картированию отдельных территорий Союза, так как они в сжатом виде подсказывают геологу, что он должен искать в закартированных им районах, в выявленных им полях определенных пород.

А. ПОНСКИ В ПОРОДАХ МАГМАТИЧЕСКИХ И ИХ ДЕРИВАТАХ

1. ПОИСКИ В ОБЛАСТИ УЛЬТРАОСНОВНЫХ ПОРОД И СЕРПЕНТИНИТОВ (ПРОТОКРИСТАЛЛИЗАЦИИ)

Общее введение

К процессам протокристаллизации мы относим продукты начальных стадий кристаллизации силикатного расплава, который частично, согласно закону действующих масс, может содержать еще некоторое количество не отделившихся путем ликвации сернистых соединений, а также и часть

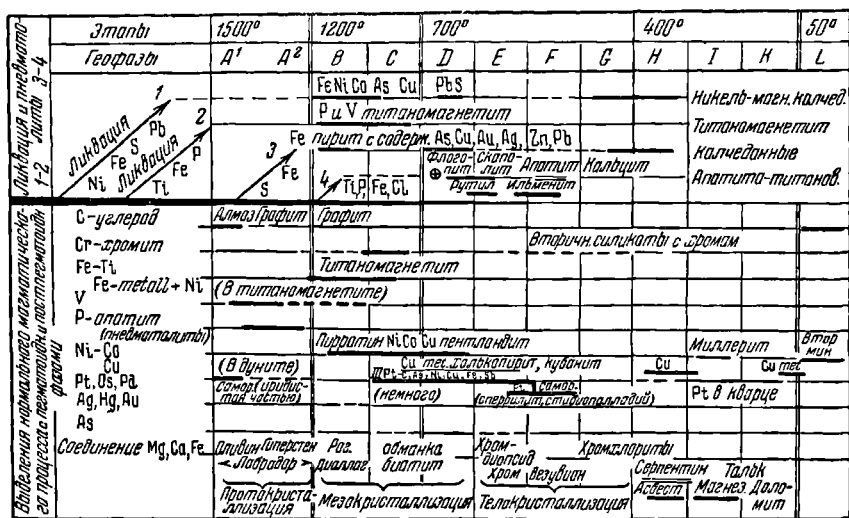


Рис. 35. Геохимическая диаграмма кристаллизации ультраосновной и основной магмы.

Диаграмма весьма схематична, ввиду отсутствия точных данных для температурной градуировки в ультраосновных и основных породах. Ряд минералов помещен условно; для широтина вероятна еще более низкотемпературная генерация (вероятно, гефаз G — H), что зависит, может быть, от упругости паров серы. Жирно подчеркнуты те элементы или минералы, которые образуют в указанных условиях промышленные скопления.

металлов, для которых не хватило кислорода или серы. Равным образом в магматическом расплаве, в зависимости от соотношения упругости паров летучих компонентов и величины внешнего давления, может быть сохранен и ряд летучих компонентов. С петрографической точки зрения мы должны относить к протокристаллизации весь ряд оливиновых пород (перидотиты, дуниты), пироксениты и амфиболиты, частично базальты, габбро и нориты, представляющие как бы некоторую среднюю группу, о которой речь будет ниже.

Описываемый процесс (рис. 35) начинается с выпадения при относительно высоких (порядка 1500°) температурах протокристаллизата и без

особых резких скачков переходит в мезокристаллизацию, которая, однако, более резко и определенно отделяется от последующей телокристаллизации.

Химические элементы протокристаллизации

Элементы протокристаллизации мы можем сопоставить, разделив их на приведенные ниже четыре условные группы; при этом четные элементы набраны жирно, элементы, лишь частично участвующие в процессах, но не накапливающиеся в кристаллизатах, отмечены в скобках.

1. Ведущие элементы:

Mg, Si, Ti, Fe, Ni, Cr.

2. Главные или характерные элементы:

C, O, Na, Al, P, S, (Cl), Ca, V; группа платины: Ru, Rh, Pd, Os, Ir, Pt.

3. Второстепенные элементы:

(II), Se, Co, Cu, Zn, Ge, As, Pb, (Sb), Hg, Tl, Ag, (Au).

4. Акцессорные элементы (из соседних геохимических полей):

K, Sr, Zr, Nb, Ta, W, Re, (Sn), Mo.

Список химических элементов, в общем весьма определенный, как мы увидим в дальнейшем, с геохимической точки зрения является очень характерным, что особенно наглядно видно после их нанесения на диаграмму менделеевской таблицы с развернутыми периодами (рис. 36).

Как общий вывод наметим следующие положения: все основные показатели, а именно: четность атомных номеров и величины атомных весов, приходящиеся на максимальные величины энергии упаковки по Астону (т. е. устойчивость ядер), максимальные (до 4) и притом четные валентности, минимальные радиусы ионов, четные и средние координационные числа, повышенная четная симметрия кристаллических построек, наивысшие коэффициенты термической стойкости (Линдемана, Анри), наивысшие ионные потенциалы и потенциалы ионизации и, наконец, наиболее высокие величины энергии ионов кристаллических решеток — все однозначно и совершенно определенно говорит о том, что к протокристаллизации, т. е. к основным и ультраосновным магмам, относятся атомы и ионы, обладающие максимальной механической, термической и электростатической прочностью и стойкостью решеток с минимальными запасами свободной энергии. Это исключительное положение не только является характерным для протообразований в целом, но находит максимальное выражение в начальных стадиях кристаллизации, ослабляясь в конечных, как бы на частном примере намечая собою общий закон кристаллизации силикатных расплавов, кончающихся гранитными пегматитами и горячими водными растворами, в которых мы имеем другую крайнюю точку — накопление наиболее подвижных, мигрирующих атомов, образующих наименее устойчивые соединения первичного магматического расплава.

Полезные свойства ископаемых протокристаллизаций

Совершенно особое технологическое и техническое значение имеет приведенная геохимическая характеристика элементов протокристаллизации, их устойчивость и стойкость. Совершенно очевидно, что эти черты переносятся полностью и на полезные ископаемые этих образований и на их использование. И поэтому характерными чертами протоэлементов и протоминералов, как объектов промышленности, должны быть химическая, механическая и электростатическая стойкость, трудная

	18	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
№ и знак Р глосид. W КС ₃	Н 0,2 ⁺	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	H ⁻¹ 0,4	1,22 ⁰ 0
№ и знак Р глосид. W КС ₃	He 0,78 ⁺ 12	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
№ и знак Р глосид. W УЭК	Na 0,98 ⁺ 7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
№ и знак Р глосид. W УЭК	Ca 1,33 ⁺ 4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
№ и знак Р глосид. W УЭК	Sc 1,49 ⁺ 35	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
№ и знак Р глосид. W УЭК	Ti 1,65 ⁺ 3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
№ и знак Р глосид. W УЭК	V 1,81 ⁺ 20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
№ и знак Р глосид. W УЭК	Cr 1,98 ⁺ 20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
№ и знак Р глосид. W УЭК	Mn 2,10 ⁺ 20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
№ и знак Р глосид. W УЭК	Fe 2,28 ⁺ 20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
№ и знак Р глосид. W УЭК	Co 2,46 ⁺ 20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
№ и знак Р глосид. W УЭК	Ni 2,63 ⁺ 20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
№ и знак Р глосид. W УЭК	Cu 2,81 ⁺ 20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
№ и знак Р глосид. W УЭК	Zn 2,98 ⁺ 20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
№ и знак Р глосид. W УЭК	Ga 3,16 ⁺ 20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
№ и знак Р глосид. W УЭК	Ge 3,34 ⁺ 20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
№ и знак Р глосид. W УЭК	As 3,52 ⁺ 20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
№ и знак Р глосид. W УЭК	Se 3,70 ⁺ 20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
№ и знак Р глосид. W УЭК	Br 3,88 ⁺ 20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
№ и знак Р глосид. W УЭК	Kr 4,06 ⁺ 20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
№ и знак Р глосид. W УЭК	Rb 4,24 ⁺ 20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
№ и знак Р глосид. W УЭК	Sr 4,42 ⁺ 20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
№ и знак Р глосид. W УЭК	Y 4,60 ⁺ 20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
№ и знак Р глосид. W УЭК	Zr 4,78 ⁺ 20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
№ и знак Р глосид. W УЭК	Nb 4,96 ⁺ 20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
№ и знак Р глосид. W УЭК	Mo 5,14 ⁺ 20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
№ и знак Р глосид. W УЭК	Tc 5,32 ⁺ 20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
№ и знак Р глосид. W УЭК	Ru 5,50 ⁺ 20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
№ и знак Р глосид. W УЭК	Rh 5,68 ⁺ 20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
№ и знак Р глосид. W УЭК	Pd 5,86 ⁺ 20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
№ и знак Р глосид. W УЭК	Ag 6,04 ⁺ 20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
№ и знак Р глосид. W УЭК	Cd 6,22 ⁺ 20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
№ и знак Р глосид. W УЭК	In 6,40 ⁺ 20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
№ и знак Р глосид. W УЭК	Sn 6,58 ⁺ 20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
№ и знак Р глосид. W УЭК	Pb 6,76 ⁺ 20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
№ и знак Р глосид. W УЭК	Bi 6,94 ⁺ 20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
№ и знак Р глосид. W УЭК	Po 7,12 ⁺ 20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
№ и знак Р глосид. W УЭК	At 7,30 ⁺ 20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
№ и знак Р глосид. W УЭК	Ra 7,48 ⁺ 20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
№ и знак Р глосид. W УЭК	Ac 7,66 ⁺ 20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
№ и знак Р глосид. W УЭК	Th 7,84 ⁺ 20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
№ и знак Р глосид. W УЭК	Pa 8,02 ⁺ 20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
№ и знак Р глосид. W УЭК	U 8,20 ⁺ 20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
№ и знак Р глосид. W УЭК	Np 8,38 ⁺ 20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
№ и знак Р глосид. W УЭК	Pu 8,56 ⁺ 20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
№ и знак Р глосид. W УЭК	Am 8,74 ⁺ 20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
№ и знак Р глосид. W УЭК	Cm 8,92 ⁺ 20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
№ и знак Р глосид. W УЭК	Bk 9,10 ⁺ 20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
№ и знак Р глосид. W УЭК	Cf 9,28 ⁺ 20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
№ и знак Р глосид. W УЭК	Es 9,46 ⁺ 20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
№ и знак Р глосид. W УЭК	Fm 9,64 ⁺ 20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
№ и знак Р глосид. W УЭК	Mendelevium 9,82 ⁺ 20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
№ и знак Р глосид. W УЭК	Unkown 10,00 ⁺ 20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Рис. 36. Менделеевская таблица в развернутом виде, с нанесением на ней полей элементов протокристаллизации (поряд ультраосновных).

В каждой клетке помещен знак алембита, радиус главной валентности, значение КС, являющегося показателем термических свойств, и век в условных единицах. Сплошная граница определяет поле элементов протокристаллизации, пунктирная граница отделяет влево от нее поле элементов конечной кристаллизации гранитных пегматитов. Двойным кружком обозначены элементы особого значения в группе протокристаллизации; простым кружком — элементы типичные. В скобках простых и двойных поставлены элементы, имеющие меньшее или андессорное значение.

растворимость, высокая твердость и механическая прочность. Действительно, к группе минералов первичной (прото-) кристаллизации относятся самые твердые минералы (алмаз — 10, шпинель — 8,5, хромит — 7,5 и другие прочные силикаты), самые нерастворимые соединения (алмаз, корунд, металлы платиновой группы и т. д.); при постепенной гидратации или выветривании этих соединений мы получаем их частично в виде микрокристаллических систем или даже коллоидов, но все же с характерной, им свойственной химической прочностью (тальк, асбест и т. д.). Поэтому мы можем наметить для минералов и элементов основных магм следующие виды применения:

1. Стойкие строительные материалы: Mg, Ca, Si, Fe.
2. Стойкие металлические покрытия (нержавеющая сталь): Fe, Ni, Cr, Pt, Pd (частично и P).
3. Химически стойкие нерастворимые вещества: (Zr, Nb, Ta), металлы Pt-группы, отчасти Co и Au.
4. Огнеупоры для наиболее высоких температур: корунд, окись магния — периклаз, хромит, графит, тальк, магнезит и т. д.
5. Драгоценные и технические камни: алмаз, шпинель, хризолит (оливин), пироп и др.

Таким образом, геохимический анализ не только привел нас к установлению важных общетеоретических законов, но, и дал нам в руки подход к правильному пониманию технического использования минералов основных магм.

Поисковые указания

Очень характерной при поисках в области основных и ультраосновных пород является необходимость считаться с очень темными или вообще зелеными тонами как самих пород, так и минералов: этим создается ряд трудностей при поисках. Необходимо обращать внимание на светлые выделения и жилы, связанные с конечными геофазами процессов или с внедрением более молодых диоритовых или гранитных интрузий. Для накопления первичных продуктов дифференциации имеют значение краевые части массивов, для более поздних выделений — трещины охлаждения или тектонические разломы более позднего времени. Очень важны вторичные образования и в особенности кора выветривания, в которой при известных условиях может накапливаться ряд элементов (см. стр. 657).

Главнейшая литература

- П. И. Лебедев. Геохимия черных и цветных металлов. Областн. изд., 1933, 1—18.
 В. Н. Лодочников. Серпентины и серпентиниты. Труды ЦНИГРИ, 1936, вып. 38, 1—817.
 А. Е. Ферсман. Геохимическая характеристика протокристаллизаций. Доклады Акад. Наук СССР, 1935, III, 216—220.
 А. Е. Ферсман. Геохимия, 1937, III, 220—248; Геохимия, 1939, IV.

2. ПОИСКИ В РАЙОНЕ ГАББРО-НОРИТОВЫХ ПОРОД

С поисками в районе габбро-норитовых пород связан ряд актуальных проблем, и поисковик-геохимик должен обращать особое внимание на минерализацию, приуроченную к этим породам. При этом следует иметь в виду одно практическое правило: интересен с практической точки зрения особенно тот комплекс, который отклоняется от габбро в сторону образо-

вания более основных пород (т. е. в сторону оливиновых разностей); в нем мы ищем сульфидов никеля, меди, железа, кобальта и частично самородных платиновых металлов с преобладанием палладия и присутствием мышьяковистой платины. В другой группе габброидных пород, более связанных с их кислыми дериватами, мы чаще встречаемся со скоплениями железа, титана (в виде титаномагнетитов). Не исключено и влияние контактов с известняками на дифференциацию габброидных пород, а также пневматолитических выделений углекислоты, паров воды, фосфора, хлора (фтора). (См. базальты, траппы, стр. 617).

Что касается титаномагнетитовых скоплений в породах габброидного типа, то мы должны считаться с позднейшей их инфильтрацией в связи с постмагматическими процессами, вследствие чего они заполняют трещины охлаждения или тектонические разломы с позднейшим заполнением и химической переработкой габброидных пород (хлориты, крупнокристаллические роговые обманки, гранат). Впрочем, для них наблюдаются все переходы от чисто магматических выделений — сегрегаций — до тихичных заполнений жил.

3. ПОИСКИ В РАЙОНАХ ДИОРИТОВ И ГРАНОДИОРИТОВ

Как некоторое правило общего характера мы можем отметить, что наибольшей минерализацией и наибольшими скоплениями полезных ископаемых характеризуются начальные и конечные фазы магматической кристаллизации (т. е. основные и ультраосновные породы, с одной стороны, и кислые дериваты гранитов — пегматиты — с другой).

Поэтому мезопороды, как наименее дифференцированные магматические системы, в общем беднее полезными ископаемыми, и сами породы и их контакты или жильные выделения в схеме привлекают к себе меньше внимания.

Как пример этому можно привести обычные серые граниты Средней Азии, которые характеризуются гранодиоритовым или диоритовым типом и в общем много беднее минеральными выделениями, чем, например, менее постоянные по своему составу и более подвижные по своей геохимической истории граниты Урала.

Тем не менее мы не можем не отметить несколько геохимических типов, связанных с диоритами и гранодиоритами:

1. Прежде всего характерна связь с з о л о т о м; в настоящее время все более и более выясняется, что золотые эманации связаны по большей части с двумя типами гранитов: аляскитами (весьма кислыми, но полевошпатовыми) и гранодиоритами. Схема боковых концентров (рис. 50), приведенная на стр. 634, объясняет накопление золота (и меди) как раз в тех частях гранитных интрузий, где мы обычно имеем дело с переходами кислого апикального гранита в гранодиорит.

2. Второй интересный и довольно типичный процесс связан с контактами пород диоритового типа — для них интересна некоторая миграция магния из диорита в известняк с образованием вторичных светлозеленых или желтых змеевиков и золотистых безжелезистых асбестов; нередко при более высоких температурах мы наблюдаем скарны с аксинитом, волластонитом и соединениями кобальта и мышьяка (Средняя Азия).

3. В ряде районов (Мексика, Крым, Кавказ) с породами диоритового типа связаны рудные геохимические концентры с преобладанием, однако, сульфидов цинка и в меньшей степени свинца.

В общем минерализация пород диоритового типа изучена плохо и требует специальных исследований; она имеет особое значение для районов с широким распространением тихоокеанских (гранодиоритовых) магм.

4. ПОИСКИ В РАЙОНАХ НЕФЕЛИНСИЕНИТОВЫХ МАГМ И ИХ ПЕГМАТИТОВ

Введение

Нет никакого сомнения, что в истории минералогической науки нефелинсиенитовые породы и их пегматиты сыграли совершенно исключительную роль и, начиная с работ Брёггера, Уссинга, Ландеса и школы б. Ломоносовского института в Москве, дали огромный фактический материал большого теоретического значения, хотя до открытия хибинских щелочных пегматитов с нефелиновыми магмами не связывались никакие особо ценные скопления полезных ископаемых, и такие большие и хорошо изученные массивы, как Лангезундфиорда, Пилансберга, о-вов Лос, Португалии, Ильменских гор, не давали никаких особых указаний на возможную практическую их пользу. Известны были лишь случайная добыча эвдиалита в Гренландии для получения циркония, небольшая добыча торита с целью извлечения тория в Лангезундфиорде и, особенно, графита в Восточной Сибири. Отдельные случаи добычи титаномagnetитов, бадделеита и цирконов в Бразилии теоретически надо было также связать с щелочными магмами. Для Ильменских гор еще 40 лет тому назад талантливый московский минералог П. К. Алексат поднял вопрос о керамическом использовании полевых шпатов и особенно элеолита (нефелина), а в 1900 г. акад. Е. С. Федоров, ознакомившись с щелочными выходами Турьего мыса на Кольском п-ове, обратил внимание на замечательное сочетание нефелина + апатит для сельскохозяйственных целей.

Только детальное изучение хибинских щелочных массивов в советское время открыло замечательные и новые горизонты в использовании щелочного комплекса¹. Хотя до сих пор еще полностью не освоено все многообразие полезных ископаемых и редких элементов, связанных с этими пегматитами и породами, тем не менее сейчас значение нефелиновых сиенитов, как источника ценнейших веществ для промышленности, доказано (рис. 37).

Наши исследования показали, что основной чертой этих пород является резко щелочный характер остаточных магматических расплавов. Помимо высокого pH, характеризующего эти расплавы, большое значение для их кристаллизационного процесса имеет соотношение щелочей и глинозема. Если отношение $K_2O + Na_2O$ к Al_2O_3 больше единицы, то мы получаем так называемые агпайтовые системы с высоким pH: щелочей больше, чем нужно для вхождения в решетки нефелина и полевых шпатов; избыток щелочей ведет к превращению ряда катионов расплава в комплексные анионы, и ход остаточной кристаллизации заканчивается образованием таких сложных решеток, в которых, например, Fe^{+3} , Zr^{+4} или Ti^{+4} превращаются в комплексные анионы $[Fe_2O_4]^{-2}$, $[ZrO_4]^{-4}$, $[TiO_4]^{-4}$ и т. д. Получаются своеобразные агпайтовые пегматиты в очень интересной, но обратной обычной последовательности кристаллизации с накоплением в остаточных процессах: Zr, Fe^{+3} , Ti, Ca, P и др.

В противоположность этим агпайтовым пегматитам, миаскитовые пегматиты в общем характеризуются меньшим избытком щелочей, отношением $K_2O + Na_2O$ к Al_2O_3 меньше единицы, и поэтому щелочи целиком уходят на насыщение одной свободной валентности $[AlO_4]^{-4} (-1)^*$. Поэтому

¹ Важно иметь в виду, что с нефелиновыми сиенитами обычно связаны щелочные граниты с интересной минерализацией (F — криолит, Ti — ильменит, титаномagnetит, амезонит и др.).

* Не забудем, что этот комплекс замещает $[SiO_4]^{-4}$, который частично нейтрализует свои свободные валентности путем образования цепей или вязей.

для них характерна последовательность кристаллизации, которую мы называем *гранитной*, а порядок выпадения решеток весьма сходен с порядком, типичным для гранитных пегматитов. Цвета светлые.

Совершенно очевидным является различие в минерализации состава и особенно в цвете этих двух крайних типов, но мы не должны забывать, что между ними имеется ряд переходов и что нам известны месторождения, в которых содержание $K_2O + Na_2O$ как раз равно содержанию Al_2O_3 . В этих промежуточных типах не преобладает ни агпаитовая, ни гранитная

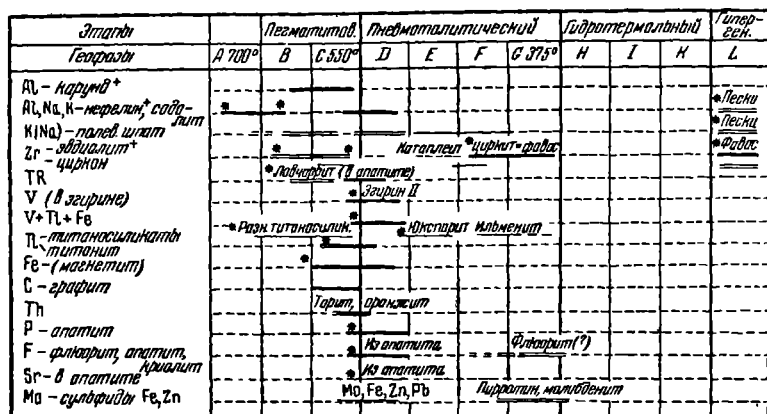


Рис. 37. Геохимическая диаграмма кристаллизации пегматитов нефелин-сиенитовой магмы:

* образования, свойственные только агпаитовой магме; + полезные ископаемые, встречающиеся только в данной диаграмме; жирно подчеркнуты элементы и полезные ископаемые практического значения; двойной линией — образования возможного промышленного использования.

последовательность кристаллизации, и поэтому минералы выпадают более или менее одновременно, не создавая определенных генераций и не ведя к накоплению их в определенные фазы процесса; в этом случае мы имеем дело с меньшими скоплениями полезных ископаемых, ибо нет условий для специфической концентрации вещества.

Ряд месторождений от наиболее агпаитовых к наиболее миаскитовым таков: (1) Ловозерские тундры и Хибины, (2) Бразилия, (3) Юлианеггаб в Гренландии, (4) Пилансберг, (5) о-ва Лос в Атлантическом океане, (6) Лангезундфиорд в Южной Норвегии, (7) Ботогол в Восточной Сибири, (8) Вишневые горы и (9) Ильменские горы на Урале. Мариупольский массив занимает среднее (непостоянное) место.

Рассмотрим сейчас последовательно по типам полезные ископаемые нефелинсиенитовых магм и их пегматитов.

Полезные ископаемые и элементы

Тип миаскитовый. Последовательность кристаллизации гранитная. Переходы в бескварцевые и безнефелиновые сиениты на контактах с кислыми породами.

Полезные ископаемые: пиркон, ильменорутит, ильменит,

полевой шпат (амазонит в щелочных гранитах, сопутствующих нефелиновому сиениту), нефелин, содалит¹, канкринит².

Полезные элементы: Zr, Nb, (Ta), Ti, Fe, Ca, Na, (K), (SiO₂).

Порядок выделения — в сторону понижения величин эквивалентов. Циркон обычно может иметь значение только во вторичных или элювиальных россыпях, ильменит как источник титана — высококачественное сырье. Полевой шпат обычно средних качеств, зато очень ценен чистейший нефелин (например в Вишневых горах).

Совершенно особняком стоят месторождения нефелиновых сиенитов с накоплением графита на контактах с известняками. Этот тип геохимически не выяснен достаточно; хотя образование чистого углерода путем восстановления угольной кислоты известняков несомненно, но, очевидно, протекает при совершенно особых геохимических условиях.

Тип *агпайтовый*³ — наиболее интересный, причем особого внимания заслуживают щелочные массивы Кольского п-ова и очень плохо изученные аналогичные месторождения Бразилии.

Полезные элементы

Катионы					Анионы	
$w = 1$	2	3	4	5	6	$1 = w$
Na	Be	(Fe)	(Si)	P		F
	Ca	Al	Ti	Nb		
	(Sr)	V	Zr (Hf)	Ta	Mo	
		TR	Th			
		(Ga)	U			

В этом списке замечательно преобладание элементов высокой валентности (3, 4, 5 и 6), причем все катионы выше 4 превращаются в комплексные анионы, что объясняется избытком щелочей и щелочных земель (высокий pH); благодаря этому, например, анион $[\text{PO}_4]^{-3}$ нейтрализуется через Ca и Na, анион $[\text{NbO}_3]^{-1}$ — через Ca, TR, Na. Ванадий трехвалентен и идет вместе с Fe^{+3} ; Ga замещает Al; бериллий, вероятно, тоже замещает Al в нефелинах.

Наибольшее геохимическое и практическое значение в этих образованиях имеют элементы, напечатанные жирно. По минералам элементы агпайтовых пегматитов (помимо P, Sr, TR — в апатите) распределены так:

Ti — сфен, ильменит (реже), титаномагнетит.

Zr — циркон, цирконосиликаты (особенно эвдиалит), бадделлит, цирконфавас.

Nb (Ta) — лопарит, ловчоррит (кнопит — перовскит).

TR (и Y) — лопарит, ловчоррит и другие титаносиликаты.

Интересно содержание редких земель в апатите.

F — в апатите, флюорите и в многочисленных титаносиликатах.

Th — в титано- и цирконосиликатах.

¹ Как декоративный камень в Канаде.

² Как редкий ограночный материал.

³ Характерные черты агпайтовых магм: крайний случай высокого pH; превращение амфотерных катионов в комплексные анионы (относительно поздней кристаллизации); Al^{+3} в $[\text{AlO}_4]^{-5}$, Zr^{+4} (циркона) в $[\text{ZrO}_4]^{-4}$ эвдиалита, Ti^{+4} , Ti^{+3} в комплексные титанокремневые анионы, Be^{+2} в $[\text{BeO}_2]^{-2}$ и т. д. Обязателен обратный порядок кристаллизации агпайтовых магм (по сравнению с гранитными и мигматитовыми). Высокий окислительный потенциал. Дистилляция летучих (анионных) компонентов усиливает процесс.

V — в эгирине и титаномagnetите.

Полезные минералы:

1. **Нефелин** — имеет большое значение как источник алюминия, натрия, калия и кремнекислоты. В нем содержится галлий и бериллий в ультрадисперсном состоянии, но не исключена для бериллия возможность его использования в будущем.

2. **Полевые шпаты**, как таковые, редко дают большие и чистые скопления для керамики в жилах, но ряд лейкократовых пород, состоящих из полевого шпата + нефелин, или контактных лествиваритов может иметь практическое значение.

3. **Апатит** — имеет огромное значение в Хибинах; образует промышленные скопления и в других аналогичных щелочных массивах (Бразилия).

4. **Ильменит** — в общем имеет мало значения, как титановая руда, в выделениях нефелиновых сиенитов (в противоположность скоплениям в габброидных породах), уступает в этом отношении место следующему минералу.

5. **Титаномagnetит** — образует месторождения в последних фазах выделения апатитовых пород (Якупиранга, Magnet-Ков, Хибинь). Интерес титаномagnetита заключается в обычно высоком содержании TiO_2 (до 20%), повышенном содержании V_2O_5 (до 1,5%), но практическая ценность его понижается необходимостью механической сепарации от примесей (апатита, пироксена, эгирина, полевого шпата и т. д.). Metallургия этих руд еще плохо разработана, но обещает много практических достижений.

6. **Кнопит** (дизаналит, перовскит). До сих пор его месторождения (Magnet-Ков, Альн в Швеции, Кайзерштуль и др.) носили лишь чисто минералогический характер. Интересно повышенное содержание редких земель и ниобия. Замечательный, технологически еще не проработанный источник титанового сырья (отсутствие железа и до 55% TiO_2).

7. **Сфен** (титанит). Грандиозные запасы этого минерала показывают, что мы имеем дело с новым полезным ископаемым — источником сырья для извлечения титана, которое может быть найдено в месторождениях, богатых кальцием и титаном (особенно контактного типа).

8. **Ловчоррит** — сложный фторо-титаносиликат кальция и редких земель, сырьем для извлечения редких земель и частично тория и ниобия.

9. **Лопарит** — ниобититанат редких земель и кальция. Богатые скопления обычны на контактах луавритов и фойяитов. Весьма интересное сырье для редких земель и ниобия (тантала мало).

10. **Эвдиалит** — составная часть эвдиалитовых луавритов и конечный продукт кристаллизации в пегматитовых остатках хибинита.

11. **Бадделейт** и **цирконфавас** — исключительные по ценности продукты гидротермального разложения цирконосиликатов, а может быть, и цирконов. Геохимически не изучены; очень трудно отличимы по внешнему виду; поэтому их нахождение исключительно затруднительно. Совершенно особый тип кристаллического бадделейта (черного) открыт в золотых россыпях северо-востока Бельгийского Конго, где он, очевидно, вымыт из щелочных гранитов или сиенитов.

12. **Молибденит** — нередко связан с нефелиновыми сиенитами, но нигде не дает очень крупных промышленных месторождений этого типа. Связан обычно с альбитовыми выделениями геофаз G — H.

13. В районах нефелиновых пород, но не в самих нефелиновых сиенитах, а в сопровождающих их щелочных гранитах встречается криолит. Поиски его необходимы.

Практические указания

Поиски в областях нефелиновых пород надо сосредоточивать особенно в контактных и верхних зонах. В миаскитовых сиенитах внимание должны привлекать более светлые, белые или розовые, пегматитовые жилы или выделения, тогда как в агпайтовых полезные составные части связаны обычно с темными, темнозелеными или цветными образованиями, богатыми железом, титаном, цирконием. В последнем случае они нередко образуют неправильные миаролы или настоящие жилы.

Для ряда минералов очень полезной является радиоактивная съемка по измерению ионизации, причем основное внимание должно быть направлено на мезоторий и торий (а не радий и уран).

Обилие редких металлов в районах нефелиновых пород вызывает необходимость во внимательных поисках минералов циркония, редких земель, титана и ниобия в первую очередь, а также в попутном химическом опробовании на эти элементы.

Главнейшая литература

- А. Е. Ферсман. *Geochemische Migration der Elemente*. [Геохимическая миграция элементов] I. Abhandl. prakt. Geol., 1929, XVIII, 21—73.
 Сб. Минералы Хибинских и Ловозерских тундр. Под ред. А. Е. Ферсмана. Изд. Акад. Наук СССР, 1937, 1—563.
 А. Е. Ферсман. Геоэнергетический анализ ильменских пегматитов. Труды Уральск. филиала Акад. Наук, 1936, V, 39—52.
 А. Е. Ферсман. Геохимия, 1934, II, 166; 1937, III, 350—355.
 W. C. Brögger. *Zs. Kryst. u. Min.*, 1890, XVIII.
 N. Ussing. *Meddel. Grönland*, 1912, 38.

5. ПОИСКИ В РАЙОНАХ ГРАНИТНЫХ МАГМ¹

Ср. гранитные пегматиты стр. 604; в эффузивных породах гранитного типа стр. 617; в контактах — стр. 611.

Нет никакого сомнения, что главнейшие и самые интересные месторождения ряда полезных элементов связаны с гранитными магмами, которые мы рассматриваем в схеме как остаточные расплавы сложной кристаллизационной эволюции магматических бассейнов.

Прилагаемая схема (рис. 38) в очень грубой форме иллюстрирует эти соотношения. Полезные ископаемые в меньшей степени связаны с центральными очагами гранитных интрузий — главное внимание должно быть отведено их пограничным частям и особенно верхней апикальной, где накапливаются главнейшие летучие компоненты.

Большое значение для концентрирования ряда элементов имеют: форма и орография гранитных массивов, глубина застывания очагов, химический тип гранита, состав и природа боковых пород,

¹ В этой главе мы будем касаться как типичных щелочноземельных гранитов (гранититов), так и щелочных гранитов, связанных часто с щелочными сиенитами.

геохимический ореол гранита, вторичные изменения гранитов (выветривание).

Форма остывания гранитного массива имеет значение постольку, поскольку особая геохимическая роль принадлежит его апикальной части. Если гранитный батолит не имеет заостренных и конических сужений верхних частей, а ограничивается более или менее ровной верхней поверхностью, то выделяемые в остаточном растворе при охлаждении летучие компоненты и пегматитовые расплавы обычно не находят условий для особой концентрации.

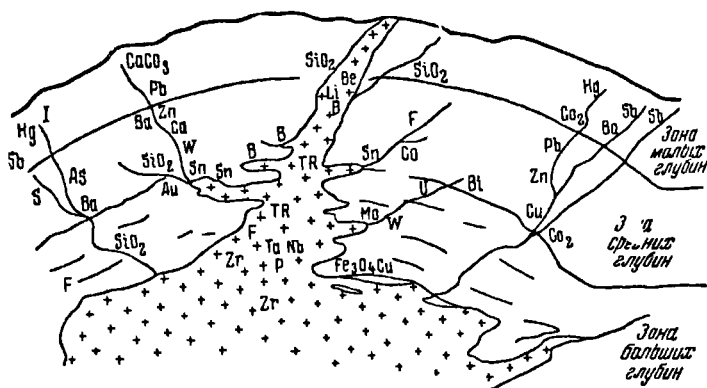


Рис. 38. Схема геохимических концентров вокруг гранитной интрузии.

Посередине — гранитный пегматит с обособлением разных генетических типов; тонкими линиями намечены пневматолиты и рудные жилы.

Только при характерной конической форме массива мы имеем основание допускать образование как бы труб и восходящих токов, которые повторно и многократно прорывают крышу апикальной части, принося с собою из глубин летучие компоненты (например олово). Такое протыкание боковых пород гранитными интрузиями с повторным их изменением, с образованием порфировидных гранитных масс и жил, является надежнейшим и важнейшим признаком для поисков более подвижных и летучих систем ценных металлов (молибден, вольфрам, олово, литий).

Глубина остывания очага играет очень большую роль и более подробно освещена в монографии о пегматитах. Глубокое залегание ведет к трудному выделению летучих и их сохранению частично в пегматите в дисперсном состоянии; в эффузивной фации (при излиянии пород на поверхность) летучие компоненты улетучиваются и лишь в небольшой степени сохраняются в ней и изменяют породу путем автопневматолита. Следовательно, для правильной дифференциации и накопления летучих погонов наиболее выгодными являются средние глубины очагов. Обычно это отвечает гранитам со слабо выраженной порфировидной структурой.

Химический тип гранита. Приходится различать два типа гранитов: типичные граниты щелочноземельного типа и щелочные граниты. Первые связаны с гранодиоритовыми магмами, отличаются содержанием (небольшим) кальция и магния и переходят в гранодиориты, диориты и габбро. Вторые характеризуются некоторым избытком щелочей (над щелочными землями) и связаны с кварцевыми сиенитами, щелочными

сиенитами и нефелиновыми породами. Геохимически минерализация этих типов резко различна, и поисковик-геохимик должен очень внимательно отнестись к этому вопросу; обычная последовательность пегматитов и рудных ореолов, как она описывается в сводках, относится лишь к первым, их распространение много значительнее, чем вторых, и наоборот, в щелочных гранитах мы наблюдаем при минерализации ряд черт, сближающих их с нефелиновыми сиенитами (например, нахождение ильменита); к ним относятся месторождения криолита, что надо иметь в виду и у нас. Вообще щелочные граниты более богаты фтором, дают контакты с флюоритом.

<i>Пегматиты</i>	<i>Темп.</i>	<i>Темпе-ратура</i>	<i>Геофазы процессов</i>	<i>Темп.</i>	<i>Пегматиты</i>
		0°			
<i>Сульфидно-ртутные</i>	VIII	100-50°	L-гипергенная		
<i>Кобальто-никелевые</i>	VII	200°	K-низкая терма	X	<i>Цезитовые</i>
<i>Цинково-свинцовые</i>	VI	300°	I-средняя терма	IX	<i>Сульфидные</i>
<i>Медные (частично с сульфидными Sn)</i>	V	400°	H-высокая терма	VIII	<i>Флюорокарбонатные</i>
<i>Щелочно-и мшишно-ва-зиситовые</i>	IV			VII	<i>Криолитовые</i>
<i>Вольфрамовые и дисмидовые</i>	III	500°	G } Надкрити- F } ческие	VI	<i>Моноклинно-фосфат- тавые</i>
<i>Оловянные</i>	II	600°	E } Пегматитовые D }	V	<i>Литиевые (с Sn)</i>
<i>Миллеритовые</i>	I			IV	<i>Фтористые и берил- лиевые</i>
		700°	C-пегматитовая	III	<i>Шерлитовые и споду- литовые</i>
		800°	B-собственно эпипегматичес- кая	II	<i>Пегматиты с редки- ми элементами</i>
				I	<i>Обычные пегматиты (апатитовые, мона- цитовые)</i>

Рис. 39. Схема дериватов остаточной гранитной магмы.

Состав и природа боковых пород имеют перво-степенное значение для минерализации, причем ход процессов определяется не только химизмом боковых пород (и их ассимиляцией), но и создаваемой ими в остаточных растворах величиной pH. Повышение pH при поглощении карбонатных пород ведет к превращению катионов в комплексные анионы (например, магнетит). См. контакты, стр. 611; см. главу о железе, стр. 693.

Геохимический ореол гранита очень важен и требует особо детального изучения следующих геохимических явлений (рис. 39): горячих терм, кварцевых жил, рудных жил и их концентров (см. стр. 625, 640).

Вторичные изменения гранитов приводят к образованию практически ценных месторождений каолина и кварцевых песков повышенной чистоты (см. стр. 646).

Главнейшая литература

А. Е. Ферсман. Пегматиты. 1932, I, 22—72, 432—467 (литература).
Монография «Слюды СССР» под ред. П. М. Татарина. Изд. ЦНИГРИ, 1937.

П р и л о ж е н и е

ГРЕЙЗЕНЫ, БЕРЕЗИТЫ, ВТОРИЧНЫЕ КВАРЦИТЫ

Особый интерес и значение в нашем Союзе представляют поиски березитов и вторичных кварцитов в районах распространения и образования грейзенов. Согласно интересным работам Н. И. Наковника, эти три образования генетически и геохимически тесно связаны друг с другом, и их сравнительное исследование несомненно прольет свет на своеобразный ход вторичных изменений гранитных пород, вызываемых интрузиями, богатыми летучими соединениями.

Согласно концепции Н. И. Наковника (вероятно, совершенно правильной), грейзены, березиты и вторичные кварциты представляют ряд связанных между собой процессов, различающихся, однако, по глубине очагов и соответственным изменениям давления.

Грейзены по существу являются процессами глубинного характера. Они характеризуются переработкой ранее образовавшихся гранитов или гранитных частей летучими компонентами, в которых главную роль играют и пары воды. Благодаря этому минералы, особенно полевые шпаты, разлагаются с образованием вторичных слюд, идет осаждение соединений олова с небольшим количеством сульфидов, образуется топаз, т. е. типичные минералы геофаз D — E со всеми характерными чертами высокотемпературных пневматолитических процессов.

Одновременно с накоплением указанных выше соединений идет сложный вынос двухвалентных ионов, в особенности магния, железа и кальция.

Вторым этапом процессов пневматолитизации можно считать березиты. Они отвечают более низкотемпературным процессам, связанным с жилными образованиями, приурочены к расположенным выше магматическим очагам с более низким давлением. Вынос двухвалентных ионов начинается сопровождаться выносом даже одновалентных катионов; количество кварца повышается. Для образования топаза и берилла температура оказывается слишком низкой. Идет накопление золота, мышьяка, может быть, частично молибдена и некоторых сульфидов.

Березитизация и образование жильбертитовых слюд охватывает значительную часть гранитных массивов (березитизированные жилы выходят и за их пределы) и отвечает геофазам G — H со всеми специфическими особенностями перехода к началу гидротермальных процессов.

Наконец, третьим этапом этих же явлений надо считать процесс образования вторичных кварцитов из гранитов и гранитпорфировых пород. В этом случае мы имеем дело с еще меньшими давлениями; нередко понижение давления связано с процессами взрывного характера, благодаря чему образуются взрывные трубчатые тела, скопления кварцевых брекчий и т. д. Магматические очаги расположены выше, ближе к поверхности. Граниты носят поэтому порфировидный характер.

Двухвалентные катионы выносятся полностью. Порода совершенно обесцвечивается, выносятся также полностью и одновалентные катионы, как калий и натрий; остаются лишь кремнезем и глинозем, которые мигрируют в разные стороны, обособляясь в большие массы вторичных кварцитов, с одной стороны, и корунды, андалузиты и диомортериты — с другой.

Вместо слюды и серицита идет образование каолинов плотного типа (галлуазитов). Сильное окисление переводит часть сульфидов меди и молибдена в кислородные соединения. Появляются сульфаты в виде алунита. Процесс носит телескопированный характер, отвечающий геофазам H и K.

Такова краткая характеристика тех трех специфических процессов, которые мы встречаем в районах гранитов по их периферии и с которыми связаны важнейшие полезные ископаемые, а именно: в грейзенах — олово, топаз и плавиковый шпат; в березитах — золото, мышьяк и молибден; во вторичных кварцитах — медь, молибден, корунд, алунит и андалузит.

Поиски этих образований представляют очень значительный практический интерес, особенно в районе степей Центрального Казахстана, хребтов Тянь-Шаня (особенно северного), а также Восточной Сибири.

Необходимо обратить внимание на внешнюю характеристику всех этих образований: в общем они всегда носят бесцветный характер и отличаются светлыми, обычно зеленоватыми или розоватыми тонами.

Второй характерной чертой является обилие в них кварца зернистой структуры, замещающего ряд более ранних минералов. Наконец, третьей характерной чертой (правда, необязательной) является частая их брекчиевидность, причем сульфиды или продукты их окисления располагаются в цементе вокруг неправильных, раздавленных кусков окварцованной породы или самого кварца.

Петрографически мы имеем здесь дело с двумя разнородными процессами: в одном

случае в основе явлений лежит магматическое охлаждение самого гранитного массива, причем верхняя его часть, ранее остывшая, подвергается автопневматолиту летучими соединениями (тип Рудных Гор в Богемии); другой характер носит процесс образования вторичных кварцитов, при котором обычно наложение нескольких магматических интрузий, процессы же более поздней магматической кристаллизации внедряются в районы остывшей ранее гранитной породы, подвергая их пневматолиту.

Главнейшая литература

Н. И. Наковник. Грейзены и вторичные кварциты. Сов. геол., 1938, № 8, 11, 12.

6. ПОИСКИ В ГРАНИТНЫХ ПЕГМАТИТАХ

Введение

Гранитные пегматиты представляют совершенно исключительную практическую ценность, и потому все пегматитовые жилы и особенно поля жил подлежат внимательному и детальному изучению (рис. 40 и 41).

Привожу основные положения для поисковой работы в пегматитах, согласно тексту третьего издания моей монографии о пегматитах (1940 г.).

В связи с развитием использования нерудных (неметаллических) ископаемых промышленное значение гранитных пегматитов с каждым годом растет, и при этом в нескольких направлениях: с одной стороны, огромное развитие добычи флогопитовой и мусковитовой слюды увеличивает масштабы разработок крупных пегматитовых жил, с другой, внедрение в некоторые виды промышленности, особенно электротехническую, новых редких и редчайших элементов (бериллий, вольфрам, галлий, редкие земли, ниобий) создает ряд своеобразных промышленных предприятий. Благодаря этому мировой масштаб использования минералов и соединений пегматитовых жил в последние годы весьма значителен и выражается общей годовой ценностью порядка 60 млн. золотых рублей.

Особый промышленный интерес к пегматитовым жилам вызывается возможностью комплексного их использования. При правильной промышленной эксплуатации должны быть хозяйственно использованы все составные части вырабатываемой жилы, причем нередко только такое ведение дела может обеспечить выгодность предприятия. Примером такого комплекса может служить совместное нахождение минералов: аквамарина, вольфрамита, касситерита, топазовой породы (как абразивного материала), соединений висмута. Наиболее типично сочетание эксплуатации: полевого шпата + кварц + какой-либо редкий металл или урановые соединения (Мосс в Норвегии), или цирконий и гафний (Крагерё в южной Норвегии), или литиевые соединения и тантал (Южная Дакота в США; Манитоба в северной Канаде). Нередко добыча драгоценных камней и коллекционного материала сопровождается отборкой литиевых соединений бериллиевого сырья. Такая комплексная эксплуатация требует весьма продуманного и научно и технически правильного ведения горного дела, с учетом дешевого обогащения или разделения полезных ископаемых.

Необходимо иметь в виду ряд трудностей при поисках, разведке и эксплуатации пегматитовых жил. Их нельзя недооценивать при экономическом подходе к постановке горной выработки, так как, в противоположность какому-либо месторождениям железных руд или золотым россыпям, пегматитовые жилы оконтурировать значительно труднее. Правильная разведка может быть связана только с пробной эксплуатацией, но и это часто не гарантирует от возможных неожиданностей как в сторону истощения, пережима или даже полного исчезновения пегматитовой жилы, так и в сторону непредвиденного расширения и открытия крупных богатств.

За исключением добычи кварца и полевого шпата, предварительная разведка коих может в общем указать на порядок запасов, эксплуатация всех остальных полезных ископаемых очень трудна, требует весьма строгого научного контроля и больших оборотных средств.

Список полезных ископаемых гранитных пегматитов

Элементы

Гелий	Кремний	Цирконий	Цезий	Радий-уран
Литий	Калий	Ниобий	Гафний	Торий
Бериллий	Скандий	Молибден	Таитал	
Фтор	Рубидий	Олово	Золото	
Алюминий	Иттрий	Редкие земли	Висмут	

Специальные минералы

Мусковит (и флогопит)	Криолит	Аидалузит и дюмортьерит
Полевой шпат и пегматит	Корунд (наждак)	Биотит
Гранат	Кварц	Графит

Драгоценные, поделочные и технические камни для точных приборов

Изумруд	Турмалин	Циркон
Корунд (сапфир)	Гранат	Эвклаз
Кварц и его разновидности (горный хрусталь, морион, дымчатый кварц, аметист, розовый кварц)	Хризоберилл (александрит) Топаз Полевые шпаты Сподумен	Фенакит Корнерупин Лепидолит Кордиерит Письменный гра- нит
Берилл (аквамарин, воробьевит)		

Поиски и разведка пегматитовых месторождений

Поиски и разведка пегматитовых месторождений до последнего времени велись случайно, бессистемно, без каких бы то ни было руководящих идей. Огромные пегматитовые поля, например Манитобы в Канаде или Блэк-Хиллс в Южной Дакоте, разведывались случайно, непланово и не давали возможности подойти точно к определению запасов; не менее случайную картину представляли раньше поиски и разведки на полевой шпат и споду в Северной Карелии. Более систематически велись поиски слюдяных жил в Восточных Альпах и в Восточной Сибири.

Приводимые ниже соображения позволяют внести некоторую ясность в это положение и дать основные руководящие идеи для поисковой и разведочной литературы. Тем не менее и их анализ при самом вдумчивом применении в полевой обстановке является недостаточным и нередко не позволяет предсказывать общий ход пегматитового процесса и его пространственное распределение. Весьма вероятно, что только очень детальное тектоническое изучение гранитного очага, анализ его механических деформаций по Клоосу и, наконец, точный геологический анализ взаимоотношений гранита и боковых пород позволяют подойти с большей углубленностью к разрешению нашего вопроса. Особенно это относится к самым миоарлитовым пустотам, которые нередко вытянуты по одному определенному тектоническому направлению¹.

¹ С успехом для поисков пегматитов более ранних геофаз можно применять радиоактивные методы.

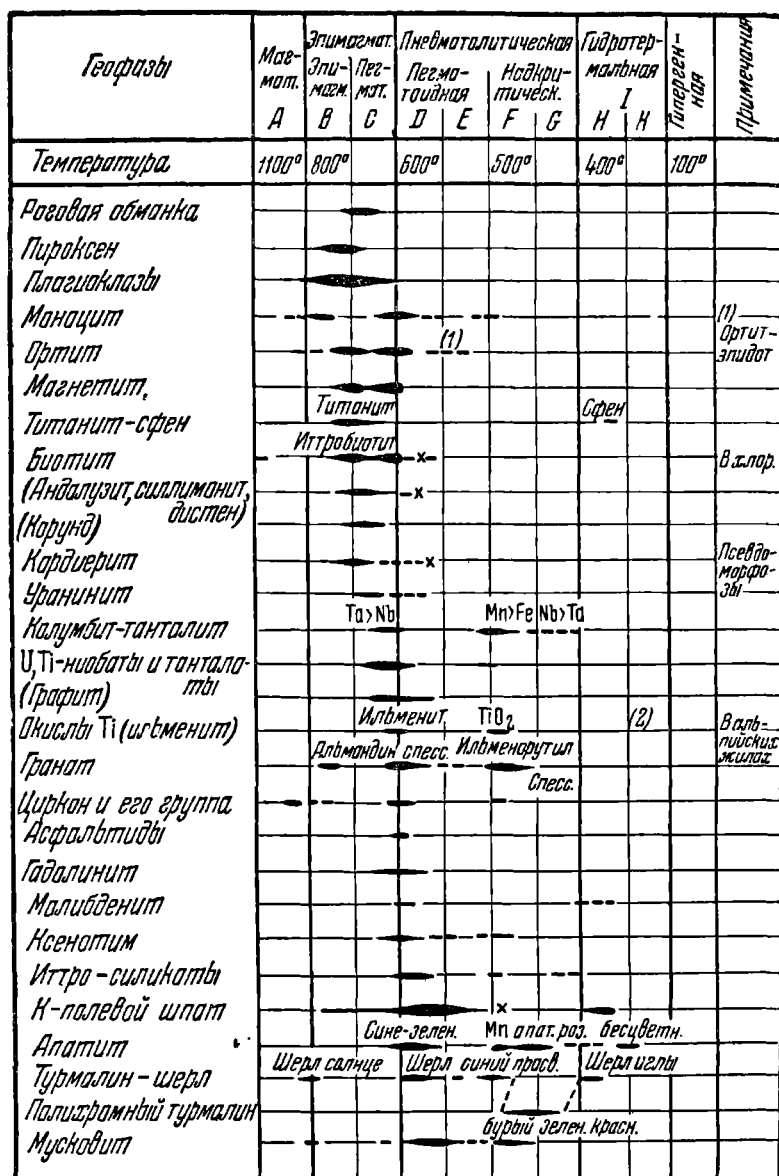


Рис. 40. Общая сводная геохимическая

В диаграмме помещены лишь типоморфные минералы в обычной последовательности геохимической эволюции остаточного гранитного расплава, нанесены замещения (опрокинутыми крестиками), а также основные типоморфные черты главнейших соединений. Эта диаграмма позволяет разобраться в сложном комплексе гранитных пегматитов; по ней полевиков, найдя положение какого-либо установленного в жиле минерала, может предвидеть, как соедине-

Поиски и эксплуатация пегматитовых жил представляют ряд очень крупных затруднений, связанных с самой природой этого минерального тела. Объединяя под этим термином всю совокупность разнообразных остаточно-магматических выделений, мы этим самым объединяем такие морфологические типы, которые резко разнятся друг от друга по характеру и типу эксплуатации.

Наиболее легкими и плановыми становятся разведка и эксплуатация для пегматитовых жил — вне самой материнской породы;

14	15	16	17	18	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
—	—	—	—	—	(H)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	(H ⁻¹)	He	(Li)	(Be)	(B)	(C)	(N)	—	—	—	—	—	—	—	—	(BO ₃) ⁻³
C	N	(O)	(F)	Ne	(Na)	(Mg)	(Al)	(Si)	(P)	—	—	—	—	—	—	—	—	(AlO ₂) ⁻² (SiO ₂) ⁻² (PO ₄) ⁻³
S	P	—	Cl	Ar	(K)	(Ca)	(Sc)	(Ti)	(V)	(Cr)	(Mn)	(Fe)	—	—	—	—	—	(TiO ₂) ⁻² (V ₂ O ₅) ⁻²
Ce	—	—	—	Kr	(Rb)	(Sr)	(Y)	(Zr)	(Nb)	(Mo)	—	—	—	—	—	—	—	(Nb ₂ O ₅) ⁻² (MoO ₄) ⁻²
Sn	—	—	—	Xe	(Cs)	(Ba)	(La)	(Hf)	(Ta)	(W)	(Re)	—	—	—	—	—	—	(Ta ₂ O ₅) ⁻² (WO ₄) ⁻²
—	Bi	—	—	Rn	N°87	(Ra)	(Ac)	(Th)	(Pa)	(U)	—	—	—	—	—	—	—	—

Рис. 41. Поле телокристаллизации в развернутой менделеевской таблице. Сводка элементов, принимающих участие в отложениях гранитных и нефелинсyenитовых пегматитов.

Диаграмма показывает, что элементы гранитных пегматитов располагаются в менделеевской таблице совершенно определенными полями (блоками). Обозначения: простой кружок — типичные элементы пегматитовых образований; двойной кружок — наиболее специфические для пегматитов элементы; перечеркнуты элементы общего поля, которые не принимают участия в образовании пегматитовых минералов; в скобках (простых или двойных) — элементы малого значения.

в этом случае они носят более или менее определенный характер, следуя определенным тектоническим направлениям: или вкост или по простиранию свиты вмещающих пород. Состоя из устойчивых минеральных тел, особенно кварца, и весьма устойчивого письменного гранита, такие жилы нередко выделяются в рельефе и этим облегчают поиски и эксплуатацию. По простиранию жилы иногда характеризуются четковидным строением, при котором места крупных раздутий сменяются нередко весьма тонкими узкими пережимами. Зальбанды обычно из письменного гранита и потому чаще всего игнорируются: часто в зальбандах накапливается биотит, не интересный для эксплуатации. Задача разработки сводится обычно к выемке центральных частей раздутия, что для мощных жил Фенноскандии осуществляется открытым разномом. Крупные разработки кварца и полевого шпата возможны лишь при открытых работах, наличие более редких минеральных тел позволяет прибегать и к подземным. В слюдяных жилах нередко работает только всякий бок, чаще всего обогащенный мусковитовой слюдой.

Гораздо труднее эксплуатация более мелких пегматитовых жил или пегматитовых гранитных зон. Примеры Шерловой горы в Забайкалье и Мурзинки на Урале показывают, как трудна разведка и эксплуатация таких спльно ветвящихся и неправильных систем. И в этом случае нередко только крупные открытые работы могут заменить и трудную разведку, и

поиски, и самую добычу. Прекрасным примером значения таких открытых работ служит добыча на Мокруше (Мурзинка), где в течение многих десятков лет старатели работали на жилах, пробираясь по всем их извилинам китайскими ходками из грубо и случайно опущенных дудок. Только когда по почину С. Х. Южакова (из дер. Южаковой) казенные работы широко вскрыли все месторождение, удалось выяснить и характер самой жилы—«пластины», и ее среднее падение, и простираение. В конце концов одна сравнительно небольшая вскрыша оказалась экономически выгоднее, чем десятки неудачно проведенных вслепую шурфов.

Характерным свойством мелких извилистых пегматитов и миаролитических зон является их скученность, массовая приуроченность к определенным участкам гранита, нередко к его контактным зонам охлаждения. Обычно в этом сплетении неправильных образований трудно ожидать каких-либо закономерностей в простирании или вообще в направлениях процессов. Правда, иногда они как будто намечаются, находясь в связи с отдельностями охлаждения и с другими элементами микростроения гранитов по схеме Клооса. Но обычно этого не наблюдается. Поэтому вся природа пегматитового процесса в этом случае диктует единственный рациональный метод как разведки, так и эксплуатации,—открытыми работами в большом масштабе, которые нередко сами в дальнейшем уже позволяют частично заменить выработки штольнями, канавами или ямами. Такие разработки, конечно, иногда оказываются весьма дорогими, но в своей основе они необходимы не только при эксплуатации, но особенно при разведке и экономической оценке какого-либо месторождения. В случае полиметалличности и комплексности полезных ископаемых открытые работы облегчают сортировку и обогащение полезных продуктов.

Мы видим, что экономическая оценка и разведка пегматитовых жил представляют ряд затруднений и наталкиваются на такие особенности, которые в якие предварительные подсчеты делают часто проблематическими или даже ошибочными. В случае очень крупных пегматитов, в которых эксплуатируемым веществом является или кварц или полевои шпат, такие расчеты возможны и могут быть более или менее обоснованными; в случае слюды они делаются уже значительно более шаткими; наконец, для ряда редких металлов и для драгоценных камней мы наталкиваемся обычно на совершенно исключительные трудности. Приходится сочетать разведку с пробной эксплуатацией, брать средние из весьма изменчивых и колеблющихся цифр и по этим данным рисовать себе наиболее вероятную картину экономики эксплуатации. В противоположность коренным месторождениям, всегда бесспорной и экономически более ясной являлась эксплуатация элювиальных верхов разрушенных пегматитов, как это наблюдается для мусковитовой слюды в Индии.

Эти замечания не должны, однако, умалять экономической ценности пегматитовых месторождений. Они только показывают, как трудна и неверна калькуляция при их разведке и разработке. Пегматитовые жилы в этом отношении несравнимы с рудными залежами, точно оконтуриваемыми, или даже с жильными полями пневматолитов и гидролитов определенного простираения и определенной минерализации.

Комплексная эксплуатация минералов гранитных пегматитов

Рис. 40 дает нам прекрасное представление о тех комплексах полезных ископаемых, которые могут добываться при сплошной эксплуатации жилы. Если мы будем следовать в диаграммах слева направо, т. е. от вы-

котемпературных зальбандов к более холодным центральным частям (оси) жилы, то мы можем установить следующие комплексы:

1. Монацит, ортит, магнетит, руды тория и железа — тип I.
2. Черные минералы — руды ниобия, тантала, редких земель, иттрия, урана, отчасти пиркония и гафния — тип II, источник ряда важных редких металлов.
3. Полевой шпат (микроклин), кварц, изредка берилл, а в зальбандах элементы второго комплекса — тип III.
4. Слюда, изредка в пей монацит, самарскит и уранинит (второго типа), нередко берилл — тип III.
5. Берилл, топаз, дымчатый кварц (в меньшей степени слюда и полевой шпат) — тип IV.
6. Лепидолит, касситерит, колумбит, турмалин полихромный, сподумен, воробьевит — тип V.
7. Лепидолит, поллуцит, литиевые фосфаты, иногда воробьевит — тип VI.
8. Криолит, криолитионит, колумбит и частично сульфиды цинка, меди и свинца — тип VII.

При очень крупной минерализации и хорошей расслоенности и эти комплексы комбинируются друг с другом, например: $2 + 3 + 4$; $5 + 6 + 7$ и т. д.

Значение геохимических диаграмм пегматитов для разрешения ряда промышленных проблем

Уже из всего изложенного можно видеть, как важны приведенные соображения для разрешения ряда чисто практических проблем.

Правильное построение и применение геохимической схемы в каждом данном поле может дать грамотному геологу и геохимику основные линии для понимания хода процессов, а в руках опытного полевого исследователя даст возможность не только ставить правильный диагноз, но и предсказывать ряд явлений.

Поэтому в настоящей главе я лишь кратко приведу те основные выводы практического характера, кои вытекают из этих схем.

В ж и л ь н о м п о л е. Детальный геохимический анализ отдельных жил и их типов позволяет устанавливать их взаимоотношение с гранитными очагами, причем в определенной закономерности пегматитовые типы I, II, III, IV связаны с самим гранитным батолитом, а типы V и VI приурочены к более отдаленным частям, контактам, покрову гранита и т. д. Тип пегматита (т. е. его номер) в общем определяет расстояние жилы от очага. Отсюда вытекают важные указания для поисков новых пегматитов определенных типов:

П о з р а с т у. В схеме, благодаря разнице в эрозии, мы должны ожидать встретить преобладание более высоких номеров в пегматитовых полях молодых гранитов (кайнозойских и киммерийских) и их отсутствие в сильно эродированных древних докембрийских пластах. Однако такое положение правильно только грубо статистически, тем более, что определяющим является не возраст, а степень эрозии, а последняя зависит в первую очередь от тектоники, рельефа, распределения базиса эрозии, климатического режима и т. д.

Поэтому к возрастным различиям, как таковым, надо относиться с большой осторожностью, хотя наводящими они все же могут служить: так, в древних платформах мы скорее будем ожидать типов пегматитов I—II и отчасти III (с титаном, редкими землями, ниобием, танталом, ураном), тогда как в молодых жильных полях чаще будут встречаться жилы с литием, ниобием, цезием, фосфатами и т. д.

П о г л у б и н е. Равным образом приводимая схема устанавливает некоторую зависимость между типом пегматита и глубиной его залегания. На составе жил может сказаться уже разница глубин в несколько сот мет-

ров, а потому при изрезанном горном рельефе можно иногда даже в обнажении наблюдать батиметрические различия: наиболее высокие номера типов нередко кверху содержат минералы геофазы К (цеолиты), в глубинах жил заменяясь начальными геофазами пегматитового процесса. Эта закономерность имеет большое значение и практически говорит о постепенности изменения состава жилы при углублении очагов горных пород или при переходе к таким тектоническим участкам поля, в которых мы вправе ожидать сечения более глубоких зон. Совершенно очевидно, что только глубокое знание тектоники данного района, характера и распределения его магматических батолитов позволит поставить правильный диагноз указанных взаимоотношений. Во всяком случае литиевые и цеолитные пегматиты чаще будут связаны с более высокими зонами массивов (кровлей), слюдяно-оловянные — с самыми контактами батолитов, а настоящие редкоземельные и шерловые будут непосредственно залегать в самом батолите и продуктах его глубинной инъекции. Эти идеи блестяще оправдались при поисках пегматитовых жил в Туркестанском хребте (Средняя Азия).

По отдельным зонам жильного тела. Очень важные данные дает нам детальный геохимический анализ в расслоенных пегматитах, где в общей схеме к определенным зонам приурочены определенные минеральные виды (полезные ископаемые); так, например, минералы титано-тантало-ниобиевой группы мы будем ожидать в частях, прилегающих к зальбандам, в определенной связи и пространственной зависимости от зоны письменного гранита, скоплений биотита и т. д. Равным образом при поисках чистых полевых шпатов мы будем их ожидать в центральных частях жил, но до кварца, также с преимущественным накоплением к висячему боку жильного комплекса. Каждый минеральный вид (за несколькими исключениями) в общем по преимуществу связан с определенной геофазой, т. е. с определенными частями пегматита. В других случаях необходимо пользоваться закономерным изменением типоморфных свойств минералов, особенно кварца, полевого шпата, турмалина, слюд и т. д.

По парагенезису. Тесная связь определенных минеральных видов с определенными геофазами позволяет устанавливать наиболее характерные парагенетические группы: нахождение, например, касситерита говорит о возможности одновременного нахождения ниоботанталатов, скопления литиевых соединений должны совпадать с накоплением полихромных турмалинов, причем цезиевые соединения должны выделяться в парагенетическом соотношении с литиевыми соединениями, но несколько позднее их, и т. д., т. е. нахождение определенных минеральных тел возможно лишь на фоне применения общей геохимической схемы.

Главнейшая литература

А. Е. Ферсман. Пегматиты, 1932, I, 581—607 (изд. 2-е). Готовится к печати значительно пополненное и переработанное 3-е издание. [Т. I. Гранитные пегматиты. Изд. Акад. Наук СССР, 1940.— *Ред.*].

Б. ПОИСКИ В МЕТАМОРФИЧЕСКИХ ПОРОДАХ

7. ПОИСКИ В РАЙОНАХ КОНТАКТОВ МАГМАТИЧЕСКИХ ПОРОД

Контакты различных пород между собой представляют обычно наиболее интересные для поисков места, но их изучение и анализ до сих пор геохимически не освещены.

В сущности, всякая пара нетождественных химических образований может, а в иных случаях и должна явиться началом геохимической реакции. Так, например, налегание в обычной осадочной свите глины на известняк является источником геохимических реакций, вызываемых циркулирующей вод и приводящих, в результате взаимодействия растворов щелочных из известняка и кислых из глины (с гипсом, продуктами окисления колчеданов, кремневыми растворами и т. д.), к новообразованию гидратов глинозема, или SiO_2 , скоплений железных руд и т. д.¹

Однако настоящим контактами являются также сочетания геохимических систем, из которых одно является активным химическим или физическим деятелем. Поэтому обычно под именем контактного метаморфизма мы разумеем геохимические взаимодействия магматических пород и холодных осадочных или застывших ранее магматических или метаморфических образований. Во всех приведенных случаях явление контакта заключается в обмене химическими элементами между соответственной парой, термальном, флюидном и химическом воздействии одной на другую, в стремлении, в общем, к у р а в н и в а н и ю с о с т а в а, т. е. к созданию новой единой равновесной системы. При этом особенно важным является изменение физико-химических факторов: теплового режима, давления и особенно величины рН, на что до сих пор не обращалось достаточного внимания.

Минерализация контактного процесса зависит от очень многочисленных факторов и их сочетаний и поэтому может носить очень различный характер. Мы остановимся лишь на основных типах, причем будем при-нимать во внимание влияющие г л у б и н ы п р о ц е с с а, которое играет огромную роль, определяя судьбу летучих компонентов.

Мы рассмотрим последовательно проблему полезных ископаемых в связи со следующими парами:

- 1) гранит + карбонаты,
- 2) гранит + основные или ультраосновные породы,
- 3) гранит + глинистые породы, сланцы,
- 4) гранит + кислые эффузивы (порфиры, туфы, лицариты),
- 5) габброидные породы + карбонаты.

Гранит и карбонаты

Наиболее интересен геохимический тип, для которого наибольшая минерализация связана со средними глубинами, обилием летучих компонентов и чистым составом карбоната (контакты с известняками активнее, чем с мергелями или доломитами).

Минеральные образования связаны по существу с влиянием CaCO_3 на силикатную породу. При температурах контакта практически CaCO_3 разлагается на $\text{CaO} + \text{CO}_2$, а последняя выделяется в виде углекислых источников и терм (при пониженном внешнем давлении).

Действие CaO на породу связано не только с воздействием Са как катиона, но обычно и с увеличением щелочности расплава, т. е. повышением рН расплава гранита и его дериватов².

Избыток сильных катионов требует для нейтрализации образова-

¹ Об этих явлениях, названных мною «катагенезом», см. А. Е. Ферсман. Геохимия России, 1922, 1—31; Геохимия, 1934, II, 101, 123.

² В зависимости от сочетания t и рН получаем три случая:

а) высокая t , низкий рН — CO_2 легко уходит и остается избыток СаО; сильное повышение рН;
 б) низкая t , низкий рН — сохраняется CaCO_3 как слабая щелочь;
 в) высокая t , высокий рН — местное сохранение CO_2 с понижением рН.

ния комплексных анионов, и, следовательно, мы приходим к таким основным результатам контакта:

I. Образование комплекса кальциевых силикатов.

II. Выделение в скарн летучих комплексов (обычно кислых с фтором, хлором и сульфидами).

III. Повышение pH и образование минералов с комплексными анионами.

Первый тип вообще не дает полезных ископаемых. Второй ведет к образованию месторождений летучих элементов, т. е. соединений ионов, обладающих активной поляризацией, как вольфрам, молибден, цинк и ряд сульфидов.

Необходимо повсеместное, по всему Союзу, изучение скарнов, причем для этого нужно дать им геохимическое и геологическое освещение, наметив этим путем руководящие идеи для поисков.

Однако главное полезное ископаемое, которое характеризует гранитные контакты, — это скопления магнетита (гора Магнитная, Тельбес по р. Томи и др.). До сих пор не было никаких идей, которые могли бы сколько-нибудь логично объяснить грандиозные скопления железа, без всякого сомнения в основном связанные с самим гранитом, несмотря на то, что в последнем содержится обычно лишь 1—2% $\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$. Скопления в сотни и миллионы тонн железной руды требуют полной деферризации десятков и сотен кубических километров гранитной породы для того, чтобы накопилось железо на территории в несколько километров. Вынос железа из глубин летучими газами, фтором и хлором не может, конечно, объяснить этого факта, тем более, что остается несомненным влияние контакта с карбонатной породой. Столь же мало обосновано предположение о каких-то летучих силикатах и их позднейшем разложении. Ведущиеся в литературе споры не привели до сих пор ни к каким результатам. А между тем намечается связь этого явления с величинами pH остаточного гранитного расплава. Основные факторы, которые необходимо иметь при этом в виду, сводятся к следующему:

1. При контакте на достаточных глубинах идет диссоциация CaCO_3 на $\text{CaO} + \text{CO}_2$; последняя удаляется вверх, первая уходит в магматический расплав, повышая его pH.

2. Эта реакция особенно резко идет при чистых известняках, а не доломитах (чему отвечает и более обычное накопление магнетита в контактах с чистым CaCO_3).

3. Повышение pH имеет место особенно при щелочном характере самого гранита, т. е. если его pH само по себе довольно высокое.

4. Обогащение сильными катионами, как Ca^{+2} , ведет к превращению в комплексные анионы имеющихся в расплаве катионов гранитной магмы: такое превращение возможно энергетически только для трех- или четырехвалентных катионов, а в случае гранита — только для Al, Ti и Fe. Первый элемент в щелочных гранитах уже и сам по себе замещает $(\text{SiO}_4)^{-4}$ в полевошпатовой решетке и, следовательно, носит характер комплексного аниона; второй (Ti) в гранитах содержится в очень незначительных количествах; поэтому только Fe³ может соответственным образом нейтрализовать среду, превратившись в анион и связав с собой Ca, Mg и Fe⁺², т. е. двухвалентные катионы. Нам делается понятным образование типичного гранитового скарна, причем само минералообразование зависит от к и с л о р о д н о г о п о т е н ц и а л а.

Если свободного кислорода мало, то главная часть железа уходит в закисной форме в метасиликаты (типа геденбергита) и образования магнетита почти не происходит — таковы, например, глубинные и древние скарны Фенноскандии (Фалун).

Гранит и кислые эффузивы (порфиры, туфы и т. д.)¹

Контактное воздействие гранитов на порфиры и другие кислые эффузивы очень своеобразно, и если правильны современные идеи о генезисе так называемых «вторичных кварцитов», то ход процесса можно себе представить в следующем виде: воздействие гранита заключается в разложении горячими щелочными водами полевых шпатов с выносом всех одно- и двухвалентных катионов из поля контакта (калий, натрий, литий, кальций, магний и железо). Остающийся остаток тоже дифференцируется, и в самих породах остается лишь кварц (вторичный кварцит), а в особых участках накаплиются в геофазы С — F следующие минералы: к о р у н д, а н д а л у з и т, диаспор, кварц, рутил, топаз, турмалин, (пирит), а в геофазы G — K: п и р о ф и л л и т, серицит, лазулит, кварц, рутил, пирит, а л у н и т, а г а л ь м а т о л и т.

Минералы, набранные разрядкой, являются полезными ископаемыми. Геохимически эта схема не вполне понятна, и еще менее пока понятно основанное на ней концентрическое строение скоплений:

в центре корунд с рутилом,
далее андалузит + корунд,
чистый андалузит,
андалузит + кварц,
агальматолит + кварц,
вторичный кварцит.

Во всяком случае на этот генетический тип надо обратить особое внимание и изучить его более углубленно с геохимической точки зрения (ср. стр. 603).

Габброидные породы и карбонаты

Контактное воздействие габброидных (диабазов, траппов) и вообще основных пород ранее отрицалось, так как признавали только пневматолитическое воздействие гранитных магм; однако в последнее время начали накапливаться факты, отмечающие своеобразные и очень значительные скопления скарнов и магнетита. Очевидно, что мы имеем дело с очень мощным воздействием перегретых паров воды, высокой температуры и небольших количеств летучих газов (углекислота, хлор, фосфор, фтор). К этому типу относятся еще загадочные контакты восточносибирских траппов (гроссуляр, ахтарадит) и большие скопления магнетита в метасиликатном скарне Ангарского района. Этот интересный тип контактов еще нуждается в геохимическом обследовании.

Общий вывод

Поиски полезных ископаемых и минералов в области контактов многообразны и не ограничиваются приведенными случаями. Поисковик в поле должен особое внимание обращать на все контакты, все места сочетания различных химических систем. С одной стороны, эти места являются местами наименьшего сопротивления механическим воздействиям, с чем связано наличие зон ослабления, тектони-

¹ Частично сюда же относится обильная грейзенизация с вторичными слюдками вместо полевых шпатов, накоплением топаза, касситерита, флюорита и некоторых других минералов (например, молибденита). В некотором отношении образование вторичных кварцитов может рассматриваться как крайний член процессов грейзенизации (ср. стр. 603).

ческие разломы, повторные внедрения магм и растворов; с другой же — всякое сочетание разнородных химических образований ведет к их взаимному воздействию и перегруппировке элементов.

Контакты в широком смысле этого понятия должны внимательно обследоваться. Для магматических пород очень важно выяснение прежде всего, имеется ли в данном случае истинный контакт или наблюдается позднейшее перемещение (в холодном состоянии). Необходим внимательный анализ изменения как активной, так и пассивной породы в сторону от непосредственного их соприкосновения. Различия наблюдаются и при разном положении контактной плоскости: боковые контакты обычно слабее, чем верхние, более горизонтальные; большую роль в накоплении летучих соединений играют контакты антиклинального строения и т. д.

Главнейшая литература

- Н. П. Аникиев. Геология и минералогия ангаро-илимских железорудных месторождений. Труды Вост.-Сиб. геол. треста, 1936, вып. 19.
 Д. С. Коржинский. Термодинамика и геология метаморфических реакций. Зап. Мин. об-ва, 1935, LIV, 1—16; Подвижность и инертность компонентов при метасоматозе. Изв. Акад. Наук СССР, сер. геол., 1936, 35—60; Зависимость минералообразования от глубины. Зап. Мин. об-ва, 1937, LVI, 369—395.
 В. И. Лучинский. Петрография. 1937, III, 268—280, 300—390.
 А. А. Полканов. Метаморфизм горных пород. 1931, 1—200.
 А. Е. Ферсман. Пегматиты, 2-е изд., 1932.
 V. M. Goldschmidt. Die Kontaktmetam. Kristianiagebiet. Kristiania, 1911. Vidensk. Skrift., I Math.-Nat. Kl., 1911, № 1.
 A. Harker. Metamorphism. London, 1932.
 E. Leitha. W. Mead. Metamorphic geology. 1915.
 P. Niggli u. W. Grubemann. Die Gesteinsmetamorphose. 1924. (Перевод под заглавием «Метаморфизм горных пород»; 1933, 1—375 (литература).)
 Ch. R. Van Hise. Treatise on metamorphism. Monogr. U. S. Geol. Survey, 1904, № 47.

8. ПОИСКИ В РАЙОНАХ ГНЕЙСОВ И КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СЛАНЦЕВ

Поиски в метаморфической свите пород в общем не легки, сложны и не укладываются в рамки простых геохимических схем. Поэтому дать конкретные руководящие указания довольно затруднительно, тем более, что и сами гнейсы и сланцы весьма различны как по составу, так и по возрасту, строению и происхождению.

В гнейсированных зонах мы прежде всего встречаемся с влиянием верхних частей гранитов и, следовательно, их наиболее кислой остаточно-пегматитовой геофазы. Поэтому нередко можно говорить о пегматитизации покрывающих гранит пород; эти пегматитизированные геозоны отвечают большим глубинам и высоким температурам, а по схемам классификации пегматитов соответствуют геофазам В—С. Поэтому практический интерес может быть связан в них лишь с накоплением монацита, реже ортита (очень характерный генетический тип в Северной Америке), или титано-ниобатов, обычно с избытком железа (в красных пегматитах).

Особое значение в гнейсированных областях и в метаморфических сланцах принадлежит слюдяным пегматитам и связанным часто с ними скоплениям кианита, андалузита. Слюдяные сланцы как бы способствуют образованию хороших слюдяных пегматитов, что очень типично для Индии, района реки Мамы в Сибири и т. д. Однако необходимо иметь в виду, что именно в гнейсах часто встречаются палингенетические гранитные пегматиты, т. е. вторичные выплавления наиболее легкоплавкой части какого-либо ранее бывшего комплекса; эти пегматиты обычно лише-

ны ценных полезных элементов, но иногда характеризуются крупными скоплениями полевого шпата и кварца.

В зоне кристаллических сланцев разнообразие вносятся различием типов самих метаморфических сланцев — сингенетические образования могут дать линзы и скопления различных соединений сульфидов, магнезита, талька, кварцевых линз, гематита, магнетита и т. д. Из позднейших процессов внедрения особенно характерны в сланцах альпийские жилы (ср. стр. 726), кварцевые жилы различных типов (стр. 640) и т. д.

Поиски должны вестись с одновременным генетическим, петрографическим и геологическим изучением всей сланцевой свиты.

Главнейшая литература

- У. Грубенман и П. Ниггли. Метаморфизм горных пород. 1933, 231—267.
В. А. Обручев. Полевая геология. 1932, 1 (7). Наблюдения над метаморфическими породами.
А. Е. Ферсман. Пегматиты, I (2-е изд.). 1932, 231—280.
P. Niggli. Die Krystallfunde in den Schweizer-Alpen. «Die Alpen», 1935.

В. ПОИСКИ В ЭФфуЗИВНЫХ ПОРОДАХ И ОБРАЗОВАНИЯХ

9. ПОИСКИ В ОБЛАСТЯХ БАЗАЛЬТОВЫХ ИЛИ ДИАБАЗОВЫХ ПОКРОВОВ

Районы излияния базальтов, траппов или диабазов охватывают огромные территории и у нас в Сибири представляют область еще очень многочисленных и важных поисковых исследований.

Мы кратко по пунктам перечислим основные геохимические проблемы практического характера, которые связаны с выделениями базальтов их куполами или покровами.

1. Необходимо прежде всего учитывать, что сам базальт или диабаз, как таковой, имеет значение (в зависимости от его химического состава и структуры) как материал для каменного литья, как первоклассный материал для дорожного полотна и, в случае высокого содержания нефелиновых минералов, как материал для стекла.

2. Поиски особенно интересны в тех частях излияний, где лава имеет пузыристый характер (что особенно часто бывает в ее краевых частях или при подводных магматических извержениях). В пустотах, жеодах или жилах можно ожидать скоплений халцедона или агата (для технических целей), иногда в свободных полостях наблюдаются щетки ограночного аметиста. Центральные части таких жеод нередко дают скопления первоклассного исландского шпата, отделенного от породы зелено-синими прослойками селадонита (иногда — ценная краска, так называемая веронская земля). Вообще обилие селадонита и местное позеленение пород служат наведением на поиски этих полезных ископаемых.

3. Очень важны, хотя и редки, скопления сульфидов железа, меди, никеля, кобальта в виде линз, прослоек и целых обогащенных горизонтов¹. Эти очень интересные с практической точки зрения образования связаны обычно с периферическими частями интрузий, иногда с контактами и всегда с некоторой дифференциацией породы в сторону выделе-

¹ Пространственно и генетически намечаются три типа:

- а) дифференциация послыюно с обильными скоплениями бедных руд;
- б) контактные шпирь и жилы неправильной формы с избыточной медью;
- в) нижние контакты интрузии с накоплением никеля и платиновых металлов.

ния более кислого остатка. Характерными для этих образований металлами являются: железо, медь, никель и кобальт с серой и иногда с селеном и мышьяком; очень обычно повышенное содержание платиновых металлов (особенно палладия). Места скоплений сернистых металлов часто выделяются ржавыми пятнами и потеками и резко бросаются в глаза в обнажениях черных пород.

4. Очень важны иногда сопутствующие интрузиям и экструзиям т у ф ы имеющие значения как пупцолановые добавки к цементу.

5. В поисковых работах необходимо особое внимание обращать на контакты этих пород. Хотя, в общем, их контактное действие слабо, тем не менее нередки в контактах месторождения магнетита, сульфидов, а в некоторых специфических случаях — образования своеобразных минералов контакта, как, например, немалита, имеющего некоторое практическое значение, графита (при контакте с углистыми породами).

6. Особенное значение имеют явления в ы в е т р и в а н и я, которые при определенном климатическом режиме дают недурные б о к с и т ы, богатые железом.

Главнейшая литература

Ф. Ю. Левинсон-Лессинг и Н. Л. Дилакторский. Траппы Восточной Сибири. Труды СОПС, 1932, вып. 1.

10. ПОИСКИ В КИСЛЫХ ЭФФУЗИВНЫХ ПОРОДАХ (ГРАНИТПОРФИРАХ, КВАРЦПОРФИРАХ, ТРАХИТАХ, ЛИПАРИТАХ И Т. Д.)

Кислые эффузивные породы в условиях атлантических процессов представляют в общем очень мало данных для экономической геологии, и в пределах Запада Евразии (до Енисея, примерно) гранитпорфиры, трахиты, липариты, хотя и являются частично носителями ряда полезных ископаемых, но не дают какой-либо закономерной и типичной картины. Их насыщение летучими компонентами вообще слабо, пневматолит и гидротермальная деятельность не очень интенсивны, контакты мало эффективны, иногда наблюдается моффетный автопневматолит, рудные выделения мало типичны (кроме золота). В условиях Запада Евразии мы можем перечислить лишь несколько примеров минералообразования, не дающих притом единства геохимических идей:

1. Обогащение золотом кислых интрузивов и эффузивов в Трансильвании (сильный автопневматолит пород и рудный процесс специфического типа).

2. Местное автопневматолитическое разложение трахитов с накоплением алунита и опала (разложение сульфитными и сульфатными водами полевых шпатов)¹.

3. Контактные образования с накоплением гроссуляров и датолита — руда на $\text{В}_2\text{О}_3$.

4. Очень обычны в связи с излиянием эффузивов минеральные источники.

Много разнообразнее и важнее эффузивы в тихоокеанском комплексе. Их характеристика с геохимической точки зрения пока затруднительна, но несомненны следующие их черты:

1) сильное телескопирование, благодаря чему геофазы процесса оказываются сближенными и даже наложенными друг на друга; отсюда

¹ Сюда же можно отнести и процессы алунитизации пород (Закавказье), как результат постмагматической деятельности.

исключительная комплексность руд и слабая их дифференциация (особые методы селективной металлургии);

2) обычно более молодой возраст образований (меловой — третичный);

3) разнообразие минерализации (золото, олово, фтор, висмут, свинец, цинк). Вероятны селен и теллур.

Вообще с кислыми эффузивами и их минерализацией приходится в Союзе встречаться лишь в районах молодого вулканизма и молодых тектонических движений (Кавказ, Дальний Восток, северо-восточная Сибирь), и практически мало значения они имеют в районах более древних, герцинских или каледонских образований (Урал). Впрочем, ряд киммерийских процессов в Средней Азии носит несколько сходный характер.

11. ПОИСКИ В РАЙОНАХ ДЕЙСТВУЮЩИХ ВУЛКАНОВ

Хотя на территории Союза мы имеем лишь одну область действующих вулканов (Камчатку), но все же к этому генетическому типу частично должен быть отнесен и Кавказ, для которого ряд извержений (например, Эльбруса) относится, повидимому, к эпохе деятельности человека. Исследования последнего времени американских геохимиков и геофизиков над вулканами Аляски открыли основные геохимические черты этих процессов, частично хорошо изученных ранее на Везувии (Лакруа, Замбонини, Каробби и др.).

Не говори о самом магматическом процессе, который приносит обычно мало полезных ископаемых в лавовых образованиях¹, пеплах и туфах, мы должны в выделениях магматических газов и эманаций наблюдать ряд очень ценных веществ, хотя отсутствие практических скоплений их для целей эксплуатации и суживает сильно этот список.

Прежде всего мы должны считаться в районе действующих вулканов с газовыми выделениями: CO_2 , H_2S , SO_2 , SO_3 . Из них могут улавливаться для использования только углекислые струи, тогда как следующие три газа лишь косвенно приводят к образованию практически ценных минералов: $\text{H}_2\text{S} + \text{SO}_2$ дает серу, иногда в значительных количествах (Япония); образующаяся путем окисления серная кислота приводит к образованию крупных скоплений alunита, а в иных случаях, разлагая силикаты, ведет к образованию благородного опала (Трансильвания). Таким образом, мы можем встретить в районе вулканов: серу, алунит и опал, что необходимо иметь в виду при поисках.

Особенно интересны сами выплеты и солевые накопления вулканов, содержащие Cl, F, S, Se, B, As, Hg, K, Cs, Rb, (Li), (NH_4) , CO_2 и ряд тяжелых металлов, как Mn, Fe, Cu, Ni, Pb, Zn, Tl, характеризующие эти образования, обычно мало дифференцированные, рассеянные и потому имеющие пока малое практическое значение².

Практическое значение, как мы знаем по опыту Италии и Кордильеров, могут иметь в этом смысле только мышьяк, бор и частично ртуть³. Мышьяк нередко собирается в возгонах или в осадках горячих

¹ Исключение составляет лишь лейцит, если считаться с его практическим использованием в Италии для получения K и Al.

² Геохимически интересно, что упомянутые элементы занимают крайние группы развернутой менделеевской системы: 1, 12, 13, 15—17, причем характерно преобладание нечетных атомов. Что касается металлов, то это атомы сильной активной поляризации и потому низких температур кипения их солей (следовательно, ионы наименьших эквивалентов). Ср. стр. 648.

³ Может быть, частично и нашатырь (Камчатка).

терм, и его скопления могут иметь несомненное значение; б о р известен в виде налетов борной кислоты или боратов, однако практическое значение имеют лишь или более отдаленные от очагов соффионы или вторичные отложения в озерах (Тибет). Р т у т ь известна лишь изредка в более далеких от очагов концентрациях (например, Монте-Амиата).

Но особенно интересны и важны в районе вулканов горячие термы, носители большинства указанных веществ, нередко обогащенные отдельными элементами (особенно бромом и мышьяком), что может быть обнаружено лишь на основе детальных анализов. Необходимо вообще иметь в виду, что отличие на глаз всех этих образований весьма затруднительно и требует попутной химико-аналитической работы.

Интересно, однако, подвергнуть приведенные выше списки элементов некоторому геохимическому анализу.

В последних выделениях вулканов мы должны ожидать накопления химических элементов или соединений максимальной летучести, подвижности и растворимости. С этой точки зрения мы не только можем проанализировать выше приведенный список, но и предсказать возможность нахождения и других элементов. Летучесть кристаллических решеток вызывается вообще двумя причинами:

1) сильной активной поляризацией ионов, понижающей температуру кипения; таковы летучие галоидные соединения металлов типа купро и частично промежуточных: Cu, Pb, Zn, Fe, Mn;

2) образование замкнутых решеток многовалентных ионов с островами-молекулами: CO_2 , SO_3 , комплексными ионами $[\text{BO}_3]^{-3}$ и др.

Приведенные элементы и соединения весьма характерны для вулканических эманаций, что, таким образом, становится совершенно понятным. Максимальная растворимость и химическая способность к миграции определяются прежде всего малой энергией решеток; таковы для:

катионов — ионы с наименьшими эками и вэками¹:

Cs, Br, K $[\text{NH}_4]^+$, отчасти Ba и (Sr)

анионов простых

Br, Cl, F

анионов комплексных

$[\text{CO}_3]^{-2}$ $[\text{SO}_3]^{-2}$

Теоретически весьма вероятно нахождение в вулканических эманациях таллия, ион которого $^{+1}$ обладает и относительно низкими эками и большой активной поляризацией, что должно вести к летучести и к растворимости в условиях вулканических выделений. Поэтому возможность накопления солей Tl $^{+1}$ в этих условиях не исключена. Столь же понятен и свинец; не исключено нахождение стронция (?).

Таким образом, данные современной кристаллохимии и энергетического анализа решеток не только объясняют список обычных элементов вулканических эманаций, но и намечают поиски новых и более редких элементов, как Tl (или № 87).

Общие замечания. При анализе вулканических очагов необходимо держать в памяти два основных закона Сен-Клер-Девилья: 1) состав газовых эманаций меняется закономерно при движении от центра к периферии (C-S , $\text{SO}_3 \rightarrow \text{CO}_2$, H_2O); 2) состав газовых эманаций меняется во времени, по мере охлаждения очага (примерно в том же порядке).

¹ Мало вероятны комплексы с еще меньшими эками, как то: $[\text{NO}_3]$, $[\text{ClO}_4]$, $[\text{JO}_3]$ и др., ибо они требуют избытка свободного кислорода, что обычно не имеет места.

Первичные выделения эманаций при выходе на земную поверхность подвергаются воздействию двух факторов: окисления кислородом воздуха и гидратации вадозными водами.

Поиски скопления полезных ископаемых необходимо вести в более холодных и более отдаленных геофазах вулканического процесса. Они могут быть эффективны лишь в случае производства на месте аналитических исследований, что особенно важно для отличия соединений с таллием, цезием, фтором, бором и другими редкими элементами.

Главнейшая литература

- Б. И. Пийп. Термальные ключи Камчатки. Изд. Акад. Наук СССР, 1937 (ряд интересных общих указаний).
 E. T. Allen. Chemical aspects of volcanism. J. Frankl. Inst., 1932, 193, 29.
 A. Br un. Recherches sur l'exhalaison volcanique. Genève, 1911.
 P. Niggli. Die leichtflüchtigen Bestandtheile im Magma 1920.
 F. Wolff. Der Vulkanismus. 1914, 1, 549—638.
 F. Zambonini. Mineralogia Vesuviana. Изд. 2, Рим, 1936 (изд. 1, 1909).

Приложение

12. ПОИСКИ В РАЙОНАХ УГОЛЬНЫХ ПОЖАРОВ

В некоторых местностях подземные угольные пожары в глубинах тянутся десятилетиями лет и в их результате возникает целый ряд вторичных минералов возгонов. Изучение этих образований имеет скорее чисто минералогическое значение, за исключением только скопления белого или желтого пашата $[\text{MnCl}]$, который в иных условиях (например, при угольных пожарах в Центральной Азии) накапливается в мелкопромышленных масштабах. Не исключено и местное значение перегретых углей, превращенных в природный кокс. Опыты подземной газификации обещают дать ряд очень интересных и новых минералогических продуктов, которые пока еще не изучены, но на которые надо обратить самое серьезное внимание.

Совершенно особый тип минерализации связан с пожарами колчеданных месторождении, в результате которых образуется ряд специфических минералов. Полезные ископаемые неизвестны; сейчас изучаются на Урале И. Н. Вертушковым.

Г. ПОИСКИ В ТЕКТОНИЧЕСКИ НАРУШЕННЫХ РАЙОНАХ

13. ПОИСКИ В РАЙОНАХ ТЕКТОНИЧЕСКИХ ДВИЖЕНИЙ И ДИСЛОКАЦИЙ

Нельзя переоценить роль тектоники в геохимических процессах, и нет никакого сомнения, что только тесная и углубленная связь геотектоники и геохимии может привести к точной формулировке законов распределения и перемещения веществ в земной коре и образования месторождений.

Тектонические линии разного рода и масштаба и связанные с ними дизъюнктивные и пликативные дислокации определяют тип и масштаб геохимических процессов миграции, и поэтому огромное значение в каждой области при организации поисков полезных ископаемых принадлежит прежде всего изучению тектонических черт района (рис. 42).

Вообще мы должны признать, что:

- Тектонические черты предопределяют геохимические особенности.
- Тектонические линии и узлы являются вообще и геохимическими линиями и узлами.
- Чем сложнее тектоническая история — тем богаче и своеобразнее минерализация и ее геохимические особенности.
- Определенные типы тектоники предопределяют и особые типы геохимической миграции.

— Тектонические циклы во всей их последовательности ведут к закономерностям минерализации и к геохимическим циклам.

Уже из этих положений мы можем сделать вывод об огромном значении связи между тектоникой и геохимией и о необходимости разработки этого

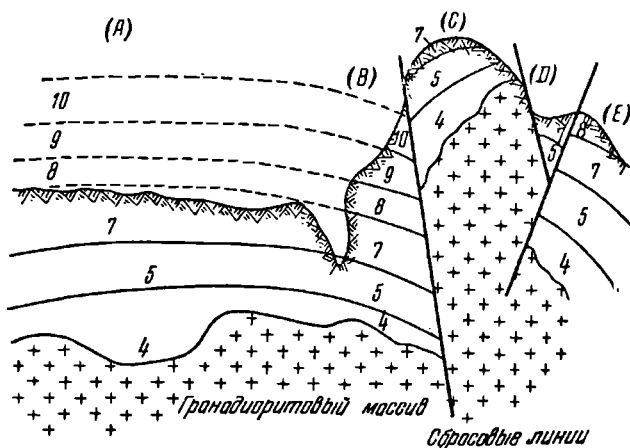


Рис. 42. Схематическое изображение расположения геохимических центров в областях сильно нарушенной тектоники.

Крестиками обозначена гранитная интрузия; прямыми линиями — направление сбросовых линий и смещений отдельных зон. Арабскими цифрами намечено расположение зон нормального геохимического концентратива. Мы видим, что в опущенном крыле наблюдаются более высокие зоны, в приподнятых же частях они скорее могут быть снесены эрозией. Практическое построение такого рода схемы для каждого данного месторождения на основании тектонического анализа представляется совершенно необходимым для понимания рудного процесса в определенных частях дислоцированного рудного поля.

вопроса как основы распределения химических элементов и полезных ископаемых в земной коре. Из грубой технической схемы и современной теории геосинклиналей следует обычная последовательность магматических типов, которая, однако, носит характер общей закономерности в конечном разрезе (а именно сверху вниз):

8. Поднятие щелочных пород, взрывы карбонатитов и др.
7. Излияния эффузии порфиров и других кислых эффузивов и порфиров.
6. Гидротермальный (рудный) ореол вокруг гранитов.
5. Дериваты гранитной магмы: жилы, пегматиты, ашлиты.
4. Гранитные интрузии и экструзии } двух фаз: до и во
3. Интрузии сyenитов и диоритов } время орогенеза.
2. Поднятие глубинных основных пород (дунитов, норитов и пр.).
1. Подводные извержения — эффузии диабазов, мелафиров, офиолитов и т. д.

Следовательно, в нормальной и типичной схеме орогенеза (но далеко не обязательной) мы будем встречаться со следующими основными положениями:

- 1) ход дифференциации идет постепенно в сторону кислых гранитных и порфировых магм и остаточных горячих растворов;
- 2) кислые породы чаще прорезают ультраосновные, чем наоборот;
- 3) прорезание гранитами и их дериватами ультраосновных пород ведет к определенному циклу полезных ископаемых;
- 4) прорезание гранитов основными породами, несмотря на более высокую температуру последних, менее интересно с практической точки зрения;

5) конечные гранитные фазы тектонических и геохимических процессов обычно приходятся на гребни цепей и потому связаны с высокогорными районами — осями тектонических и орогенических линий;

6) изучение гранитных ореолов в связи с тектоникой местности особенно важно с практической точки зрения;

7) разломы последних фаз орогенеза и взрывные процессы ведут к выделению щелочных магм из глубин и, по мнению Коссмата, заканчивают цикл орогенеза, отмечая последние пароксизмы глубинных газовых выделений.

Как ни заманчива стройность приведенных положений, приходится все же предостеречь от предположения их обязательности и неизменчивости. Это только схема, статистически наиболее вероятная; в ней, однако, особо важным является тесная связь геохимических концентраций с типами и возрастом тектонических движений.

Вопрос о тектонике и связи ее с геохимическими процессами представляет особую важность в случае наложения нескольких систем тектогенеза, подвижек и т. д. Всякое тектоническое омоложение связано с нарушением старой однородности, возможностью новых химических процессов, перемещением растворов и т. д. Старые геохимические системы при этом подвергаются перегруппировке, выносу более легко растворимых соединений, окислению сульфидных руд и т. д. В ряде областей, где, например, альпийские процессы налагаются на герцинские (как в Средней Азии), такое наложение приводит к ряду новообразований.

Главнейшая литература

- F. K o s s m a t. Paläogeographie und Tektonik. 1936, стр. 400 и след.
P. N i g g l i. Erzlagerstätten, magmatische Aktivität und Grosstektonik. Zs. prakt. Geol., 1928, XXVI, 159—164.

14. ПОИСКИ В РАЙОНАХ ПЛИКАТИВНЫХ ДИСЛОКАЦИЙ И ШАРИЖЕЙ

В районах складчатых горных систем и шариажей мы наблюдаем ряд геохимических явлений, которые довольно резко отличаются от процессов, связанных с глубинными дизъюнктивными дислокациями. Последние открывают обычно выход магматическим породам или высокотермальным растворам, с чем обычно связаны обильная минерализация и образование рудных месторождений жильного типа. В противоположность этим явлениям вертикальных разрывов, в случае складчатых систем и шариажей почти не нарушается связь с глубинными зонами и характер геохимических процессов оказывается связанным лишь с изменением водного и кислородного режима, общих физико-химических условий пород, особенно термальных; в этом случае мы имеем дело с подъемом термальных слабо минерализованных вод, изредка с содержанием глубинной CO_2 . Эти горячие воды не приносят каких-либо глубинных элементов, но производят преобразование пород, образуя главным образом тот тип жил, который мы называем а л ь п и й с к и м (см. стр. 726); в них мы имеем дело лишь с перегруппировкой соединений боковых стенок, и главнейшими минералами для них являются: кварц, альбит, адуляр и ряд более редких минералов чисто научного значения¹.

¹ Образование крупных скоплений чистого радиокарпа связано именно с этим типом. Ниггли (1935) подчеркивает роль упрощения химических соединений в альпийских жилах путем их разложения на самостоятельные окислы: SiO_2 , TiO_2 , Fe_2O_3 , $\text{ZrO}_2 \cdot \text{SiO}_2$ и т. д.

Таким образом, районы подобных поверхностных движений при условии отсутствия разрывов не приводят к каким-либо особым новым минеральным образованиям, но в некоторых случаях весьма значительно перемещают химические элементы: таковы, например, залежи хлористого натрия, которые «выдавливаются» при дислокациях, с перемещением частей кровли в боковые части месторождения. Таковы в особенности миграция нефти и химическая переработка углеводородов в отдельных слоях и горизонтах.

В известняках складчатых систем мы обычно встречаемся с общей их мраморизацией и с образованием отдельных жилков более редких минералов (например, серы, реалгара и горного хрусталя в Карраре), не имеющих практического значения. Интереснее возникающие иногда при этом замещения кальция магнием с образованием доломитов и магнезитов¹.

Особое значение имеет анализ соотношений складчатости, времени ее образования и характера эрозии. Об этом детальнее см. в главе о рудных месторождениях и геохимических концентратах. Хотя абсолютного значения время складчатых процессов не имеет по отношению к минерализации, но все же оно в схеме предопределяет степень эрозионного разрушения, обнажение более глубоких зон геохимических концентров. И в этом случае точное знание геологической и тектонической истории исследуемого района совершенно необходимо.

Главнейшая литература

- У. Грубенман и П. Ниггли. Метаморфизм горных пород. 1933, I, 119—123.
 Д. С. Коржинский. Зависимость минералообразования от глубины. Зап. Мин. об-ва, 1937, LXVI, 369—395 (с литературой).
 Р. Niggli. Kristallfunde in den Schweizer-Alpen. «Die Alpen». 1935. Н. 6, 1—14.
 См. литературу в главе о контактах, стр. 616.

15. ПОИСКИ В РАЙОНАХ ИЗОСТАТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ (ПЕРЕМЕЩЕНИЯ БЕРЕГОВЫХ ЛИНИЙ)

Частные опускания или поднятия целых территорий ведут к перемещению базиса эрозии, изменению береговых линий, углублению или обмелению водных бассейнов.

В каждой осадочной свите пород наблюдается смена петрографических и геохимических образований, что связано обычно частью с изменением климатического режима, колебаниями внешних физико-химических факторов, но главным образом — с колебаниями уровня морей, т. е. с определенными, спокойными движениями тектонического характера.

Наблюдается тесная зависимость между палеогеографией и геохимией осадков; с одной стороны, изменение состава осадков наравне с другими геологическими и палеонтологическими признаками ведет к построению палеогеографических схем, с другой — эти схемы в свою очередь предсказывают характер и направление поисков ряда полезных ископаемых — солей, гипсов, известняков, битуминозных пород, углей, частично нефти и т. д. Мы должны со всей определенностью подчеркнуть огромное практическое значение палеогеографических схем, а продуманные прогнозы могут быть сделаны лишь на основе углубленного разреза осадочных свит и циклов смены пород².

¹ О колебаниях береговой линии и влиянии геотектогенезиса на смену геохимических фаций осадочных пород см. ниже.

² Л. В. Пустовалов в своих новых работах подчеркивает огромное значение закономерных осадочных циклов (между эпохами усиленной складчатости) для накопления определенных полезных ископаемых.

Нет никакого сомнения, что будущей поисковой работе будет предшествовать геохимическая распифровка палеогеографических карт и анализов с выявлением хода изменения двух основных факторов, определяющих ход накопления особенно железа, алюминия, марганца, кремнекислоты, — редокса, т. е. окислительно-восстановительного потенциала, и pH — концентрации водородных ионов, т. е. кислотности растворов. От сочетания этих факторов в ходе геологической истории и получается в определенные моменты накопление руд марганца (низкий pH и высокий редокс), оолитово-силикатных руд железа (низкий редокс и средний pH) и т. д. Все эти вопросы требуют, однако, еще дальнейшей теоретической и особенно экспериментальной разработки.

Во всяком случае в каждой свите осадочных породмы должны различать:

1) одновременные (сингенетические) образования, зависящие от первичных процессов образования осадков,

2) позднейшие образования, возникающие в результате химического взаимодействия между химически разнородными слоями (катагенез).

Современная береговая линия интересна постольку, поскольку испытывает определенное перемещение. Если она отступает и море надвигается на сушу, то геохимические возможности ограничены, ибо накопленные химические и механические продукты уходят под поверхность воды. Гораздо интереснее и важнее отступление моря, благодаря чему создаются условия для отделения соляных бассейнов, лиманов и песчаных отмелей. В этом случае (например, в Крыму) геохимия имеет дело с очень интересной серией образований: последовательным увеличением концентрации солевых растворов в озерах, образованием черных минеральных грязей с их восстановительной средой (SH) и т. д.

Ср. поиски в соляных отложениях и озерах, стр. 648—652.

Главнейшая литература

- У. Твенхофел. Учение об образовании осадков. 1936, 137—141, 688 и др.
А. Е. Ферсман. Геохимия, III, 1937, 127—130, 284—285; IV, 1939, 73, 135, 128.

Д. ПОИСКИ В ТЕРМАЛЬНЫХ ИСТОЧНИКАХ

16. ПОИСКИ В ОБЛАСТЯХ РУДНЫХ ЖИЛ

Введение

Геохимические методы изучения рудных жил представляют очень важную практическую проблему, поскольку они на смену старым полуэмпирическим наблюдениям и опытным данным стремятся выдвинуть ряд теоретически обоснованных закономерностей.

Теоретически, при изучении рудных жил, стоят на очереди следующие основные вопросы:

1) Какова связь жильного поля с тектоникой и магматическими выделениями района?

2) Как изменяется минерализация жилы с глубиной?

3) Как изменяется минерализация поля в плоскости (в плане) и какова при этом смена жильного комплекса?

4) Как изменяется минерализация в самой жиле, от стенок (зальбандов) к самой середине жильного тела?

Все эти вопросы имеют первостепенное практическое значение, и на них должна ответить современная геохимия.

Не входя в детали наших общих представлений по этим вопросам, мы перечислим лишь основные положения геохимии рудных жил:

1. Рудные жилы в основном являются летучими дериватами охлаждающихся на разных глубинах магматических бассейнов.

2. Как дистилляты определенной термодинамической обстановки, рудные жилы не отвечают о д н о й, постепенно меняющейся последовательности осаждения, а состоят из отдельных, более или менее независимых дистиллятов, связанных между собою в общее поле¹.

3. Генетически рудные жилы связаны с магмами различного характера и различной основности, но самые крупные и наиболее минерализованные рудные поля все же приурочены к конечным фазам дифференциации пород, т. е. к породам гранодиоритового и, в особенности, чисто гранитного типа.

4. Связанные с кислыми выделениями летучих погонов, рудные жилы в первых стадиях своих растворов должны обладать более низким рН, который нормально в конце процесса сменяется средней или более высокой концентрацией водородных ионов, т. е. носит несколько более щелочной характер; Впрочем, при дальнейшем воздействии кислорода в верхах жил снова устанавливается кислотный характер (весьма низкий рН).

5. Согласно пункту 4, большую роль в ходе минерализации играют боковые породы, и изменения в их характере весьма обычны при прохождении жилы. Этим намечается взаимодействие жильных растворов и боковых пород, которое может дойти до полного метасоматоза (метасоматические жилы). Параллельно изменяется и рН, нормально в сторону повышения.

6. Все минералы рудных жил можно разбить на две группы: сульфидов (реже окислов) и спутников, образующих рудное тело.

7. В обоих рядах наблюдается полный параллелизм: сначала слоистые решетки со связующими звеньями катионов, далее минералы в нисходящем порядке механической прочности (в порядке понижения твердости) и в конце снова слоистые, мягкие решетки без связующих катионов (т. е. энергетически наиболее слабые). Особенно резко бросается в глаза эта закономерность в табл. 10.

8. Характерно изменение окраски для спутников — от черных или темнозеленых к бесцветным или слабо окрашенным в розовые или красноватые тона; для самих соединений халькофилов — переход от типичных металлических построек к более светлым — красным, желтым или вообще к соединениям с поглощением более коротких волн².

9. Для сульфидов характерны металлический блеск и очень темные цвета; если соединение просвечивает, то оно окрашено в темнокрасный, реже оранжевый цвет.

Таким образом, основная гамма окраски халькофильных соединений — металлический блеск в серых, желтых и красноватых тонах и окраска в красные, бурые, желтые цвета.

10. Вообще последовательность кристаллизации очень выдержанная и, как показали сопоставления многих схем халькофильных рудных месторождений, настолько постоянная, что позволила на этом построить целую систему геохимических концентров.

¹ Этим определяется и характер «пароксизмов» в выделениях, на что особенно обращает внимание С. С. Смирнов.

² В верхах процессов при воздействии кислорода — снова ярко окрашенные или темные тона высших степеней окисления.

Таблица 10

Последовательность выпадения спутников халькофилов

Название спутника	Главные элементы	Побочные элементы	Твердость	Окраска	Примечание
Биотит	K, Fe, Si, H	Al, Na, Mn	2—3	Черно-бурый	Связан генетически с боковой породой Al, Fe из боковой породы
Цинпвальдит	Li, Fe, Si	Al, K	2—3 (сл.)	Темно-зеленый	
Берилл	Be, Al, Si	Cs, Li	7,5	Светлый	
Мусковит	K, Al, Si, H	—	2—3 (сл.)	То же	
Топаз	Al, Si, F	—	8	»	Нередко с окислами железа — красные, с Mn — розовые тона
Кварц	Si, O	—	7	»	
Плавленый шпат	Ca, F	(Hg и др.)	4	»	
Карбонаты	Ca, Mg, Fe, C	Mn	3—4	Бесцветный	
Серпидит	K, H, Al, Si, Ba, S	Na	1—2 (сл.)	Бесцветный Светлый	
Барит	O	Sr	2,5—3,5		
Каолинит	H, Al, Si, O	—	1—1,5 (сл.)		

Элементы рудных жил

Подобно нашему анализу протокристаллизации, наметим основные группы элементов рудных жил:

Ведущие: S, Fe, Cu, Zn, As, Se, Ag, Sn, Sb, Pb.

Главные: Co, Ni, Mo, Cd, Te, W, Au, Hg, Bi, U(F, H).

Средние: Si, P, Mn, C.

Малого значения: Ga, Ge, платиновая группа, In, Ba, Tl.

Аксессуары и из соседних полей: K, Li, Be, Cl, Ca, Ba, V, Al, Mg. Несомненно слабо значение кислорода, заимствуемого из соседних полей, роль которого усиливается лишь в верхах процессов.

Этот список элементов вообще очень характерен и в сущности определяет основной минерогенез в рудных жилах и в месторождениях тяжелых металлов. Его анализ имеет не только большое теоретическое, но и практическое значение, так как для ряда металлов, как, например, для цинка, свинца, серебра, мышьяка, это — главный источник промышленной добычи. Поэтому на его анализе мы должны остановить наше особое внимание.

Всего кристаллизацией халькофилов связано около 40 химических элементов. Если мы нанесем все эти 38—40 элементов на таблицу Менделеева (рис. 43), то элементы займут совершенно определенное поле, которое слева граничит (частично перекрываясь) с полем протокристаллизации литофилов, а справа заканчивается на подвижных атмо- и гидрофилах. Последовательность кристаллизации в таблице не получает какого-либо очень определенного, закономерного хода, хотя можно сказать, что она вообще ведет в конце процесса к выделению элементов более низкой

	18	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
<i>N^o и символ Р иона КС₃УЭК</i>	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	H	H	
<i>N^o и символ Р иона КС₃УЭК</i>	2	He	Li	Be	B	C	N	O	—	—	—	—	—	—	—	—	—	F	Ne	
			3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
			12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	
<i>N^o и символ Р иона КС₃УЭК</i>	10	Ne	Na	Mg	Al	Si	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Cl	Ar	
			7	25	45	86	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,61 ⁻¹ (1,3)	1,92 ⁰ 2,8	
<i>N^o и символ Р иона КС₃УЭК</i>	18	Ar	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Kr	
			19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	
			4	1,37 ⁻¹ 4	1,06 ⁻² 2,5	1,00 ⁻² 2,1	1,10 ⁻² 2,1	1,00 ⁻² 2,1	1,00 ⁻² 2,1	1,00 ⁻² 2,1	1,00 ⁻² 2,1	1,00 ⁻² 2,1	1,00 ⁻² 2,1	1,00 ⁻² 2,1	1,00 ⁻² 2,1	1,00 ⁻² 2,1	1,00 ⁻² 2,1	1,00 ⁻² 2,1	1,00 ⁻² 2,1	
<i>N^o и символ Р иона КС₃УЭК</i>	35	Kr	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sb	Te	I	Xe	
			36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	
			55	1,27 ⁻² 2,0	1,00 ⁻² 2,0	1,00 ⁻² 2,0	1,00 ⁻² 2,0	1,00 ⁻² 2,0	1,00 ⁻² 2,0	1,00 ⁻² 2,0	1,00 ⁻² 2,0	1,00 ⁻² 2,0	1,00 ⁻² 2,0	1,00 ⁻² 2,0	1,00 ⁻² 2,0	1,00 ⁻² 2,0	1,00 ⁻² 2,0	1,00 ⁻² 2,0	1,00 ⁻² 2,0	
<i>N^o и символ Р иона КС₃УЭК</i>	54	Xe	Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	Rn	
			55	56	57	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86
			1,63 ⁻¹ 3	1,43 ⁻¹ 2,8	1,22 ⁻² 3,5	1,00 ⁻² 3,5	1,00 ⁻² 3,5	1,00 ⁻² 3,5	1,00 ⁻² 3,5	1,00 ⁻² 3,5	1,00 ⁻² 3,5	1,00 ⁻² 3,5	1,00 ⁻² 3,5	1,00 ⁻² 3,5	1,00 ⁻² 3,5	1,00 ⁻² 3,5	1,00 ⁻² 3,5	1,00 ⁻² 3,5	1,00 ⁻² 3,5	
<i>N^o и символ Р иона КС₃УЭК</i>	86	Rn	No ⁸⁷	Ra	Ac	Th	Pa	U	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
			87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	
			—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
<i>N^o и символ Р иона КС₃УЭК</i>	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	

Рис. 43. Геохимическая схема элементов халькофильной кристаллизации (в рудных жилах).

Типичные элементы этих жил поставлены в кружок, элементы особого значения — в двойной кружок, стехиометрический номер элемента, далее химический его символ, затем радиус иона в ангстремах, причем величина валентности (заряда) иона и знак его помещены в виде показателя при цифре. Под ним следует величина, обозначенная как КС₃ (Геохимия, III, стр. 66—74), которая показывает степень термической устойчивости элемента. Нижняя цифра дает величину вака, т. е. $\frac{a}{w}$, или приблизительно R₂, ш что определяет энергию иона в решетке, по расчету на одну валентность и при координации 6. (По Ферману, 1937).

элементов. Мы можем сейчас наметить и закономерность этого замечательного ряда, определяющего ряд важнейших практических законов:

1. Последовательность выпадения в общем закономерна и, несмотря на колебания состава природных дистиллятов, выдерживается с замечательным постоянством.

2. Ряды кристаллизации магматических халькофилов совершенно независимы и подчинены иным законам, чем гидрохалькофилы, так что оба ряда надо рассматривать независимо.

3. Последовательность кристаллизации следует в грубой схеме по менделеевской таблице слева направо.

4. w падает постепенно, заканчиваясь нечетной валентностью 3 и 1 и этим обнаруживая преимущество четной валентности.

5. Очень закономерна смена типа соединений. Сначала типичные координационные ионные или атомные постройки (MoS_2 , SnO_2 , ZnS), потом плеяда сложнейших многообразных и комплексных сульфосолей¹ и самыми последними — совершенно не ионизированные в растворах вещества As_2S_3 и Sb_2S_3 . То же характеризует и спутников халькофилов: SiO_2 , CaF_2 , $[\text{CO}_3]^{-2}$, $[\text{SO}_4]^{-2}$.

6. По отношению к цвету соединений мы в общем наблюдаем (с исключениями) смену окраски: вначале преобладают металлические структуры, потом красные и бурые полуметаллические соединения (например Ag , Tl , Zn) и, наконец, красно-желтые и яркочелые комплексы.

7. Замечательно характерна постепенная смена элементов четных нечетными.

8. Для тех же соединений как по отношению к самим халькофильным минералам, так и к жильным спутникам мы наблюдаем вообще (с некоторыми исключениями) понижение твердости, что неоднократно приводилось в литературе, но до сих пор не могло быть объяснено.

9. Закономерен ход изменения R ионов, которые увеличиваются от 0,68 до 1,49 и выше. Это одно из самых замечательных и ярких проявлений геохимических свойств атома.

10. Рост R и падение w ведет к уменьшению отношения $\frac{w^2}{2R}$, т. е. величины, связанной с энергией решетки; это падение U очень характерно по понижению величины w и охватывает как простые, так и комплексные катионы и анионы. Понижение U тем более интересно, что вообще по сравнению с началом менделеевской таблицы мы имеем значительно более повышенные величины w и U (благодаря поляризации ионов).

11. Понижение U , w и w ведет, одновременно с образованием островных решеток, к резкому понижению твердости, повышению растворимости и понижению кристаллизационной способности.

12. Таким образом, последовательность кристаллизации халькофилов находит себе полное объяснение в понижении энергии их решеток, т. е. в понижении величины $\frac{w^2}{2R}$, чем дается теоретически объяснение явлениям образования геохимических концентров халькофилов вокруг охлаждающихся очагов, геохимических рудных поясов, дуг и зон.

13. Распределение элементов радиально от очага следует закону обратной пропорциональности $\frac{w^2}{2R}$, почему мы можем говорить о расстоянии от очагов для каждого элемента $D = K \frac{2R}{w^2}$. D для каждого элемента определяет его геохимический градиент, т. е. расстояние по глубине, при котором

¹ Обычная последовательность: Bi_2S_3 , Sb_2O_2 , As_2S_3 и сульфосоли Bi , Sb и As .

наблюдается смена одного металла другим. Величины D имеют очень большое теоретическое и практическое значение и несомненно связаны с глубиной залегания очага, быстротой его охлаждения и геотермическим градиентом в данной области¹.

Геохимические концентры халькофилов

Мы называем геохимическими концентрами зональное распределение геохимических образований вокруг остывающих массивов, связанное с постепенным падением температуры от очага к периферии (рис. 46 и 47).

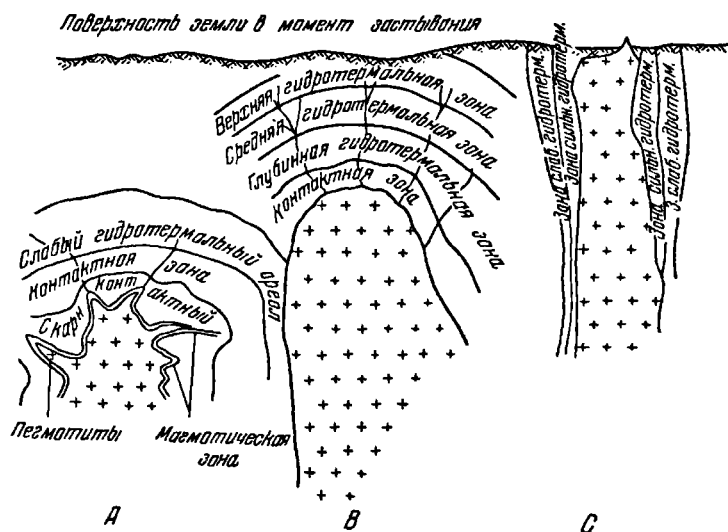


Рис. 46. Характер геохимических концентров при разных глубинах остывания магматического очага.

А — при больших глубинах, благодаря чему образуются зоны мигматизации и скарновый контакт; В — при средних глубинах — наиболее спокойное и типичное расположение термальных и контактных зон; С — своеобразное расположение приконтактных зон в случае поверхностных эффузивных очагов.

Образование халькофилов тесно связано именно с этим типом генезиса, и поэтому нам надо на нем детальнее остановиться.

Всякий охлаждающийся массив можно изучать во времени и в пространстве. В пространстве мы различаем точки разного удаления от центра и, следовательно, точки различных максимальных температур; во времени каждая такая точка проходит от максимума до температуры данной геосферы (рис. 48—50).

Такие концентры построены мною для наиболее обычных магм — гранодиоритовых — и приложены в виде особой таблицы² (рис. 51).

Таблица полностью отвечает доминирующему комплексу магматических полезных ископаемых на территории Союза ССР, но имеет ограниченное применение в районах распространения ультраосновных или щелочных пород. Кроме того, необходимо иметь в виду, что таблица в общем отвечает большим и средним глубинам залегания очагов и не дает в достаточной

¹ Желательно дальнейшее изучение этого вопроса.

² Исправлена и дополнена по сравнению с таблицей во втором томе «Геохимии» (1934).

мере отражения процессов эффузивных фаций кислых пород; поэтому, например, она имеет меньшее значение для объяснения минерализации Тихоокеанского побережья с характерными для него более молодыми и более поверхностными процессами.

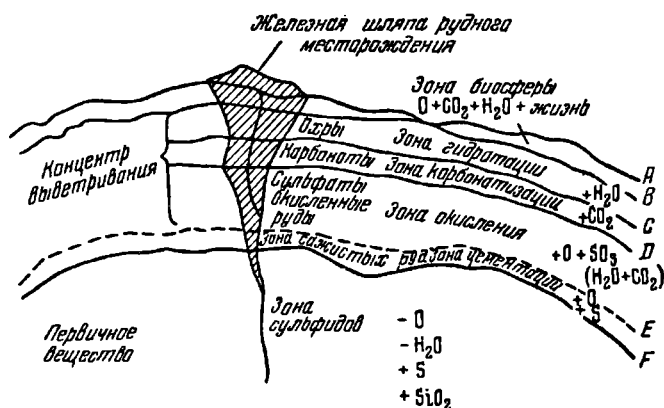


Рис. 47. Гипергенные (вторичные концентры).

А — граница биосферы и атмосферы; В — нижняя граница биосферы; С — граница гидратации (уровень грунтовых вод); D — граница действия угольной кислоты; Е — нижняя граница окисления (нислородная поверхность); F — верхняя граница метаморфизма.

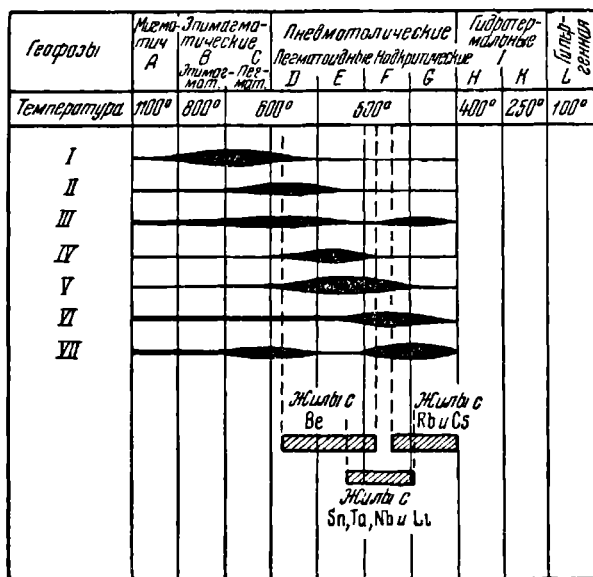


Рис. 48. Сводная геохимическая диаграмма пегматитов Забайкалья, построенная на основе многочисленных наблюдений.

Нельзя также упускать из вида, что таблица, как схема, обнимает ассоциации разных типов гранитных пород, между тем как в породах

гранодиоритового семейства мы наблюдаем разные типы с разной минерализацией. Так, Вернике (1935 г.) дает такую совершенно справедливую схему:

- 1) гранодиориты (кислый ряд),
- 2) кварцевые диориты и кварцевые монцониты,
- 3) кварцевые диориты (и нориты),
- 4) меланократовые диориты (наиболее основной ряд).

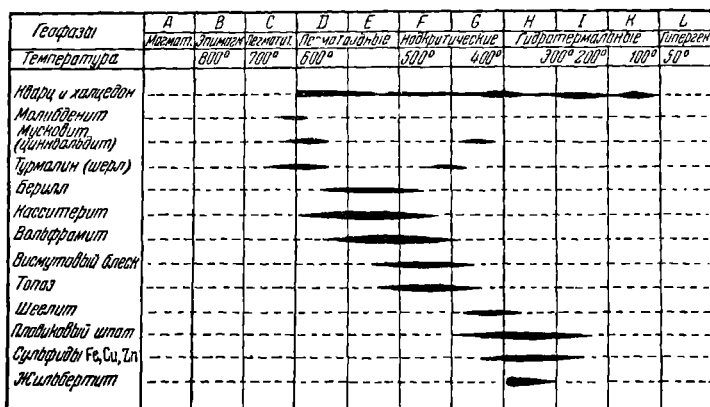


Рис. 49. Схема кристаллизации типичного гранитного пневматолита. Максимальная минерализация в геофазах Е — Г. После Г — начало высокотемпературных гидротерм с сульфидными. Схема очень типична и позволяет ориентироваться в ряде месторождений.

Тем не менее, значение таблицы при работах поискового и разведочного характера столь велико, что в дальнейшем я остановлюсь несколько подробнее на ее объяснении.

Таблица построена обычными методами геохимического анализа в нормальной сетке, где температура точки Q — около 600° , а точка P отвечает температуре около 400° ; таким образом основной ход кристаллизации халькофилов лежит в интервале $700-200^\circ$.

Средняя жирная линия намечает ход остывания самого первичного расплава; вверх от нее намечены сначала продукты ликвации, а затем погоны высокотемпературных дистилляций, начиная с сульфидных и кончая галоидными. При этом интересно отметить, что чем выше температура отщепления газового погона, тем позднее начало выпадения из него твердых компонентов, что связано с особой летучестью этого погона. Процессы кристаллизации этих погон изображены на диаграммах в двух разрезах: во-первых, в последовательной смене обычных ассоциаций, намечающих собою обычные типы рудных жил так, как они описываются, например, в учебнике акад. В. А. Обручева (1934—1935), и, во-вторых, в последовательном анализе наиболее типичных минералов, отвечающих характерным элементам комплекса. Благодаря такому расположению мы можем наблюдать как черты геохимии каждого данного элемента, так и список содержащих его минералов, а проведя от данного минерала вертикальную линию вниз, — и тот рудный тип, для которого данный минерал характерен.

Вниз от жирной линии первичного расплава на диаграмме помещены образования пегматитового остатка, опять в аналогичных вышеприведенным

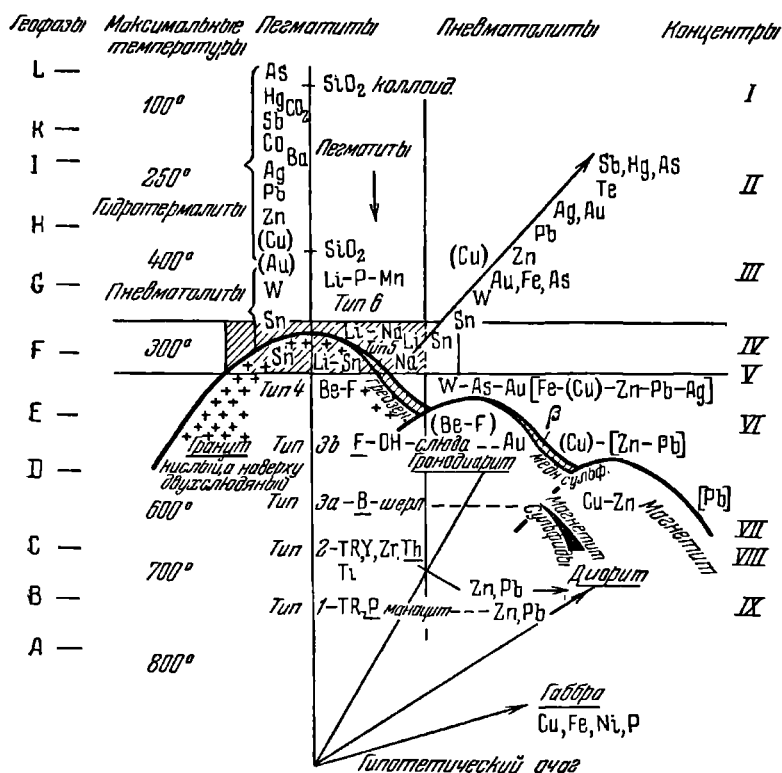


Рис. 50. Схема вертикальных и боковых концентров вокруг охлаждающегося очага магмы. (По А. Е. Ферсману, 1934).

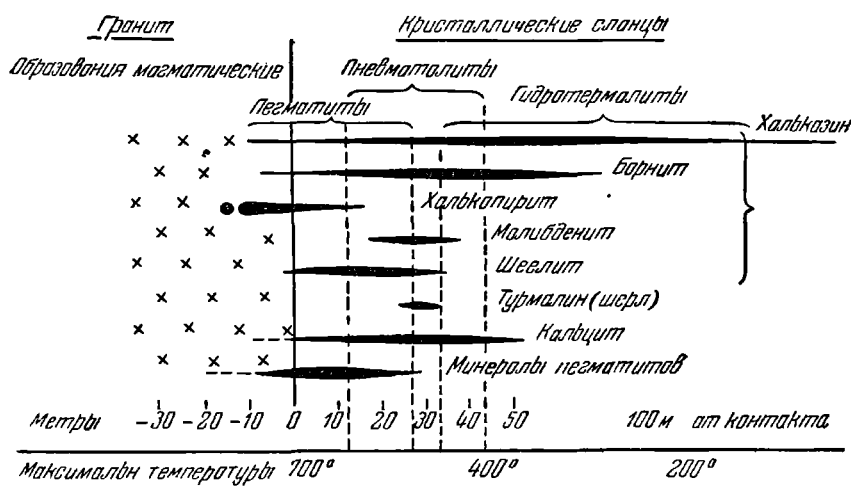


Рис. 52. Геохимические концентры Натас-Майн в юго-западной Африке (по данным 1925 г.).

Диаграмма намечает расположение отдельных минеральных видов и полезных ископаемых по отношению к контактам гранитов с кристаллическими сланцами и устанавливает районы поисков соответственных образований.

А	В	С	Д	Е	Ф	Г	Н	И	К	Л
<u>Очаг мрам</u>			150		Балибия 150-200					<u>Зона окисления</u> 50-75 м
					400	Балибия 400				
			400			Карнугалл				
								500	Карнугалл	
								1000	Пришпран	Зона цементации 2-15 м
								200	Устенск. р.	
								300	Криль-Крик	
<u>Контакты</u>					1000				Христиана (Осло)	
					150-250					
					20-40	Н. Норвегия				
									Типич. пегм.	

Рис. 53. Величина геохимических градиентов в разных месторождениях, по литературным данным.

Эта табличка заслуживает большого внимания, так как показывает, что пространственное выражение нашей диаграммы в природе носит весьма разнообразный характер и зависит, очевидно, от многочисленных причин, связанных с типом боковых пород, с величиной и глубиной магматических очагов, ходом охлаждения, неконцентрацией растворов и т. д. Действительно, мы наблюдаем весьма большое разнообразие интервалов для одних и тех же геофаз, что заставляет с большой осторожностью относиться ко всем выводам и прогнозам в области изменения минерализации с глубиной.

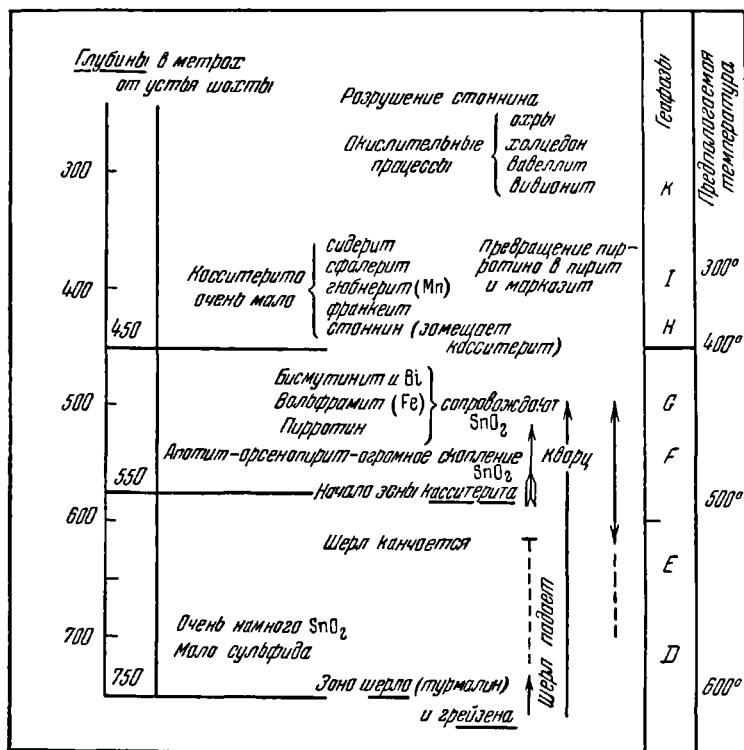


Рис. 54. Схема геохимических концентров оловянных руд Боливии. (По Альфельду, 1931).

Диаграмма совершенно точно намечает геохимический градиент для отдельных геофаз, их сравнительно быструю смену на протяжении 400 м. Диаграмма относится к типичным процессам сульфидно-оловянного оруденения, т. е. к образованиям пневматолитического (не пегматитового) типа.

формах. Особенно любопытно место стыка пневматолитов и пегматитов, как раз в вершине гранитного батолита; геохимически эта точка отвечает границе между геофазами Е и F. Здесь, как это можно было ожидать, наблюдается стык пневматолитовых и пегматитовых процессов, и

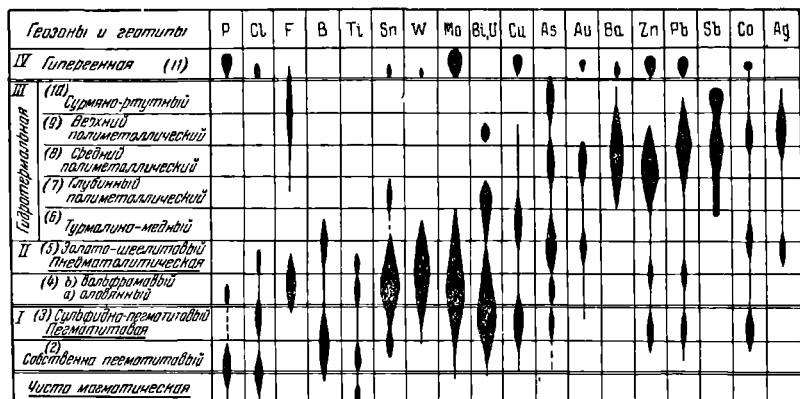


Рис. 55. Геохимическая схема глубинных концентров для некоторых наиболее важных химических элементов (по А. Е. Ферману, П. Ниггли и Г. Шнейдерхену). Нормальные пегматиты и их продукты не включены в схему, за исключением тех сульфидных образований, которые можно параллелизовать с типичными пегматитами.

Ниггли, 1924	Ван-Хайз, 1904	Ферман, 1922	Вермисский, 1925	Рудные концентры первичные	Другие геохимические типы	Характер процессов по Вермисскому, 1900
Зона ±50° метрической	Зона +H ₂ O+CO ₂ +O	Зона гипергенная (супергенная)	Бисфера. Коры метрической 0,5-0,8 км	Холодные гидротермы 100°-200°	— гидротерм — карбонизация — окисления	Водяные
цементация 200°	цементация	цементация	Верхняя 3-4 км	Гидро-термы 200°-300°	сложность руд 2-40 м	Нисходящий пологость глубины 1 км
Эпизона 400°	Аноморфизм	Метаморфизм (по Ниггли)	Нижняя 8-10 км	Пневматолиты		дислокацион. метаморфизм (200-300°)
Мезозона 700°				Пегматиты		Контрактный метаморфизм (300°-700°-800°)
Катазона 800°	H ₂ O					Фреатические
	CO ₂					
Расплав 1200°			Метаморфизм 10-25 км	Граниты 700°		Контрактные
магмат. 1500°				расплав 1800°		

Рис. 56. Схема принятых разными авторами обозначений вторичных геохимических концентров. Сопоставление разных терминов позволяет точнее понять классификацию и строение поверхностной пленки земной коры.

на границе верхнего контакта апикальной части батолита мы видим как бы скрещение этих типов. Строго говоря, лишь налево от этой вертикали преобладают пегматиты; направо тянется поле типичных пневматолитов и терм. Отдельные примеры геохимических концентров даны на рис. 52 — 56.

Геохимический градиент

Под геохимическим градиентом нужно подразумевать расстояние в метрах между отдельными центрами и соответственными геофазами, показывающее смену одной геофазы другой при радиальном направлении движения от магматического очага.

Конечно, такая величина, как и ее аналог — геотермический градиент, подвергается очень большим колебаниям, но тем не менее и для нее могут быть найдены некоторые средние числа, несмотря на сильную зависимость от типа кровли, от тектонических причин, термических свойств окружающих пород, от влияния геотермического градиента и вообще от целого ряда причин, которые мы еще не можем учесть.

Особенно важно иметь в виду, однако, одно явление, которое столь часто забывается: фактическим очагом какого-либо рудного комплекса может быть не тот гранит или порфир, который непосредственно подстилает месторождение, а какая-либо позднейшая интрузия. Сейчас мы все более и более убеждаемся, что богатая минерализация, особенно лития и вольфрама, связана с особыми апикальными, конусообразными батолитами, которые служат как бы отдушиной для газообразных и гидротермальных продуктов и в которые много раз повторно внедрялась гранитная интрузия различных фаз, состава и возрастов; такую картину нам дает ряд батолитов рудных гор и Забайкалья. В этом случае таким исходным очагом является не граница с магматической породой, а какая-то точка ниже (глубже) ее.

Геохимический градиент зависит в сильной степени от глубины залегания магматического очага. В случае глубины 5—8 км мы имеем очень значительный градиент, который увеличивается под влиянием не только спокойного глубинного остывания массива под покровом изолирующих пород, но и геотермического градиента, еще более растягивающего температурные интервалы и этим увеличивающего геохимический градиент. Совершенно обратное наблюдаем мы в месторождениях, в которых магматический очаг остывал гораздо ближе от земной поверхности и очень быстро терял свое тепло, так что все геофазы и отложения оказывались территориально и батиметрически сильно сближенными; в этом случае геохимический градиент очень мал, доходит почти до нуля, и в одной и той же жиле можно нередко найти отложения всех геофаз, начиная с турмалино-вольфрамитового процесса и кончая полиметаллическими сульфидами, богатыми серебром и даже кобальтом и никелем («телескопирование»).

Разведчику и поисковику очень важно изучение геохимического градиента, так как он позволяет устанавливать изменение минерализации жилы с глубиной. Нередко этому помогают выходы жилы на разных высотах рельефа, как это, например, наблюдалось мною на о-ве Эльбе, где выходы пегматитовой жилы на больших высотах гранитного массива были обогащены цеолитами и содержали много литиевых соединений и цезиевого поллукса, тогда как часть тех же жил в ущельях характеризовалась отсутствием летучих низкотемпературных компонентов и содержала, например, больше шерла.

Такие же соотношения отмечались для полиметаллических руд на Северном Кавказе.

Практические выводы из геохимических схем

Какие же практические выводы должен сделать исследователь из приведенных схем?

Прежде всего он должен сравнить полученные им для исследуемого

им рудного поля геохимические диаграммы с теоретическими и установить их сходство или различие.

Это позволит ему с о с т о р о ж н о с т ь ю сделать ряд практических выводов, которые могут быть сведены к следующим пунктам.

1. Данная жила по своему характеру приходится на определенную точку или, вернее, область в (теоретической) геохимической диаграмме. Тогда все элементы и минералы, лежащие вправо от этой условной точки, должны преимущественно встречаться ближе к центру жилы, дальше от зальбандов. Эти минералы (условно назовем их «правыми»), относящиеся к более низким температурам (если не было повторных процессов), должны частично замещать и вытеснять минералы нашей условной точки, могут их обволакивать, покрывать пластом. «Правые» минералы будут преимущественно накапливаться в раздутьях жил.

Ряд минералов и элементов будет отвечать примерно нашей условной точке. Наконец, третья группа займет место влево; эти «левые» минералы будут залегать ближе к зальбандам и будут более высокотемпературными.

2. Проведенное условное деление на диаграмме на «левые» и «правые» минералы и элементы по отношению к данной условной точке могут быть перенесены и на г л у б и н н ы е о б р а з о в а н и я, и в схеме мы должны ожидать, что «правые» минералы и элементы будут преобладать в верхних частях жил, наиболее отдаленных от магматического очага, тогда как содержание «левых» минералов и элементов должно, наоборот, увеличиваться с глубиной. Однако это правило ограничивается тем, что отдельные дистилляты образуют самостоятельные жилы, и поэтому мы редко наблюдаем п о л н ы й переход, например, вольфрамовой жилы в оловянную (с глубиной), но зато часто в состоянии будем отметить изменения количественных соотношений между элементами; например, с глубиной будет увеличиваться отношение: $\text{Sn} : \text{W}$; $\text{Zn} : \text{Pb}(\text{Ag})$; $\text{Bi} : \text{Sb} : \text{As}$ и т. д.

Масштабы этой шкалы даются геохимическим градиентом (см. выше рис. 53).

3. Вышеприведенные соотношения относились к нормальной последовательности минерогенеза при относительно глубоком залегании магматических очагов и спокойном, медленном и постепенном образовании геохимических концентров. В случае более высокого залегания очага мы наблюдаем наложение отдельных геофаз процесса, благодаря чему получается «телескопирование». Оно отвечает первому пункту, при котором «левые» и «правые» элементы и минералы распределяются не в глубинном разрезе жилы, а сосуществуют в жильном теле, образуя систему как бы вложенных друг в друга трубок — генетических геофаз. Понятно особое значение пункта 1 в случае таких комплексных жил.

4. Усложнение в приведенной схеме вызывается более сложным ходом охлаждения жильных растворов и беспорядочной сменой растворов по их составу, концентрации, температуре, величине рН и т. д. При сложности тектонической истории охлаждения какого-либо массива мы можем ожидать неоднократного повышения температуры, причем очень часто это ведет к резким сменам минералов, к повторному расширению жилы, образованию брекчий и т. д. Геохимик не должен забывать эту сложность процесса охлаждения; при очень внимательном изучении парагенезиса он сможет в ряде случаев установить несколько независимых геофаз процесса и нанести их на геохимическую диаграмму.

5. Приведенные четыре пункта относятся к определенной жиле рудного поля; но вопрос значительно усложняется, если мы перейдем к сравнению нескольких жил между собою и установлению закономерных соотноше-

ний между ними. Прежде всего необходима группировка жил по их тектоническим особенностям, направлению и возрасту; затем необходимо изучение изменения природы и состава жил в плане (радиально), причем этим путем можно иногда наметить центральный очаг (эпицентр очага) и его боковые концентры. Очень характерно изменение минерализации в радиальном направлении, пропуск некоторых ассоциаций, что идет нередко параллельно с петрографическим изменением пород в том же направлении.

Мы заканчиваем на этом краткую геохимическую характеристику рудных жил. Не забудем, что для поисковика и разведчика они имеют кардинальное значение и что точное изучение всего жильного комплекса, его минералов и элементов — задача большого практического значения.

Необходимо привлечь внимание к изданию геохимических монографий, посвященных отдельным наиболее типичным и наиболее изученным месторождениям.

Главнейшая литература

- С. С. Кузнецов. Поиски полезных ископаемых. 1935, 53—70 (популярное издание).
- В. А. Обручев. Рудные месторождения. Часть описательная, 1934, 1—596.
- В. А. Обручев. Геологические предпосылки распространения важнейших полезных ископаемых. Тр. I Всесоюз. конфер. по разм. произв. сил, Госплан СССР, 1933, II, 3—14.
- А. Е. Ферсман. Геохимия. 1934, II, 150—212; 1937, III, 282—320 (литература); 1939, IV, 1—325.
- W. Lindgren. Mineral deposits. 2-е изд., 1919, 1—958.
- W. Lindgren. Ore deposits of the West. States. New-York, 1933.
- P. Niggli. Ore deposits of magmatic origin. New-York, 1929, 4—92.

17. ПОИСКИ В ОБЛАСТЯХ ГОРЯЧИХ МИНЕРАЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ

Районы горячих минеральных источников прежде всего ценны сами по себе, по своему бальнеологическому значению или по содержанию CO_2 . Они очень важны и с общей геохимической и геологической точки зрения, так как указывают на наличие глубинных магматических процессов, на существование дислокационных трещин, на возможность нахождения рудных жил, на связь с вулканической или поствулканической деятельностью и т. д.

При изучении минеральных источников на первом месте стоят следующие две основные проблемы:

1. Выяснение общего геохимического состава воды с точным анализом всех редких элементов и определением их радиоактивности. Очень важно определение содержания Ra, MsTh, Rn и их количественных взаимоотношений.

2. Изучение осадков минеральных вод, из коих главнейшие:

а) известковые туфы (травертины), мраморный оникс, натечный арагонит и т. д.;

б) глинисто-известковые натёки с поглощенным иногда радием (рейс-сахерит); в вулканических местностях известны пестрые дисперсные глины;

в) очень важно накопление в ряде известковых осадков соединений мышьяка и ртути, реже сурьмы, таллия (аурипигмент, гайдингерит, киноварь);

г) накопление самородной серы и алунита.

С геохимической точки зрения интересно, что из тяжелых и легких металлов встречаются элементы конечной гидротермальной кристаллизации,

т. е. соединения с сравнительно малыми эками¹ и низкими валентностями. обладающие, следовательно, довольно большой растворимостью (таковы особенно ртуть, таллий, мышьяк, а при отсутствии иона $[\text{SO}_4]$ — радий, барий, стронций).

Главнейшая литература

- В. И. Вернадский. История минералов земной коры, т. 2. История природных вод. Л., 1933.
 Б. И. Пийп. Термальные ключи Камчатки. Изд. Акад. Наук СССР, 1937, 232.
 E. Allen a. A. Day. Hot springs of the Yellowst. Nat. Park. 1935, 1—525.
 W. Lindgren. Hot springs and magmatic emanation. Econ. Geol., 1927, XXII, № 2, 189—192.
 W. Lindgren. Water magm. and meteor. Econ. Geol., 1935, XXX, № 5, 163—177.

Приложение I

Очень интересна геохимическая роль крупных терм, к которым относятся, например, знаменитые источники Карловых Вар. Главнейший из них — Шпрудель (73°C) дает до 4 млн. л воды в год и выделяет из глубин (по данным Хохштеттера) в год около 500 т CaCO_3 , 12 т CaF_2 , 600 т Na_2CO_3 и 11 000 т Na_2SO_4 , NaCl до 6000 т; к этому надо прибавить² грандиозные количества CO_2 , N и Ar. Если даже осторожно подсчитывать, то в год Шпрудель выносит 3500 м³ солей, а если связывать его с олигоценовыми интрузиями базальтов, то он должен был вынести за истекшее время (около $5 \cdot 10^6$ лет) до 20 км³ солей. Что такие грандиозные количества солей выносятся им, видно из того, что сам выход Шпруделя состоит из массы арагонита в 10 м мощности. Если взять все источники района Карловых Вар, то они, очевидно, со времен олигодена могли вынести до 100 км³ солей, чем вызвали несомненное образование трещин и опускание гранитных массивов в массу базальтовой магмы. Чешские геологи в последнее время связывают эти термы с поверхностными вадозными водами и ювенильной угольной кислотой, которая с Ca и Na из базальтов образует углекислые соли, так что основной состав терм приурочивается к дериватам базальтовой магмы, а лишь небольшое количество элементов, например фтор и литий, могли быть извлечены термами при их прохождении через кислые граниты, из которых они вытекают.

Приложение II

Михоlichem³ была выдвинута интересная теория, которую важно проверить на советском материале; он считает, что состав глубинных терм меняется в зависимости от возраста орогена тех магм, из которых термы вытекают:

1-я группа вод — Ni — Co архейские породы.

2-я группа вод — Sn — герцинские цепи.

3-я группа вод — Pb, Zn — альпийские цепи.

Такой порядок в общем геохимически весьма вероятен и находит себе объяснение в характере геохимических концентров. Автор думает, что эта закономерность имеет и практическое значение.

18. ПОИСКИ В ОБЛАСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТЕРМАЛЬНЫХ КВАРЦЕВЫХ ЖИЛ

Кварцевые жилы являются обычным образованием ряда различных геохимических систем и генетически весьма разнообразны:

1. Наиболее обычные кварцевые жилы связаны с ореолами вокруг гранитных массивов, причем они окружают их как в вертикальной, апикальной части, так и радиально, иногда на расстоянии 2—3 км. Нередко они связаны с пегматитовыми полями, но генетически обычно от них обособ-

¹ Элементы с еще меньшими эками (Na, K, Cl, частично Ca) выносятся водами дальше, как более растворимые.

² O. Michler. Woher kommt der Karlsbader Sprudel. Mitt. Ver. f. Naturfreunde. Reichenb., 1932, 3—51.

³ S. S. Micholich. Das Vorkommen von Schwermetallen in Mineralwässern. Chemie d. Erde, 1933, 440—444.

лены, будучи в своей основе связаны с пневматолитами. Кварц прозрачный и просвечивающий (или слабо дымчатый) говорит о большей связи с пегматитами, и в нем можно ожидать нахождения полевого шпата, флюорита, образований розового кварца, иногда ниобо-танталатов. Кварц жирный, серый, иногда с красными жилками (в его переходах в белый), обычно указывает на золотоносность (пирит и арсенопирит). Кварц чисто белый, молочный, часто совершенно пуст, иногда указывает на шеелит, арсенопирит, золото. В верхних частях жил при выветривании в кварце наблюдаются пустоты бывших в нем раньше минералов, изучение которых очень важно как наведение при поисках, например: «октаэдрической» формы — на шеелит, кубической — на пирит (золото). Необходимо иметь в виду, что жилы молочного кварца очень часто с глубиной переходят в кварц просвечивающий.

Кварцевые жилы нередко богаты сульфидами; но часто кварц заполняет только центральные зоны жил и лишен полезных ископаемых.

2. Часть пегматитов в гранитных полях включает скопления кварца, который в геофазах В—С—D нередко заполняет центральные их части, раздутья и штоки огромными массами кварца белого, молочного и частично розового. Обычно кварц пустой, с полевым шпатом, изредка со слюдой. Практически интереснее его зальбанды в случае их обогащения железом: в красных кварцах можно рассчитывать встретить тантало-ниобаты и соединения редких земель.

3. Кварцевые жилы в метаморфических сланцах очень обычны и носят характер «альпийских жил»; они низкотемпературны, очень часто содержат альбит, адуля, разновидности TiO_2 , много зеленых мелкокристаллических лептохлоритов, окрашивающих жилы и пустоты в них. Обычно в них практическое значение имеет лишь сам кварц, образующий в пустотах оптический горный хрусталь или радиокварц (см. стр. 725).

В общем поисковик-геохимик должен с большим вниманием относиться к кварцевым жилам; особенно важно опробование их на золото.

Е. ПОИСКИ В ОСАДОЧНЫХ ПОРОДАХ

19. ПОИСКИ В ОБЛАСТЯХ ПЕСЧАНИКОВ И КВАРЦИТОВ

Обычно в свитах осадочных пород наиболее «скупыми» с минералогической точки зрения являются песчаники (аркозы), кварциты и близкие к ним породы. Действительно, если они не затронуты каким-либо термальным и рудным процессом, то в них, благодаря малой подвижности SiO_2 , мы наблюдаем мало интересных и практически важных минеральных тел. Некоторое внимание привлекает к себе цемент песчаников, — он может давать интересные, хотя практические и мало ценные образования. Таков, например, цемент, состоящий из CaF_2 (ратовкит), который, вероятно, более распространен, чем это принято думать, и горизонты которого надо искать в пределах Центральной платформы, в отложениях московского яруса преимущественно (и частью пермских отложений)¹. Еще меньше значения имеют растноримые соли в цементе, образующие в сухом климате выцветы иногда $NaNO_3$, который в отдельных случаях кустарно может извлекаться путем выпечлачивания.

¹ Впрочем интересен в цементе еще $BaSO_4$ и $SrSO_4$. Баритовый цемент в песчаниках и конгломератах заслуживает большого внимания.

Более интересные образования мы знаем в условиях контактного воздействия и связанных с ними горячих терм: в результате перекристаллизации кремнезема в некоторых случаях получаются очень значительные месторождения чистого горного хрусталя, весьма ценного для техники (Бразилия, Мадагаскар).

Наконец, не надо упускать из вида, что сами песчаники и кварциты могут представлять практический интерес, как жерновой или строительный камень, а сливные кварциты (например, докембрийские кварциты Карелии и Кольского полуострова) — как ценный материал для динаса или облицовки кислотоупорных химических установок¹.

Примечание: В песчаниках мы имеем очень резкое проявление величин экз: в цементе накапливаются вещества малых экз и экз и относительно большой подвижности (с комплексными анионами). Чем меньше экз, тем подвижнее цемент, тем легче идет выветривание песчаника с образованием форм выдувания и т. д. Наоборот, сами «зерна» образуются из соединений высокой валентности и более высоких энергетических показателей (кварц, циркон, рутил, турмалин, полевой шпат и т. д.). Мы можем, таким образом, связать формы выветривания, выдувания или размывания с энергетическими показателями минералов песчаников и аркозов.

Главнейшая литература

- П. М. Татарин. Курс нерудных месторождений. 1935, II, 217—261.
У. Твенхофел. Учение об образовании осадков. 1936, 204—215.
П. П. Яхонтов. Кварцевые материалы. Нерудные ископаемые, 1927, II, 89—142.
A. Hietaanen. Petrology of Finlandian quartzites. Bull. Com. géol. Finl., 1938, 122.

20. ПОИСКИ В ОБЛАСТИ ИЗВЕСТНЯКОВ (МРАМОРОВ, МЕЛА) И МЕРГЕЛЕЙ

См. также поиски в карстовых районах, стр. 656.

Огромное разнообразие и широкое распространение известняков в земной коре, различия в составе, структуре и свойствах порождают и различия в использовании известняков в строительной и химической промышленности. Чистые сорта (без SiO_2 и MgO) идут в химию, металлургию, сахарную промышленность; мягкие сплошные травертины или туфы — на облицовку зданий (например, туфы Машука около Пятигорска); огромное значение принадлежит мраморам, завоевывающим в строительстве и электротехнике все более и более крупные позиции. Не перечисляя всех применений известняков и мраморов, мы хотим лишь подчеркнуть их огромное значение в экономике народного хозяйства.

Вместе с тем они не богаты какими-либо иными полезными ископаемыми, и, больше того, именно эта чистота и отсутствие посторонних образований и служат достоинством как самих известняков, так и мраморов.

¹ Среди песчаников, переходящих в слабо цементированные пески, могут представлять практический интерес селадонитовые или глауконитовые пески и песчаники (зеленого и сине-зеленого цвета), если из них путем обогащения легко извлечь зерна глауконита (как удобрение или хороший пермутит для очистки вод или защитной краски и пр.). Особняком стоят песчаники, обогащенные Cu , V (с ванадиевой слюдой) и др. Они нередко пропускаются поисковиками, а желтые и зеленые тона соединений принимаются за хлориты или сульфаты железа.

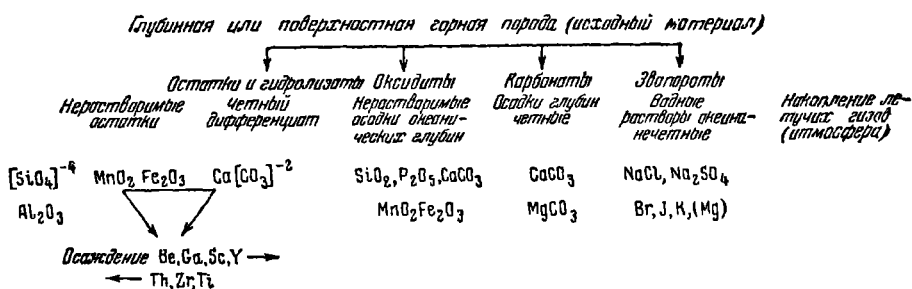


Рис. 57. Схема процессов гипергенеза (выветривания). Интересна связь дифференциации элементов с четностью атомов и ионов.

В этой таблице следуют слева направо: уменьшение роли четных с постепенным усилением роли нечетных, уменьшение величины валентности (w), повышение радиуса ионов как катионов, так и анионов, увеличение растворимости и особенно гидролиза, понижение поляризации, энергии решеток и понижение соответственных янов и эквов, по менделеевской таблице перемещение в левом поле справа налево, от ионов более высоких w — к низким и нулевым валентностям.

А. В неизмененных известняках осадочных свит мы не можем назвать каких-либо ценные полезные ископаемые, и большинство известных в них минералов (кальцит, барит, кварц, аметист) представляют лишь научный интерес.

Три минерала, тем не менее, привлекают иногда наше внимание:

1. Чистый исландский шпат содержится изредка в жилах кальцита, прорезающих известняки. Хотя прозрачные и чисто белые разновидности в этом случае очень редки, тем не менее, они иногда встречаются в больших массивах известняков (Крым, Кавказ в районе Новороссийска и Майкопа) и связаны с холодными водами и перекристаллизацией известняков. Очень важно в этом случае отсутствие желтизны известкового шпата, что наблюдается лишь при условии восстановительной среды и длительной перекристаллизации.

2. Второй минерал, заслуживающий внимания в известняках и мергелях, — це л е с т и н, который в иных районах осадочных известняков образует довольно крупные скопления (по р. Волге, по Северной Двине). Интересно, что скопления целестина по существу приурочены к отложениям определенных геологических эпох — нижне- или верхнемеловым или нижнетретичным, с одной стороны, и пермским или триасовым — с другой; фациально отвечает мелким бассейнам и соляным озерам.

3. Наконец, самым интересным и заслуживающим наибольшего внимания полезным ископаемым известняков в особенности глубоководных меловых отложений является к р е м е н ь. Он имеет применение и как химическое сырье для получения силикагеля и особенно в своих шаровых конкрециях — для шаровых мельниц как абразив. Использование кремня наших меловых отложений в этом направлении необходимо.

4. Особое значение могут иметь в известняках битумы, асфальты и т. д.

Б. В известняках, измененных метасоматозом, мы наблюдаем гораздо большее разнообразие полезных ископаемых.

Действительно, согласно теории эквов, карбонат Са с энергетической выгодой замещается солями Mg, Zn, Pb, Fe, Co и др.

	Са	Mg	Fe ⁺²	Zn	Pb ⁺²
Экви-	1,75	2,10	2,12	2,20	(1,65)

Замещение идет в сторону большей энергетической выгоды и если Pb тоже замещает Ca, то это связано с повышенной поляризацией и пониженной растворимостью солей свинца.

В результате замещения мы наблюдаем в метасоматических известняках скопления полезных ископаемых:

Барита (целестина) . .	Ba, Sr
Магнезита, доломита . .	Mg
Сидерита	Fe
Цинковых галмеев . .	Zn, Cd
Каламина, смитсонита .	Pb
Сферокобальтина . . .	Co

При отсутствии резких специфических окрасок, для этих соединений представляются особо важными их поиски, при которых полевыми признаками нередко являются повышенный удельный вес этих образований и скопления бурых гидратов железа в окисленных частях месторождений. Иногда отличительными чертами являются большая кристалличность и серый (холодный) или желтоватый тон минералов.

О выветривании известняков в карстовом процессе см. стр. 656.

Главнейшая литература

- М. И. Добрынина. Известняк. Сб. «Нерудные ископаемые», 1926, I, 400—434.
 П. М. Татарцов. Курс нерудных месторождений. 1935, II, 104—148.
 У. Твенхофел. Учение об образовании осадков. 1936, 259—299.

21. ПОИСКИ В ОБЛАСТЯХ ДОЛОМИТОВ И ДОЛОМИТОВЫХ МЕРГЕЛЕЙ

Доломиты имеют в общем двоякую историю: часть их носит первичный (синхронный или диагенетический) характер и связана с нормальными осадочными свитами, обычно отвечая первым фазам обмеления морского бассейна; в этом случае доломит перемежается и переслаивается с известняками, а в более продвинутых фазах обмеления — с глинами и ангидритом.

Второй тип доломитов связан с гидротермальным или холодным метасоматозом известняков, носит метаморфический характер и нередко сопровождается магнезитом (например, на западном склоне Южного Урала).

В обоих случаях ход геохимических процессов определяется гораздо более высокими экамагния по сравнению с кальцием (2,12 против 1,75), что приводит к вытеснению магнием кальция из соединений последнего.

Первый тип в общем довольно беден полезными ископаемыми, если не говорить о палыгорските (Среднее Поволжье, г. Горький), который кустарно мог бы идти на местные нужды (как дешевый теплоизоляционный материал).

Поскольку этот тип связан с определенными фациями отступления морских бассейнов, с ним связаны в основном определенные минералы и в первую очередь гипс, целестин и нередко битумы. В этом отношении интересны целые пояса распространения целестина и гипса, а именно в очень интересном, еще мало изученном целестиновом поясе валанжина (нижнего мела) на Северном Кавказе, в ряде горизонтов верхнего мела и нижнетретичных

отложений Средней Азии, где эти месторождения имеют практическое значение¹.

Второй тип геохимически более интересен, особенно благодаря связи с крупными месторождениями ценного и чистого магнезита. Поиски в этом направлении должны вестись на западном склоне Урала, в Енисейском кряже и в районе Малого Хингана на Дальнем Востоке.

Главнейшая литература

- Б. П. К р о т о в. Доломиты, их образование, условия устойчивости и т. д. Труды Об-ва естествоиспыт. Казанск. ун-та, 1925, I, вып. 6.
У. Т в е н х о ф е л. Учение об образовании осадков. 1936, 299—316.
А. Е. Ф е р с м а н. К геохимии окрестностей Кисловодска. Доклады Акад. Наук СССР, 1938, XXI, № 5, 246. См. также Природа, 1939, № 2, 92.

22. ПОИСКИ В ГЛИНАХ И БЛИЗКИХ К НИМ ПОРОДАХ

Поиски в районах распространения глин и каолинов очень интересны и важны, но требуют параллельно большой химической аналитической работы. Необходимо иметь в виду, что глины и каолины главным образом интересны сами по себе для промышленности и заключают в себе мало каких-либо иных особо полезных ископаемых; но вместе с тем нахождение высоко-сортных глин или каолинов всегда говорит о наличии каких-либо специфических химических реакций, которые о д н о в р е м е н н о, в районе отложения глин, образуют месторождения других важных полезных ископаемых.

Глины обыкновенные, отбельные и огнеупорные

Глины имеют самое широкое применение, но отличить на глаз отдельные типы, особенно адсорбирующие глины, фуллеровы земли или бентониты, невозможно; даже химические анализы не приводят к цели без специальных опытов.

Для поглощающих глин (фуллеровых земель, бентонита, гумбина и др.) характерно залегание в районах вулканических пород или пеплов, почему в них нередко включения листочков биотита (например, в крымском киле, кеффекилите) и повышенное содержание магния (или кальция). О влиянии геличины рН см. стр. 583.

В самих глинах мы почти не знаем включений полезных ископаемых, а наблюдаемые в них прожилки или желваки пирита, марказита, гипса, глауконита, алунита и др. скорее являются вредными примесями и почти никогда не накапливаются в промышленных масштабах.

Гораздо важнее закономерность ассоциаций огнеупорных глин с чистыми кварцевыми песками и угольными пластами или прослойками (например, Боровичи — Пикалево около Тихвина, часть Тульского района, связь хороших песков с глинами в Донбассе и т. д.). Эта закономерность ассоциации связана с особыми генетическими условиями, в частности, при образовании углей (восстановительная среда, низкий рН, вынос катионов и т. д.).

Сильно железистые глины могут служить природными красками, причем образуются разных типов охры, мумии и другие пестрые разновидности. Нередки переходы в бокситы, см. поиски руд алюминия, стр. 685.

¹ По данным В. Н. Николаева (1938), повышенное содержание Sr связано с отложениями пермского моря, в котором вследствие слабого содержания иона $[SO_4]$ наблюдается повышенная растворимость $SrSO_4$.

Каолины

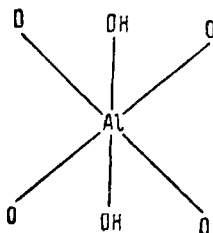
В каолинах мы обычно имеем первичные или вторичные месторождения продуктов гидратации и гидролиза гранитных, реже полсвошпатовых пород типа лабрадорита.

И здесь мы не встречаем внутри залежей каолина каких-либо других полезных ископаемых, за исключением титаномагнетита и ильменита в каолинах Волинщины (из лабрадоритовых пород) и редких переходов каолина в белые бокситы. На Волини вопрос об отмучивании каолинов и использовании тяжелых отходов их промывки представляет интерес.

Как и в предыдущем случае, характерно для вторичных каолинов нахождение в том же районе (по соседству) чистых отмытых кварцевых песков, а также двух химических деятелей, вызывающих новообразование каолинов из графитов: вышележащих слоев бурых углей или поднимающихся из глубин углекислых струй и источников (или их продуктов).

Таким образом, геохимику в районах распространения каолинов предстоит очень ответственная и интересная задача — на основе генезиса каолина делать предсказание о возможности нахождения других полезных ископаемых.

П р и л о ж е н и е. Последние работы П. Ниггли (1938) и И. Д. Седлецкого (1939) показывают, что глинистые минералы представляют сочетания в разных количествах слоев тетраэдрических $[\text{SiO}_4]$ и октаэдрических — в последних мы имеем сочетание четырех кислородов и двух гидроксидов вокруг центрального иона Mg^{+2} или Al^{+3} в виде



Поэтому координацию этих слоев правильнее называть промежуточной — $6/4$. Как и следует ожидать с теоретической точки зрения, повышение pH, т. е. щелочный характер среды, должен переводить Al в четвертую координацию и этим усиливать роль тетраэдрических слоев. Геохимический анализ, следовательно, объясняет эмпирические наблюдения Седлецкого: что высокий pH будет способствовать образованию глин бентонитового, монтмориллонитового типа, т. е., содержащих больше SiO_2 (по отношению к Al), не обладающих способностью к частичному замещению алюминия катионами. Таким образом, во всех условиях повышенной щелочности (разрушение щелочных пород, щелочных пеллов в солевых и содовых рассолах, солончах при пустынном режиме и т. д.) мы будем чаще встречать глины бентонитового состава ценных технологических свойств. Совершенно иначе складываются кристаллохимические и геохимические процессы при образовании каолинов, с нормальным соотношением между тетраэдрическими и октаэдрическими слоями и закономерным соотношением $\text{Al}_2\text{O}_3 : \text{SiO}_2 = 1 : 2$. Пониженный pH способствует образованию каолинита, что имеет место в области кислых растворов, гуминовых образований кислотного типа, кислых рудничных вод, кислых продуктов окисления сульфидных месторождений и т. д.

Таким образом намечается очень интересное влияние величины pH на тип образования глинистых минералов.

Главнейшая литература

- И. И. Гинзбург. Каолин и его генезис. Изв. СПб. Политехн. ин-та, 1912—1913.
- П. А. Земайтченский. Глины СССР. Общая часть. Изд. Акад. Наук СССР, 1935, 1—334.
- П. А. Земайтченский. К вопросу о происхождении каолина. Доклады Акад. Наук СССР, 1938, XX, № 6, 471—474.

- И. Д. Седлецкий. (Генезис монтморилл. и каолинита в почвах). Доклады Акад. Наук СССР, 1939, XXII, № 8, 515—519.
- П. М. Татарinov. Курс нерудных месторождений. 1935, II, 262—324.
- У. Твенхофел. Учение об образовании осадков. 1936, 222—259.
- А. Д. Федосеев и Ф. А. Зенькович. Месторождения глиен СССР. Изд. Акад. Наук СССР, 1937, 1—662 (со сводкой литературы).

23. ПОИСКИ В ОБЛАСТЯХ ГИПСОВ И АНГИДРИТОВ

В районе распространения горизонтов гипсов и ангидритов при поисковых работах нет особых оснований рассчитывать на нахождение каких-либо полезных ископаемых, если не считать, что в нормальном разрезе солевой толщи гипс занимает обычно нижнее положение, а выше него должны лежать массы хлористого натрия (если процесс кристаллизации остаточного бассейна шел до конца)¹. В своеобразных условиях вторичных образований пустынного или полупустынного климата мы, наоборот, наблюдаем скопления гипса в верхних выцветах, шапках или даже железных шляпах солевых или рудных месторождений, в то время как легко растворимые соли хлористого натрия полностью унесены.

Отметим лишь несколько практически важных черт гипсовых месторождений:

1) гипс и ангидрит имеют сами по себе значение как важные вяжущие вещества, источники особых видов цемента и как декоративный или скульптурный камень (мелкозернистый алебастр, селенит и декоративный ангидрит);

2) особое скульптурное значение имеет вторичный жилковатый гипс — селенит, который иногда разрезает месторождения гипсовых слоев отдельными жилками (район Кунгура на Урале);

3) совершенно особое практическое и теоретическое значение связано с теми месторождениями гипса, которые пропитываются позднейшими выделениями углеводородов, битумов, нефтей, асфальтов и т. д.

Процессы восстановления гипса приводят к накоплению серы (в промышленных количествах). Этот процесс весьма обычен, связан иногда с синхроничным накоплением битумов (в подстилающих слоях), причем в этом случае очень интересен парагенезис:

1) гипс — сера — битумы — квасцы,

2) халцедон — бентонитовые глины или трепел — целестин. Генетические соотношения этой весьма постоянной ассоциации еще далеко не выяснены, но ее постоянство (Поволжье, Средняя Азия, Сицилия, Калифорния) говорит о несомненной закономерности этих комплексов.

Иногда со скоплениями вторичных гипсов на выходах соляных штоков связаны бораты.

Главнейшая литература

- Л. М. Миропольский. Характ. минер. комплекса Сюкеева. Учен. зап. Казанск. ун-та (геология). 1935, 95, 1—94.
- П. М. Татарinov. Курс нерудных месторождений, 1935, 149—453.
- У. Твенхофел. Учение об образовании осадков. 1936, 411—453.
- А. С. Унлюнский. Сб. «Узбекистан». Труды I Конфер. по изуч. производ. сил Узбекистана. Изд. Акад. Наук СССР, 1933, II (теория образования серы).

¹ С гипсами нередко переслаивается каменная соль или доломиты, имеющие значение как огнеупоры или строительный камень.

24. ПОИСКИ В РАЙОНАХ ОСАДКОВ СОЛЕЙ (ЭВАПОРАТОВ)

В соляных месторождениях мы наблюдаем замечательный комплекс химических элементов, накопление которых связано с остаточной кристаллизацией отмирающих морских бассейнов, высыханием соляных озер¹ и наиболее поздним накоплением осадков вод в районах без стока. Совершенно очевидным является то, что в таких образованиях собираются соединения наиболее растворимых комплексов, получаемых из сочетания наиболее подвижных ионов, образующих решетки наименьшей электростатической устойчивости, т. е. наименьшей энергии решеток U и наименьших экв и вэков.

Приводим интересную таблицу (составленную на основе чисто теоретических подсчетов) ионов наименьших величин экв и вэков.

Таблица 11

Вэки и валентность (ν) ионов наименьших энергетических показателей

К а т и о н ы										
					NH ₄	Tl		Li		
Элемент	№ 87	Cs	Rb	K			Na		Ca	Mg
Валентность (ν)	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+2	+2
Вэк	0,28	0,30	0,33	0,36	0,37	0,42	0,45	0,55	0,87	1,05
А н и о н ы п р о с т ы е										
Элемент	№ 85			J		Br		Cl		(F)
Валентность (ν)	-1			-1		-1		-1		-1
Вэк			0,15		0,18	0,22		0,25		0,37
А н и о н ы к о м п л е к с н ы е										
Комплекс	JO ₃	NO ₃	ClO ₄	SH	CN	OH	SO ₄	CO ₃	PO ₄	BO ₃
Валентность (ν)	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-2	-2	-3	-3
Вэк	0,14	0,19	0,21	0,23	0,25	0,37	0,34	0,39	0,50	0,56

Если вышеприведенное положение правильно, то именно соединения ионов, нашедших себе место в таблице, должны составлять основу соляных осадков. Так как в таблице вэки увеличиваются слева направо, то, очевидно, где-то справа обрывается список типичных для соляных комплексов ионов. Вместе с тем, поскольку в схеме осаждаемость следует тому же направлению, можно теоретически в схеме наметить и ту наиболее вероятную последовательность выпадения солей, которая характеризует соляные месторождения; наиболее растворимыми в остаточных щелоках должны оказаться Cs и J — из известных элементов и № 85 и 87 — из неизвестных. Это положение полностью оправдывается в природных условиях (хотя для Cs явления поляризации несколько осложняют ход его геохимической миграции).

Проанализируем детальнее приведенную таблицу.

1. К а т и о н ы. Из перечисленного ряда одновалентных катионов практически выпадают:

Tl, который как ион (типа купро) обладает сильной активной поляризацией, а потому может быть адсорбирован более ранними процессами и вряд ли практически в условиях геохимических процессов земной коры достигнет конечных солевых рассолов.

¹ Значительно реже приходится иметь дело с осадками соляных источников.

[NH₄] не отвечает общему ходу геохимических процессов и мало вероятен в условиях довольно значительного избытка кислорода.

Li обладает слишком большим экзом, малым кларком, довольно сильной активной поляризацией, благодаря чему легко дает трудно растворимые, частью двойные соли. Поэтому накопление этого элемента в остаточных рассолах мало вероятно; он должен задерживаться почвами.

Из двухвалентных ионов мы наблюдаем лишь ионы Ca и Mg, тогда как более трудно растворимые ионы Sr и Ba выпадают из растворов значительно раньше в соединении с комплексными анионами.

Ионы более высоких ω и больших экзов не могут находиться в остаточном рассоле и практически целиком исключаются из этого генетического типа. То же мы должны сказать и про ионы типа купро, в огромных количествах поглощаемые почвами и потому не доходящие до океанов (что связано с их активной поляризацией).

Таким образом, в полном согласии с теорией, в осадках солевых комплексов мы встречаемся лишь с одновалентными (или двухвалентными) ионами типа благородных газов, а именно: Cs, Rb, K, Na, Mg, Ca и, вероятно, № 87¹.

2. Инертные ионы. К ним мы относим атомы He, накапливаемые в иных остаточных рассолах, природа которых еще не ясна, несмотря на последние работы Гана.

3. Анионы простые. Анализ таблицы совершенно очевидно приводит к наиболее важным анионам: J, Br и Cl; вероятен в этих условиях № 85, очень мало вероятен F, который благодаря относительно высокому экзу, трудной растворимости соединений, замещению в сложных комплексах (например, в фосфатах) должен значительно раньше выпасть из растворов и поэтому не сохраняется в остаточных рассолах.

4. Анионы комплексные. Здесь вопрос обстоит сложнее, ибо начинается ряд анионов с сильно окисленных комплексов, которые мы знаем лишь в области очень высоких кислородных потенциалов, т. е. в условиях максимальной валентности (например, при пустынном режиме); с другой стороны, мы имеем в таблице два иона SH и CN, которые не сохраняются вообще в обстановке свободного O₂ и CO₂. Поэтому совершенно понятным является исключение первых пяти ионов из нормальных солевых остаточных рассолов, после чего остаются лишь: [OH], [SO₄], [CO₃], [PO₄], [BO₃]; далее следуют ионы больших энергий решетчат, не попадающие в остаточные рассолы. Из этого ряда практически выпадает [PO₄]⁻³, образующий, как и его аналог [AsO₄], более трудно растворимые комплексы (например, фосфорит), благодаря чему он не доходит в растворах до конечных остаточных концентраций и сравнительно рано образует остатки [PO₄] на дне морских водоемов при повышении pH около береговой линии.

Таким образом, становится очевидным, что в остаточных соляных месторождениях мы должны ожидать преимущественно [SO₄], [CO₃] и частично [BO₃]⁻³.

Комбинации вышеприведенных катионов и анионов, в зависимости от их относительных концентраций, температур и других физико-химических факторов, и приводят к тому разнообразию кристаллизационных путей,

¹ Кроме того, нам известно нахождение окиси железа, вызывающей окраску некоторых карналлитов, полигалита, блёдита, иногда сильвина в красный цвет. Происхождение этого железа не выяснено; весьма вероятно, что при больших концентрациях оно выпадает в виде изоструктурных соединений в самих решетках хозяина, а при дальнейшей метаморфизации образует пластинки или иглы гематита или гидратов окиси железа.

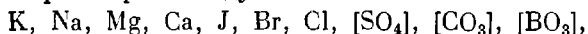
которые наметил еще Вант-Гофф и которые в последние годы получили столь блестящее разрешение в работах школы академика Н. С. Курнакова.

Разнообразие и сложность этих кристаллизационных путей не могут пока быть расшифрованы на основе современных энергетических данных; тем не менее намечается общая схема порядка кристаллизации, полностью отвечающая основным нашим положениям и приводящая к наблюдениям ее в природе. Приводимая ниже схема отвечает порядку залегания этих солевых образований в земной коре и последовательности выпадения солей из остаточных рассолов снизу вверх:

Схема нормальной соляной кристаллизации

Поверхностная шляпа (вторичный гипс)	
Карналлит + NaCl + соли Mg	} бораты (во вторичном накоплении)
Карналлит + NaCl	
NaCl + KCl	
Чистая каменная соль NaCl	
Каменная соль + ангидрит	
Гипс	
Карбонаты Ca и Mg, глинисто-железистые осадки	} фосфаты Ca
Кремнистые и силикатные осадки	

Как указано было выше, несмотря на сложность и многообразие всех тех кристаллизационных путей, которые возникают в диаграммах равновесия солевых растворов между ионами:



геохимик-поисковик может в первом приближении считаться с приведенной схемой и по ней строить свои поиски в крупных масштабах природных месторождений. Направление снизу вверх в вышеприведенной схеме является направлением земного разреза, направлением передвижения береговой линии при высыхании морских и озерных бассейнов, направлением во времени перехода от свободных морей и океанов к последним рассолам остаточных бессточных впадин и озерных водоемов.

Глубокий анализ палеогеографических схем позволяет делать выводы большого теоретического и практического значения, а знание климатического режима современного (или четвертичного) времени делает понятным ряд перемещений и перегруппировок, нарушающих стройность этой схемы¹.

Таким образом, геохимик в теории эков находит себе очень удобное оружие для ряда поисковых работ, и некоторые частные выводы помогают ему устанавливать ряд поисковых схем:

1) становится понятным и обязательным накопление в остаточных рассолах Rb и частично Cs;

2) становятся вероятными поиски и нахождение № 85 и 87, особенно в остаточных рассолах² (преимущественно в районах кислых и щелочных гранитных массивов);

3) понятно залегание боратов вместе с солями в верхней части разреза;

¹ При поисках и изучении соляных месторождений большое значение имеет анализ тектонических процессов позднего времени, благодаря которым общая схема и строение месторождений сильно осложняются и нередко наступает новая миграция, перемещающая кверху соли бора. Такие перемещенные соли получили наименование метасолей.

² Вероятно, № 85 отличается летучестью и своеобразной устойчивостью его ионов.

- 4) понятна схема: гипс — ангидрит — гипс, причем перемежаемость с солями NaCl более вероятна для ангидрита, чем для гипса;
- 5) список химических элементов солевых комплексов в общем ограничивается приведенной схемой, если в нее включить еще загадочный He;
- 6) с современными соляными озерами связан очень важный бальнеологический комплекс: грязь минеральная — рапа — осадки гипса и соли, геохимическое изучение которых очень важно.

Главнейшая литература

- Е. С. Бурксер. Солоні озера на лпмані України. Всеукр. Акад. Наук, 1928, IX, вып. 1.
- Я. Вант-Гофф. Исследование условий образования океанических соляных отложений. ОИТИ, 1936, 1—344.
- А. Н. Волков. Материалы методики поисков и разведок. Изд. Гл. геол.-разв. упр., 1931, 100—102 (о поисках солей).
- Н. С. Курнаков. О метаморфизации природных рассолов. Зап. Мин. об-ва, 1896, XXXIV, [2], 67.
- Н. С. Курнаков и И. И. Лепешков. Сб. «Бор и калий». Изд. Акад. Наук СССР, 1935.
- П. С. Курнаков и др. Соляные озера Крыма. Изд. Акад. Наук СССР, 1936, 1—278.
- Н. С. Курнаков и В. И. Николаев. Соляное испарение морской воды и озерных рассолов. Изв. Физико-хим. ин-та Акад. Наук СССР, 1938, X, 333—366.
- В. И. Николаев. Химические поисковые признаки и методы физико-химической разведки сол. мест. Доклады Акад. Наук СССР, 1937, XV, № 8, 471—474.
- В. И. Николаев, Н. П. Буялов и И. И. Лепешков. К вопросам генезиса пермских соляных отложений. Изв. Акад. Наук СССР, сер. хим., 1937, № 2, 399—412.
- Е. Э. Разумовская. Описание соляной толщи Соликамска. Труды Гл. геол.-разв. упр., 1931, № 54.
- П. М. Татаринцов. Курс нерудных месторождений. 1934, I, 389—488.
- У. Твенхофф. Учение об образовании осадков. 1936, 411—453.
- А. Е. Ферсман. Геохимия. 1934, II, 291—294; 1936, III, 65.
- С. А. Щукарев. Коллоидно-химическая теория соляных озер. Журн. Русск. физ.-хим. об-ва, 1930, LXII, 65.
- Н. Borchert. Die Vertaubungen der Salzlagerstätten und ihre Ursachen. Kali, 1934, H. 23—24; 1935, H. 1.

25. ПОИСК В ОБЛАСТЯХ СОВРЕМЕННЫХ СОЛЯНЫХ ОЗЕР

Ср. поиски в отложениях твердых солей, стр. 648.

Соляные озера в нашем Союзе играют совершенно исключительную роль и занимают целый соляной пояс, протягивающийся почти через весь Союз, начиная с лпманов Одессы и Аккермана на западе и кончая озерными комплексами Восточного Забайкалья (п, очевидно, прилегающей к нему Северной Монголии и Маньчжурии). Десятки тысяч озер характеризуют этот пояс, представляющий совершенно исключительное богатство и обеспечивающий Союз и его химическую промышленность грандиозными, нигде на земной поверхности более не повторяемыми скоплениями таких важных солей, как NaCl , Na_2SO_4 , Na_2CO_3 , KCl , MgCl_2 , CaCl_2 , и связанными с ними минеральными грязями и скоплениями брома и пода (отчасти и бора)¹.

Огромная работа школы Н. С. Курнакова дала первое физико-химическое толкование процессам, идущим в этих озерах, и интересно связала их с геохимическими особенностями дна и стенок водоемов, с метеорологическим режимом и физико-химическими особенностями рассолов. Однако до сих пор отсутствует сводное картирование всего озерного пояса и обобщение огромного геохимического материала.

¹ Не говоря об огромном бальнеологическом (лечебном) их значении.

Практический подход к отдельным соляным озерам и к их осадкам возможен лишь на основе комбинированного комплексного изучения геологии и геохимии района озера (и подстилающих слоев), метеорологии, геобиологии, физико-химических процессов и режима озера.

Вмешательство человека в этот установившийся режим должно быть в общем весьма осторожным, так как изменение хотя бы одного фактора равновесия ведет к изменению хода всех геохимических реакций; так, например, наблюдалось нарушение (геохимического) режима в Сакском озере после того как была построена перемычка через озеро для добычи соли: в отшпурованной части началось образование гипса ритмическими слоями, благодаря чему получилась очень своеобразная сплошная кора кристаллов гипса над черной грязью.

Для геохимика область наших минеральных озер представляет огромную область исследования, а практическое использование их еще мало продвинулось сравнительно с самими природными богатствами.

Основной список полезных ископаемых этого комплекса следующий:

NaCl	gCl ₂	Соли:	Минеральные грязи Сероводородные воды (Мельниковит и конгло- далые сульфиды железа)
Na ₂ SO ₄	(KCl)	Br	
NaCO ₃	CaCl ₂	J	
(NaNO ₃)	Mg ⁺ O ₄	[BO ₃]	

Соотношения этих полезных ископаемых сложны и выясняются на фоне физико-химических схем равновесия Вант-Гоффа и Н. С. Курнакова.

Главнейшая литература

См. в главе о поисках в районах осадков солей, стр. 651.

26. ПОИСКИ В ОБЛАСТЯХ ПУСТЫННЫХ РАЙОНОВ

В пустынных областях мы имеем дело с очень крупными и важными скоплениями полезных ископаемых, причем значительная часть их связана не столько с самими пустынями, сколько с пустынным климатом и его воздействием на другие образования. Хотя до сих пор отсутствует детальный геохимический анализ пустынных процессов, тем не менее мы можем его свести к нескольким определенным пунктам.

Специфические реакции пустынь связаны:

1) с общим недостатком и спорадичностью влаги, отсутствием стока;

2) высокой и длительной инсоляцией;

3) повышенным кислородным потенциалом, приводящим к высоким степеням окисления (что особенно важно, если в пустынном климате встречаются верхи рудных жил); избытку кислорода (озона); отвечают и слабые восстановительные реакции благодаря отсутствию процессов растительного разложения;

4) восходящими токами почвенных и подпочвенных растворов, с выносом к поверхности более растворимых соединений и псевдотермальным их характером;

5) действием ветра, отделяющего частицы по их химической и физической природе;

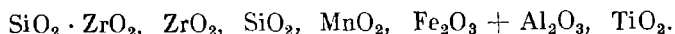
6) накоплением на поверхности электролитов и вызываемыми этим выпадением гидрозолей и коагуляцией растворов;

7) повышенным pH большинства растворов, щелочностью химических процессов и вызываемым этим повышенным переходом катионов и анионов в комплексные анионы;

8) сильной геохимической ролью воды при высокой температуре с резко выраженными процессами гидролиза.

С геохимической точки зрения нам делаются понятными основные химические реакции пустынь с разделением на резко обособленные комплексы:

I. Наиболее труднорастворимые части (в самих песках):



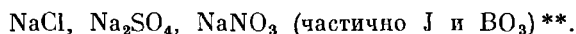
Практическое значение из этого списка имеет лишь бадделейт и отчасти циркон (монацит). Вообще ионы высоких экв ($\omega = 4$ или 3)*.

II. Легкорастворимые части бессточных впадин:

NaCl , Na_2SO_4 , NaNO_3 — Cl , Br , J , (BO_3) , частично CaSO_4 с ионами: Na , K , (SCN) , (ClO_4) , (CrO_4) , (JO_3) , (CO_3) ; частью соли Ca^{+2} и Mg^{+2} (туфы).

Характерны для этой группы очень низкие эки наиболее сильных (щелочных) катионов и наиболее кислотных анионов, особенно комплексных.

Практическое значение имеют:



Наконец, с пустынным климатом мы должны связать реакции образования и сохранения самородной серы и связанных с ней гипса и природной серной кислоты (SO_3), многообразных сульфатов Al и Fe , алуپита, вторичных каолинов и т. д.

О железных шляпах в условиях пустынного климата см. ниже.

Главнейшая литература

- A. Е. Ферсман. Псевдотермы в Средней Азии. Доклады Акад. Наук СССР, 1924, 97. (Геохимия, 1937, III, 367).
A. Е. Ферсман. Geochemische Migration der Elemente. Т. 2. [Геохимическая миграция элементов, ч. 2]. Abhandl. prakt. Geol., 1930, XIX, 53—83.
J. Walter. Das Gesetz der Wüstenbildung. 1912, 219—288.

27. ПОИСКИ В ЖЕЛЕЗНЫХ ШЛЯПАХ РУДНЫХ ЖИЛ

Железные шляпы рудных жил представляют исключительной важности объекты для поисковой работы, ибо точный анализ железных шляп, отыскание их на местности по цвету, рельефу, растительности и типу почвообразования является одним из методов поисковой геохимической работы.

Известно, что при полярном климатическом режиме железные шляпы почти не образуются, так как механическая эрозия опережает химическое разрушение горных пород и рудных жил. К тому же резко кислые растворы выносят с собой в водах окисленные соединения железа (а также марганца и алюминия), и этим путем образуются продукты выветривания, не имеющие столь характерного для этих образований буро-желтого цвета, обусловившего их название — «железные шляпы». В этом термине, созданном еще во время средневековых исследований рудных жил Мексики, лежит

* Эти же окислы в основном образуют пустынный загар и пустынные коры.

** Реже осадки чистого CaCO_3 и CaSO_4 .

не только понятие о некотором химическом теле, покрывающем рудную жилу, но и чисто морфологическое представление о некоторого рода бугре, холме или возвышенности, выделяющейся среди общего рельефа, очевидно, благодаря своей большей устойчивости против размыва и механического разрушения.

В сухих субтропических и тропических местностях железные шляпы развиты в виде очень мощных образований, достигающих многих десятков метров мощности и постепенно переходящих, в зависимости от уровня грунтовых вод, в нижележащую зону цементации.

Основное характерное свойство железных шляп — высокий кислородный потенциал, связанный нередко с повышенным образованием озона и вообще с повышенной температурой.

Вторым отличительным свойством является кислотность растворов, вызываемая окислением до высших валентностей всех имеющихся в рудной жиле химических элементов, что, как известно, всегда связано с ослаблением основных свойств и усилением кислотных (следовательно, низкий pH).

Эта характерная черта в сухом климатическом режиме сказывается в образовании свободной серной кислоты и кислых сульфатов, которые разъедают не только окружающие породы, но и все предметы, попадающие в район их действия. Достаточно вспомнить о разъедании одежды работающих на таких месторождениях (например, Блява на Южном Урале), а также о почернении бумаги, в которую заворачиваются образцы из подобных железных шляп.

В зависимости от приведенных двух основных свойств железных шляп и получаются характерные геохимические черты этих образований, а именно:

1. Окисление всех оснований в высшие степени валентности, что в значительной степени связано с образованием комплексных анионов. Энергетически этому отвечает значительное повышение экв. всех участвующих в реакции ионов и, следовательно, их быстрое выпадение в районе окисления.

2. Вынос из шляпы сферических бесцветных ионов, особенно малых экв. и больших объемов (щелочей, магния, кальция и др.) и сохранение лишь сильно поляризующихся анионов, как брома и пода.

3. В связи с распадом более сложных силикатных систем, накопления кремнезема в разных его видах и серноокислого бария в виде барита, алюминия — в виде квасцов и алунита, кремнезема — в виде полуопалов.

4. Фиксация ионов сильной активной поляризации, как то: серебра, свинца, ртути, цинка, а с другой стороны, всех ионов сильной поляризуемости — хлора, брома, пода и др.

5. Пониженный pH, достаточный для выноса шаровых катионов, но недостаточный для растворения полуторных окислов, ведет к накоплению свободных окислов и гидратов железа, марганца, кобальта, алюминия (и никеля).

6. Характерно выпадение различного рода ангидридов кислот и свободных окислов металлов в виде так называемых разнообразных окр, из которых мы перечислим нижеследующие:

Ванадиевая — валентность	5,	цвет желтый или красный
Висмутовая	3,	бисмит, желтого цвета
Вольфрамовая	6,	тунгстит, желтого цвета
Железная	3,	буро-желтые гидраты (красные)

Медная —	валентность	2,	мелаконит, черного цвета
Молибденовая	»	6,	молибдит или ферримолибдит, желто-зеленого цвета
Свинцовая	»	2,	глет, желтого или красного цвета
Сурьмяная	»	3, 5,	различные окислы серого или желтого цвета
Теллуровая	»	4,	теллуриит, желтого цвета
Урановая	»	6,	желто-зеленого цвета
Хромовая	»	6,	зелено-желтого цвета (?)

7. Уже из приведенного списка видно, что мы имеем дело с наиболее высокими валентностями и наиболее высокими эками для соответственных элементов.

8. Для поисковика особенно важной является характерная окраска всех соединений железных шляп, отличающаяся обычно нижеследующими цветами минералов: зелеными и синими для меди, яркозелеными для никеля, черно-красными и черными для кобальта и марганца и яркожелтыми, оранжевыми, красными, бурыми, буро-красными, желто-зелеными тонами для остальных элементов. Эти характерные окраски отражают основные правила цветности в минералогии, причем сочетание в одном соединении ионов одного и того же элемента или нескольких элементов, но разной валентности, приводит к тем коллоидальным черным минералам, которые характеризуют комплексы меди, железа, кобальта, марганца, а иногда и никеля.

9. Приведенные характерные черты окраски обычно с глубиной уступают место серо-желтым тонам, которые в зоне цементации заменяются полностью тонами серыми и черными, благодаря которым последняя зона и получила название зоны сажистых руд.

Главнейшая литература

Н. И. Трушков. Экспертиза рудных месторождений. 1935, 23—26.
 Lockie a. Billingley. Eng. a. Min. World, 1931, March. (Интересная статья о поисках сульфидных руд, не выходящих на поверхность).

28. ПОИСКИ В ЗОНАХ ЦЕМЕНТАЦИИ РУДНЫХ ЖИЛ

Явления цементации представляют собой интереснейший геохимический процесс и приурочены к зоне, занимающей среднее место между нормальными и неизмененными гидротермальными жилами и поверхностной зоной выветривания (железная шляпа).

Эта зона характеризуется рядом своеобразных процессов, которые можно свести к нижеследующим:

1. Воздействие водных растворов с небольшим количеством кислорода на ранее образовавшиеся сульфиды и сульфосоли.

2. Частичное, но не полное окисление с образованием сульфокислородных соединений и сульфатов (барит, ангидрит, гипс и сульфаты тяжелых металлов).

3. Несколько повышенная кислотность процесса, однако меньшая, чем у особо кислых растворов шляпы выветривания.

4. Распад сульфосолей и сульфомышьяковых и сульфосурьмянистых соединений на более простые молекулы (без сульфанионов) более простой формулы.

5. Накопление при процессе распада металлического золота и серебра, а также селена и теллура.

6. По внешним признакам зоны цементации характеризуются особым цветом «сажистых руд», что связано, с одной стороны, с мелкодисперсным характером вторичных осадков, с другой — с присутствием в соединениях ионов разной валентности.

При поисках и исследованиях рудных месторождений зона цементации представляет очень ценную область, мощность которой зависит от глубины и характера водоносных горизонтов и расположения п глубины уровня грунтовых вод. Поэтому при анализе и предсказаниях мощности зоны цементации надо исходить из исследования гидрогеологических условий данного района как в настоящее время, так и в недавнем геологическом прошлом.

Так как зона цементации связана с колебаниями и неустойчивостью геохимических процессов в переходных зонах, то этим определяются и непостоянство и разнообразие самих минеральных комплексов и их технологических свойств.

29. ПОИСКИ В КАРСТОВЫХ ОБЛАСТЯХ И ПЕЩЕРАХ

Карстовые районы и новообразования в подземных пустотах и пещерах заслуживают со стороны геохимика большого внимания, но до сих пор геохимически очень плохо изучены; между тем минеральные образования в пещерах очень интересны.

Вообще карстовые пустоты, провалы и пещеры встречаются в породах двух типов — в гипсах (ангидритах) и в известняках (особенно в чистых).

В гипсах нам почти неизвестны интересные новообразования, и все практически и теоретически важные минеральные скопления мы относим к пещерам в известняках, а именно:

1. Отложения карбоната кальция: сталактиты, сталагмиты, туфы. Эти осадки имеют весьма ограниченное практическое применение. Процесс осаждения связан обычно с испарением пересыщенных растворов карбоната кальция, в более редких случаях — с потерей избыточной углекислоты.

2. При растворении известняков и их выносе остается обычно нерастворимый остаток, который в иных случаях, в зависимости от химического состава известняка, может быть обогащен алюминием (и частично железом). Это обычно красные продукты элементов больших эков, носящие характер лагеритов и бокситов (например, на юге Франции). Такие осадки могут в иных случаях иметь практическое значение.

3. В ряде пещер идет мощное накопление остатков гуано птиц и летучих мышей, а иногда и костей зверей, благодаря чему образуются целые слои своеобразных фосфатов кальция и алюминия, используемых в разных местностях как удобрение. Поскольку здесь идут метасоматические процессы замещения, на дне пещер образуются особые фосфатные породы, отличие коих по внешнему виду весьма затруднительно.

4. В ряде пещер (Средняя Азия, штат Миссури, США) наблюдается заполнение карстовых полостей баритом, что приводит к образованию крупных месторождений практического характера; поскольку бариевые растворы нередко носят глубинный слабо термальный характер, постольку мы в этом случае наблюдаем ярко выраженные явления метасоматоза стенок. Аналогичны более редкие скопления целестина в некоторых пещерах.

5. В редких случаях карстовые пустоты и полости используются глубинными термальными растворами и частично, путем обменных реакций,

заполняются новообразованием рудного характера. Тем не менее этот процесс может приводить к очень ценным месторождениям меди, цинка, урана, ванадия и др., и на него необходимо при исследовании пещер в районах нарушенной тектоники обращать особое внимание.

Главнейшая литература

- А. К р у б е р. Гидрография карста. Сборник в честь Д. Н. Анучина. М., 1913, 215—297.
 А. Е. Ф е р с м а н. Geochemische Migration der Elemente. Т. 2. [Геохимическая миграция элементов, ч. 2]. Abhandl. prakt. Geol., 1930, XIX, 1—52.
 G. K u r l e. Theoretische Speläologie. Wien, 1923.

30. ПОИСКИ В РАЙОНАХ ДРЕВНЕЙ КОРЫ ВЫВЕТРИВАНИЯ

Интереснейшие явления длительного материкового выветривания при- водят нередко к образованию мощных скоплений, преимущественно алю- минатного типа, которые мы называем древней корой выветривания. Такая кора образуется в результате длительных перерывов морских трансгрес- сий и сохраняется лишь в том случае, если выветривание идет скорее, чем снос, смыл или развезивание поверхностных продуктов.

Совершенно очевидно, что геохимический характер этих образований зависит прежде всего от двух основных причин:

- 1) от климатического режима во время выветривания,
- 2) от химической природы самих материнских пород.

До сих пор еще нет углубленного геохимического исследования древ- ней коры, и нам приходится ограничиться лишь несколькими примерами:

1. Латеритная кора выветривания в субтропическом климате. Процесс, согласно идеям Гарассовица, заключается в миграции при разных рН — алюминия, железа, титана, кремнекислоты и марганца. Комбинируя раз- ные скорости направления миграции этих элементов, мы получаем раз- ные типы коры с избытком одного из этих элементов, хотя обычно, бла- годаря очень высокому рН, кремнекислота полностью (или почти) удаляется из осадка.

Этот тип особенно характерен для пород гранитного или гнейсового характера (кристаллические сланцы и т. д.). С геохимической точки зре- ния интересен вынос всех катионов низших эвков и накопление катионов промежуточных амфотерных с $\omega = 3$ или 4 и повышенными эвками. Инте- ресно частичное накопление в этой обстановке ванадия, галлия и цирко- ния. Практически интересен только алюминий (частично железо и марга- нец). Ср. поиски в областях пустынных районов, стр. 652.

2. Второй тип выветривания связан с корой изменения оливиновых (змеевиковых) пород — тип Южного Урала, о-ва Кубы, Бразилии; тип большого значения для месторождений кобальта, никеля и железа. Внешне характерны на поверхности красная и бурая окраска, местные скопления вторичного халцедона (кварца), жилы и скопления белого магнезита, пере- ход в глубинах к зеленым тонам неизмененных змеевиков с накоплением нонтронита, силикатов никеля и т. д.

С геоэнергетической точки зрения в процессах гипергенного изменения надо ожидать такую последовательность сверху вниз:

В э к и

$\text{SiO}_2 - \text{Si}^{+4}$	2,15	Ni - силикаты — Ni^{+2}	1,09
$\text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{Fe}^{+3}$	1,75	MgCO_3 — Mg^{+2}	1,05
$\text{Co}_3\text{O}_4 - \text{Co}^{+3}$	около 1,5	CaCO_3 — Ca^{+2}	0,87

Порядок нисходящих вэков совершенно очевиден. Надо иметь в виду, что в настоящее время пересматриваются наши представления о материковой коре выветривания и в целом ряде случаев намечается их связь не только с чисто материковыми процессами, но и с мелководными осадками химического характера (таковы в замкнутых бассейнах образования бокситов Урала). К сожалению, до сих пор в этих исследованиях отсутствует достаточный геохимический анализ процессов.

Приводим несколько очень интересных положений И. И. Гинзбурга:

Процессы глубинного выветривания определяются агрессивностью почвенных, подпочвенных и грунтовых вод, состав которых является в свою очередь производным от климатических условий. Течение грунтовых вод с глубиной совершается все более и более по законам течения трещинных вод (в кристаллических породах).

Присутствие магнезита в корнях коры выветривания, нахождение арагонита и кальцита в вышележащих зонах, сетки карбонатов в серпентинитах также говорят о том, что в прошлом карбонатные воды играли существенную роль в разложении этих пород.

Обилие опала, многочисленные прожилки халцедона, кварца, крупные стяжения кремней, силификация магнезита, значительное проникновение минералов кремнезема по трещинам на глубину — говорят о щелочном характере вод, существовавших при отложении минералов, в особенности типа водных магнезиальных силикатов (образовавшихся при $pH = 9,5-10,5$); миграция кремнезема совершается и по настоящее время, как это показывают многочисленные корочки халцедона, мучнистый кремнезем и еще гелеобразные коллоиды водных силикатов магнезия. С глубиной pH среды, повидимому, увеличивался и доходил до 10,5.

Для процессов разложения в исследованных районах ультраосновных пород характерно также присутствие ферриалюмосиликатов и силикатов железа, алюминия, магнезия и никеля (нонтронит, бейделлит, беролит и ряд других силикатов групп монтмориллонита, галлуазита, керолита, сепиолита и др.).

В коре выветривания серпентинитов огромным развитием пользуется группа водных железистых силикатов, близких по составу к ферримонтмориллониту и продуктам его присоединения, а также другие аналогичные силикаты (бейделлит и пр.), легко разлагаемые кислотами и содержащие значительное количество гигроскопической воды, также воды, выделяющейся от 100 до 200°. До сих пор эти водные феррисиликаты назывались нонтронитами. Наши пока еще не законченные исследования заставляют полагать, что перед нами имеется не группа нонтронитов, а группа ферримонтмориллонитов. Этим определяется тип выветривания на серпентинитах, который, вероятно, придется назвать ферримонтмориллонитовым.

Обычное нахождение водных магнезиальных силикатов, также водных силикатов глинозема и никеля, а также минералов кремнезема вдоль трещин говорит за их выпадение из водных растворов, содержащих кремнекислоту, гидроокиси магнезия и никеля, а иногда и алюминия. Все эти обстоятельства также свидетельствуют о щелочном характере вод, существовавших во время процесса образования коры выветривания.

Присутствие хлоридов и сульфатов является также очень важным обстоятельством для понимания химизма выпадения и миграции коллоидных растворов.

Весьма характерно, что силикаты железа типа ферримонтмориллонита вдоль трещин в наиболее глубоких зонах встречаются редко; они преобладают в поверхностных зонах; то же, повидимому, хотя в меньшей степени, относится к водным силикатам глинозема. Таким образом, силикаты полу-

торных окислов концентрируются в верхних частях коры выветривания, а силикаты магния в более глубоких, в связи с увеличением щелочности среды с глубиной. Но и в верхних частях коры они принадлежат не к самой поверхностной пленке, а к более глубоким горизонтам.

Особенного внимания заслуживают силифицированные зоны и охристые, содержащие большое количество глыб кремня, они свидетельствуют об особом составе вод и особых условиях выпадения в этих горизонтах кремнезема, вероятно с малым рН (4,5—5,3).

Что касается площадного расположения окислов, то в районе сохранившихся участков коры выветривания они располагаются аналогичным образом: по периферии карбонаты и гидросиликаты магния, чем ближе к центру, тем все больше встречаются кремнезем, затем ферри- и алюмосиликаты, наконец, окислы железа.

Форма отдельных участков коры выветривания получает чашеобразный характер или блюдцеобразный; если разложение затрагивает более глубокие горизонты, — то карманообразный. Она зависит от степени развития трещин и угла их падения.

Для процессов выветривания характерна резко окислительная атмосфера, которая проникает довольно глубоко.

Распределение окислов связано с окислительным потенциалом среды и степенью ее щелочности (рН); оно также связано с движением грунтовых вод и с их застаиванием, что в свою очередь обуславливается древним микрорельефом и развитой системой трещин.

В результате микрорельефа продукты выветривания резко выражаются: на повышенных точках в виде силифицированных зон, на пониженных в виде так называемых нонтронитизированных серпентинитов.

На минеральном составе продуктов выветривания отражается первичный минеральный состав пород.

Наиболее интенсивному выветриванию подвергаются серпентиниты, затем габбро, диабазы и, наконец, пироксениты. В продуктах выветривания габбро-диабазов отмечаются: соссюрит, каолинит, монтмориллонит, галлуазит, мелкие гидрослюда, хлориты и гидроокислы железа. Пироксениты выветриваются или в сторону нонтронитизации или в сторону хлоритизации, в зависимости от их состава: ромбические пироксены дают нонтронитизированные продукты, моноклинные — хлоритообразные. Конечным продуктом выветривания являются охры. В обоих случаях опала или халцедона не образуется (или весьма мало). В продуктах выветривания серпентинита отмечаются: нонтронит, ферримонтмориллонит, бейделлит, опал, халцедон, кальцит, арагонит, керолит, сепиолит и другие водные силикаты магния, затем силикаты никеля и охры.

Свободные гидраты глинозема в виде отдельных минералов пока не констатированы ни в одном из продуктов выветривания этих пород.

Гидроокислы железа встречаются в виде охр: сверху в разрезе более гидратированных (желтых), книзу — менее гидратированных (более ярких цветов). Имеются охры и другого типа, они образуются в результате современного физического и химического выветривания ранее образовавшихся продуктов выветривания. Они более тощи, песчанисты и крупчатые и нередко содержат больше никеля. При нормальном обохривании нонтронитов происходит вынос никеля, который мигрирует в нижние горизонты и дает начало как продуктам адсорбции, так и никелевым минералам.

Степень выветривания пород выражается «коэффициентом выветривания» на основе молекулярных отношений оснований и кремнекислоты, а также оснований друг к другу.

Система трещин, взаимно пересекающихся, обуславливала встречу вод разного состава, а также образование водособирающих трещин, являющихся наиболее богатыми минералообразующими трещинами.

Застаивание вод происходило в нижних частях трещин, где они слепо заканчивались, а при одинаковых условиях возможность застаивания вод была тем более вероятной, чем ближе были трещины. Застаивавшиеся воды образовывали «зону насыщения».

Зона насыщения, зона аэрации (лежащая выше зоны насыщения), зона капиллярных вод (также над зоной насыщения) и зона подвешенных вод (в верхней части зоны аэрации) могли многократно передвигаться вверх и вниз, в зависимости от климатических условий и раскрытия трещин, и этим вызывать перемещение геохимической обстановки и условий миграции и выпадения отдельных окислов.

Главнейшая литература

- Под ред. акад. А. Д. Архангельского. Генезис руд железа и алюминия. Сб. изд. Акад. Наук СССР, 1937.
- И. И. Гинзбург. Геохимия коры выветривания на серпентинитах Ю. Урала. Изв. Акад. Наук СССР, серия геол., 1938, № 1, стр. 35—44.
- И. И. Гинзбург и И. И. Савельев. Образование никелевых месторождений силикатных руд на Ю. Урале. Изв. Акад. Наук СССР, серия геол., 1939, № 6, стр. 119—139.
- И. И. Савельев. Геолого-геохимическое исследование по р. Аят. Труды Ломоносовск. ин-та, 1937.
- Н. Nagrassovitz. Laterit. Fortschr. Geol. 1926, IV, 14.

31. ПОИСКИ В ПЕСКАХ, РОССЫПЯХ И ШЛИХАХ¹

Геохимический анализ процесса накопления минералов в шлихах и россыпях представляет очень большой практический и теоретический интерес, тем более, что дает возможность глубоко применять идеи энергетики к поискам полезных ископаемых.

Мы знаем, что в россыпях накапливаются минералы, обладающие, как говорят, особой стойкостью против тех поверхностных деятелей, которые стремятся их разрушить, т. е. перевести в дисперсное состояние или изменить химически.

Основными явлениями разрушения минералов на поверхности земли являются: окисление, растворение, истирание или разламывание.

Во всех этих случаях стойкость минерала зависит в основном от энергетической устойчивости кристаллической решетки.

Нетрудно видеть, что мы имеем в данном случае замечательное применение суммарных геохимических факторов, среди которых величина эков, т. е. устойчивость понов кристаллической решетки, как раз в основном и отвечает указанным выше природным явлениям — сопротивлению решетки механическому или химическому разрушению. Поэтому можно чисто теоретически предсказать по величинам эков те минералы, которые должны особенно часто встречаться в россыпях и в них накапливаться; при этом мы должны принять во внимание, что обычно в россыпях мы имеем дело с довольно повышенной кислотностью, особенно в районах окисления сульфидов. Лишь в исключительных случаях мы можем встретить в россыпях настолько щелочные растворы, что они будут способствовать образованию амфотерных ионов комплексного характера.

¹ Помимо выше разбираемых случаев накопления тяжелых фракций в песках и шлихах, надо считать с практическим значением зеленых глауконитовых песков и с практическим значением самих песков для стекольной, химической, металлургической и строительной промышленности.

Как мы увидим далее, эмпирические списки минералов россыпей позволяют в нашей геохимической теории не только полное объяснение, но и позволяют решать, какие более редкие минералы мы можем встретить в россыпях и какие элементы и их соединения будут характерны для шлихов разных типов. Проанализируем наше основное положение.

В россыпях и шлихах накапливаются по преимуществу труднорастворимые или практически нерастворимые соединения.

Следовательно, накоплению прежде всего не подлежат подвижные элементы с малыми эками, т. е. соли щелочных металлов и соли легкорастворимых галлоидов (особенно хлор, бром, иод). Равным образом не отвечает основному условию накопления комплексных ионов NO_3 , SO_4 , CO_3 и др., так как они дают вообще геохимически растворимые системы благодаря очень низким энергетическим показателям.

Таким образом, из списка минералов россыпей выпадают все решетки малых величин энергии, малых валентностей и малых экон элементов, входящих в их состав.

Наоборот, как мы знаем, малой и трудной растворимостью обладают ионы высоких валентностей порядка 3 и 4, типа благородного газа, четного, симметричного строения. При этом более низкой растворимостью будут обладать те ионы, которые обладают относительно слабой поляризацией, ибо в противном случае будут образовываться замкнутые решетки и возникать комплексные молекулы и комплексные ионы (что приводит вновь к летучести и подвижности ионов). Мы знаем также, что несколько повышенной энергии решеток (с приведенной поправкой) отвечает повышенная механическая прочность и твердость, совершенно необходимые для сохранения их в россыпях.

Однако особо повышенная поляризация ионов должна вести к обратным результатам — сильно поляризованные системы не будут отвечать накоплению. Таковы поляризованные решетки с замкнутым строением, дающие устойчивые, но летучие соединения (например, угольная кислота), слоистые решетки (слюда, тальк, гидраты магния или кальция и т. д.), как очень слабые в механическом отношении кристаллические постройки. Равным образом отпадают соединения сильной поляризации с серой, селеном и теллуром, так как эти соединения будут характеризоваться большой окисляемостью и разрушением решеток в условиях богатых кислородом поверхностных процессов.

Таким образом, накоплению в условиях россыпей будут отвечать минералы следующих типов:

соединения простых ионов валентности, равной 3, 4, реже 2, типичные ионные решетки открытого типа, преимущественно со строением благородного газа,

сочетания ионов со средней взаимной поляризацией и потому с характерной окрашенностью,

соединения комплексных кислот, при обязательном условии их многовалентности, и соединения с сильными катионами,

соединения с кислородом, гораздо реже с серой.

Особый интерес представляют еще два свойства минералов шлихов россыпей — удельный вес и красочность.

Нетрудно видеть, что для накопления минералов в россыпях, кроме вышеприведенных свойств — устойчивости и стойкости, необходимы повышенные удельные веса, что лишь частично может рассматриваться в зависимости от действия других факторов.

Так, повышение удельных весов в соединениях в схеме следует переходу от краев развернутых периодов менделеевской таблицы к ее середине,

а по вертикали требует перемещения вниз, т. е. к соединениям относительно меньшей величины энергии решеток.

Благодаря приведенному сочетанию факторов мы получаем особую, замкнутую группу элементов, характерных для россыпей, причем разделение их по удельному весу ведет к обогащению шлиха тяжелыми элементами.

Параллельно с этим идет разделение песков на бесцветные и светлые пески с кварцем и более тяжелые черные шлихи с магнетитом и тяжелыми ионами Fe^{+2} , Fe^{+3} , Mn^{+2} — Mn^{+4} и т. д. Цветность растет с накоплением ионов промежуточных элементов, служащих характерными хромофорами; как мы видели, этой группе отвечает и повышенный удельный вес.

Совершенно очевидно для нас поэтому то, что типичными минералами россыпей являются драгоценные камни, так как их отличительной чертой является как раз электростатическая прочность их решеток (твердость, механическая прочность, нерастворимость и т. д.) Среди драгоценных камней, несомненно, самым характерным для россыпей является алмаз — *адарантос*, т. е. непреодолимый, непобедимый, нерастворимый, самый твердый и прочный минерал с высокой валентностью +4.

Приведенная выше геохимическая характеристика минералов россыпей говорит также за то, что в них накапливаются преимущественно минералы более ранних стадий магматической и пегматитовой кристаллизации, типичные минералы ранних фаз пневматолитиза, в то время как соединения гидротермальных и гипергенных процессов практически являются исключенными из нашего списка. Правильность приведенных положений мы можем видеть из следующего списка главнейших минералов шлихов и россыпей:

- С а м о р о д н ы е — алмаз, золото, платина, осмистый иридий и аналоги.
- Сульфиды — кинноварь, висмутовый блеск, реже молибденовый блеск (Hg — Bi — Mo).
- О к и с л ы — Al_2O_3 , Fe_2O_3 ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ — гётит), SiO_2 , TiO_2 , ZrO_2 , $\text{ZrO}_2 \cdot \text{SiO}_2$, SnO_2 , MnO_2 , ThO_2 , UO_2 (торианит).
- С л о ж н ы е с о е д и н е н и я — ильменит, магнетит, хризоберилл, шпинель (хромшпинелиды).
- С о л и к о м п л е к с н ы х к и с л о т — шеелит (CaWO_4), вольфрамит (Fe , Mn) WO_4 , колумбит $\text{Fe}(\text{Nb}, \text{Ta})\text{O}_3$, монацит TRPO_4 , ксенотим YPO_4 , хризоберилл $\text{BeO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$.
- С и л и к а т ы — оливин $(\text{Fe}, \text{Mg})_2\text{SiO}_4$, все типы соединений Al_2SiO_5 , особенно апдалузит и киннит, топаз, гранат (особенно с магнием и алюминием), берилл (очень редко), турмалин (очень редко), эвклаз ($2\text{BeO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$).
- С п е ц и ф и ч е с к и е м и н е р а л ы — янтарт.

В этом списке соединения с меньшими экамп и относительно меньшей энергии решетки менее устойчивы, и поэтому ореол их рассеяния меньше; так, например, железистый вольфрамит мы можем встретить лишь в элювиальных россыпях, тогда как при сильно длительной переработке песков это соединение не сохраняется.

Мы видим из приведенного списка минералов характерные черты концентраций для нижеследующих элементов:

- $\omega = 2$ — (Fe), Be, Mg,
 - $\omega = 3$ — Al, Cr, Fe, Y, TR, (B),
 - $\omega = 4$ — C, Si, Ti, Zr, Sn, Hf, Th, U,
 - $\omega = 5$ — P, Nb, Ta (как комплексные анионы только),
 - $\omega = 6$ — W (как комплексный анион только).
- Кроме того: Au, Pt, Os, Ir, частично Hg, Bi.

Если нанести эти элементы на менделеевскую таблицу, то мы увидим, что типичные элементы россыпей связаны с двумя полями ионов: первое поле обнимает ионы типа благородных газов и охватывает соединения начальных фаз пегматитов как щелочных пород, так и гранитных; второе поле отвечает металлам семейства железа и платины. Совершенно особняком стоит олово (оловянный камень), примыкая генетически к первой группе.

Эта же таблица подсказывает и те элементы, коих мы можем ожидать в условиях накопления шлихов, а именно: (Li), Sc, V, U, не исключая Bi и частично Pb.

Таким образом, геохимический анализ шлихов и россыпей приводит нас к очень важным выводам и намечает пути их изучения на основе геоэнергетических представлений¹.

32. ПОИСКИ В ОБЛАСТИ ПРЕСНЫХ ОЗЕР И ИХ ОТЛОЖЕНИЙ

Огромный интерес связан с осадками в пресных озерах, в числе многих десятков тысяч покрывающих поверхность высоких и средних широт нашего Союза. Обычно на осадки пресных озер обращают мало внимания. Между тем, они имеют очень большое промышленное значение, особенно в условиях холмистого или горного рельефа. Использование осадков этих, по большей части мелководных, бассейнов особенно выгодно в случае возможности применить экскаваторы для выборки осадков, иногда достигающих мощности 2—3 м и больше. Наличие крупных ледниковых валунов вообще может создавать большие затруднения для механизации добычи.

Наиболее типичные осадки этих пресных озер могут быть сведены к ниже-следующим типам:

1. Чисто глинистые осадки, обычно механически снесенные прилегающими реками, в общем практического значения не имеют и могут быть оставлены без внимания.

2. В районах известняков и восходящих источников известны скопления мелкозернистого осадка, называемого у нас на севере г а ж е й. Эти новообразования кальцита дают первоклассный материал для цемента и частично для обжига на известку.

3. В районах таких же известковых пород, но и железистых вод, стекающих в водоемы, известны очень своеобразные отложения — почти белого или серого осадка к а р б о н а т а з а к и с и ж е л е з а FeCO_3 (северная Германия, Дания). Образование этих осадков можно себе представить так: воды, стекающие из областей пород, богатых железом, выносятся в озерные водоемы растворенные соединения окиси железа, которые там восстанавливаются в закись и осаждаются в виде карбоната подводными источниками, несущими углекислоту из областей известняков. Такие озера сами иногда обогащаются кальцием и железом. С аналогичным процессом связано образование скоплений в и в и а н и т а.

4. Весьма важны и в некоторых случаях практически используются скопления б о б о в ы х ж е л е з н ы х р у д, хорошо известные в огромном количестве озер Карелии, Финляндии, Швеции и Канады. При отсутствии ледниковых валунов они могут добываться драгами и давать легкоплавкую железную руду с повышенным содержанием марганца, фосфора и кремнезема. Частично эти руды покрывают бурой корой прибрежные камни или валуны. Их образование требует наличия близости пород, богатых железом (например, амфиболитов и т. д.).

¹ О закономерных рядах гипергенного разрушения см. интересную статью S. Goldich. A study of rock-weathering. Econ. Geol., 1938, XLVI (1), 1758.

5. Очень интересным и характерным для всего Приполярья является образование диатомита (кизельгур) на дне отдельных озер. Этот осадок бывает или довольно чистым, что мы наблюдаем в верхних «горных» озерах, или смешан с илистыми осадками или сапропелем¹. Необходимо уделить больше внимания этому прекрасному и весьма ценному веществу, которое накапливается в огромных количествах иногда под самыми полярными ледниками (Гренландия, Кольский полуостров, окрестности Луги, Большеземельская тундра, Западная Сибирь).

6. Наконец, совершенно исключительный интерес представляют мощные многометровые осадки сапропелей в озерах средних широт. Их связь с торфообразованием, очень сложный состав самого сапропеля обуславливают несомненную практическую ценность этого исходного продукта для перегонки; однако экономика и техника его добычи и обезвоживания не решена и требует дальнейших исследований.

Главнейшая литература

- У. Твенхофел. Учение об образовании осадков. 1936, 317—385.
А. Е. Ферсман. Геохимия и минералогия полярных областей. Доклады Акад. Наук СССР, 1936, № 8, 623—627.

33. ПОИСКИ В РАЙОНАХ ХОЛОДНЫХ ИСТОЧНИКОВ (КЛЮЧЕЙ)

Образования и отложения холодных вод гораздо интереснее геохимически, чем это принято думать: чаще всего они являются носителями карбонатов кальция, железа и магния, причем в местах их выделения обычно скопления:

- а) известкового туфа (травертина), как строительного декоративного материала;
- б) гаж и — землистой массы мелкокристаллического карбоната Са, дающей первоклассную известь;
- в) сталактитов и сталагмитов, имеющих значение лишь как декоративный материал в пустотах и пещерах.

Очень интересны геохимически выделения холодных ключей в озерах и болотах: они ведут здесь к осаждению на дне водоема гаж, белого осадка карбоната закиси железа, отрицательно влияют на образование снежного виваннта и т. д.

Другой тип имеют выносы холодных источников из пород, богатых сульфидами; в этом случае растворимые сернистые соединения окисляются, и у выхода ключей накапливаются массы бурого железняка или обогащенных железом карбонатов. Ржавые и бурые потеки обычно характеризуют выделения этих ключей. С ними внешне сходны воды, стекающие из болот или торфяников, генезис которых совершенно иной и связан с выносом кислых гуминовых растворов.

Приложение

ПОИСКИ ВОД

Привожу по С. С. Кузнецову (1935) основные положения поисков.

«Существует ряд признаков, руководствуясь которыми можно получить первое представление о наличии в данном районе подземных вод. Для группы грунтовых вод

¹ Повышенное содержание сапропеля в общем выгодно, так как обезвоживание в иных случаях может идти за счет сгорания органического вещества (по опыту Чехословакии); оно же ведет к получению высокодисперсных систем большой практической ценности.

самым важным и неоспоримым признаком надо считать естественные выходы их на земную поверхность в виде родников, ключей или источников. Следовательно, поиски грунтовых вод по существу на первых порах превращаются в поиски родников или источников, т. е. мест, где подземная вода сама вытекает из горных пород. Естественнее всего ожидать такие выходы в пониженных местностях, особенно же по речным долинам, которые, врезааясь в землю, тем самым пересекают горизонты подземных вод, начинающих высачиваться по склонам. Поэтому-то при поисках подземных вод в первую очередь надлежит направиться по долинам рек и речек, по оврагам, всевозможным промоинам, по берегам озер.

Внимательно осматривая берега и склоны, исследователь получает данные для суждения о наличии или отсутствии ряда признаков, характерных для подземных вод. Такие осмотры речных долин и берегов удобнее всего подгонять ко времени меженного, т. е. низкого стояния воды в реке или в озере, так как при половодье или просто высоким стоянии уровней многие родники могут быть затопленными и скрытыми от глаз наблюдателя.

Следующие признаки являются показателями наличия подземных вод:

- 1) ключи, родники и источники на склонах;
- 2) присутствие на покатостях и склонах рельефа заболоченных площадок;
- 3) особо резко в глаза бросается свежесть растительности, особенно травянистой, ее яркая зеленая окраска среди поблекшей и выжженной;
- 4) появление влаголюбивой растительности, как осок и др.;
- 5) заметное увеличение воды в речке на некотором протяжении при отсутствии притоков и видимых родников;

6) ступенчато-бугристый рельеф береговых склонов, являющийся результатом оползней, чаще всего происходящих под действием подземных вод; нередко в нижней части оползневых масс удается обнаружить и самые источники, сдвинутые вместе с породами и оказавшиеся как бы во вторичном положении.

7) нахождение известкового туфа или железистых образований; известно, что содержащее в растворе углекислоту известие подземные воды при выходе их на поверхность и соприкосновении с атмосферным воздухом теряет часть углекислоты, вследствие чего часть известия выпадает из раствора, облепляя растения, обломки пород и проч., при затвердении образуется пористый или паздреватый известковистый туф; при тех же условиях содержащаяся в водах закись железа превращается в нерастворимый гидрат окиси железа; присутствие известкового туфа или железистых образований будет свидетельствовать о прежней деятельности и выходах здесь подземных вод и, кроме того, будет служить указателем понижения в настоящее время таких выходов (вследствие ли понижения базиса эрозии, увеличения дренажа или других причин);

8) в областях развития вечно мерзлого грунта (Сибирь) признаком присутствия подземных вод могут служить наледи;

9) впае долин и оврагов, на равнинах, указанием на наличие на небольшой глубине подземной воды нередко считается появление вечерами, после захода солнца, над участками поля легких туманов, они образуются вследствие более сильного охлаждения воздуха над неглубоко залегающей подземной водой и выделения водяных сгущающихся паров; летом сюда привлекаются тучи мошек и комаров;

10) небольшое поднятие уровня рек при больших дождях указывает на усиленное впитывание вод в грунт и, следовательно, накопление там подземных вод;

11) быстрое исчезновение ручьев, образующихся после дождя в ложбинах, также указывает на присутствие сильно водопроницаемых слоев, которые поглощают воду и способствуют образованию грунтовых потоков;

12) быстрое таяние снега на некоторых участках поля может служить указанием на близкое залегание там грунтовой, более теплой воды;

13) обилие в местности дождевых червей, слизняков, отчасти кротов — показатели значительной влажности грунта;

14) при обходе большой безводной площади встреча на склоне глубокой расщелины ее долины мощного источника является надежным признаком существования грунтовых вод на известной глубине под данной безводной площадью;

15) незамерзание воды в некоторых местах речки, озера, болота указывает на наличие здесь русловых, подводных донных источников; в подобных местах весной будут пятна прозрачной воды среди общего мутного весеннего потока.

Все указанные приемы работ касались преимущественно пластовых подземных вод, циркулирующих в порах осадочных рыхлых пород. Залегают эти воды по большей части правильно вместе с водоносными пластами, вследствие чего самые поиски их наиболее легки и просты. К счастью, именно пластовые воды составляют основную группу с точки зрения бытового и фабрично-заводского промышленного использования.

Но в областях развития известняков, доломитов, гипсов, каменной соли и подобных сравнительно легко растворимых пород нередко образуются обширные подземные пустоты, и в них-то накапливаются и передвигаются воды. Это — группа карстовых

вод. Подземное их расположение всецело определяется пустотами и каналами — то пересекающимися, то изолированными, имеющими различную форму и залегающими на разной глубине от земной поверхности.

Если карстовые пустоты развиты в мощной толще растворимых пород, не прорезанных до водоупора речными долинами или оврагами, то говорят о глубоком карсте; в небольшой же толще растворимых пород, прорезанных до водонепроницаемого основания оврагом, рекой, озером, морем, развивается мелкий карст. Возможно также различать современные и древние карстовые образования; последние могут залегать глубоко под покровом более молодых отложений. В таком случае, пробуравив эти отложения, можно идти сухим грунтом и под ним врезаться в мощный водный поток, циркулирующий в погребенных пустотах древнего карста.

Подземные воды закарстованных областей уже не имеют той правильности водных горизонтов и той их сплошности, какие наблюдаются в условиях залегания пластовых вод. Крупные залежи подземных вод в карстовых местностях неожиданно могут обрываться и сменяться совершенно сухими породами. Следовательно, при рытье колодцев в подобной обстановке легко сделать ошибку и пройти мимо водной залежи.

Разыскивая воду в закарстованных областях, прежде всего надлежит лучше исследовать положение и распространение пород, в которых вследствие растворения образуются подземные пустоты — карсты. Важное значение имеет крутизна залегания этих пород. Оказывается, что благоприятнейшими условиями являются пологие углы падения, т. е. спокойное залегание карстующих пород.

С поверхности карстовые области можно распознать по наличию воронок и провалов, то заполненных водой, то свободных от нее.

Наиболее трудными и наименее надежными являются поиски вод в изверженных и метаморфических породах. Плотность их такова, что в целом они представляют массу, не допускающую проникновения в них воды. Она может попадать лишь в трещины и по ним передвигаться. Передвижение трещинных вод должно, естественно, происходить с большой быстротой, вследствие чего легкое проникновение внутрь кристаллических массивов дождевых или талых вод сопровождается таким же легким вытеканием их и осушением трещин. В местностях, сложенных кристаллическими породами, весной обычно наблюдается множество обильных водой родничков; летом же и особенно под осень край оказывается совершенно безводным. Более или менее надежное скопление воды в трещинах кристаллического массива возможно ожидать лишь тогда, когда на значительной площади в контакт с ним приходят малопроницаемые породы типа различных сланцев, глины и т. п.

Заметные и часто даже большие количества подземной воды могут содержаться в пористых молодых лавовых покровах и потоках, если они подстилаются водоупорными породами.

Само собой понятно, что в трещинных массивах кристаллических пород подземные воды не образуют сплошной водной поверхности на сколько-нибудь значительных площадях. Воды здесь лежат участками, прерывисто, вследствие чего весьма легко при сооружении колодца пройти мимо них. Опытные гидротехники, работающие в кристаллических породах, указывают, что если в заложеной скважине не оказалось воды на первых 60—100 м или даже 30—60 м, скважину следует оставить. Выгоднее заложить в 15—20 м другую, с расчетом наткнуться на сеть водоносных трещин, которые всегда обильнее в верхних толщах массива.

Трещинные воды обычно, сообщаясь с атмосферой, являются свободными грунтовыми водами; иногда же, переполнив сеть трещин, они могут приобрести свойства напорных. Однако большие и мощные напорные воды опять-таки приурочены к осадочным породам.

Особенно благоприятные условия для образования напорных артезианских вод встречаются в области развития складчатых и вообще дислоцированных геологических структур. Выгоднейшими для накопления напорных подземных вод являются многочисленные формы залегания пластовых пород, чаще всего приближающихся к антиклинальным складкам. Каждый такой подземный водонос составляет артезианский бассейн, в котором различают область питания, область накопления и область стока, если бассейн рассеян глубоким эрозийным образованием.

Напорные воды, залегающие обычно на значительной глубине, могут быть изучаемы с применением бурения, изложение чего выходит за пределы наших задач. Однако известное представление о возможности нахождения таких вод в толще пластов и о примерной глубине их, а также приуроченности к тому или другому слою можно получить путем исследования геологического строения данной местности.

В пунктах обнажения голов дислоцированных в складки пластов можно достаточно основательно изучить петрографический состав их и сделать определенные выводы о возможной водоносности этих пластов на глубине, что прольет значительный свет и на дело поисков глубоко залегающих напорных вод».

34. ПОИСКИ В РАЙОНАХ НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Геохимически районы выходов нефти и нефтяных вод связаны с рядом важных полезных ископаемых; потому в связи с ним необходимо обращать внимание на следующие геохимические образования:

1. Выходы газовых струй, богатых углеводородами, азотом и нередко гелием, что составляет их огромную практическую ценность.

2. Соединения бора в виде растворимых солей, иногда в количествах практического значения, особенно при отсутствии в растворах солей кальция и магния.

3. Соли пода и брома, причем особое значение принадлежит иоду.

4. Соли радия и мезотория (при отсутствии иона $[SO_4]$).

Сходные сочетания полезных ископаемых можно встретить и в образованиях грязевых вулканов и сальз.

В связи с самой нефтью стоят скопления: кира, асфальтов, озокерита; нередко сопутствующие воды содержат и откладывают гидраты сульфидов железа. В осадочных свитах в связи с гипсами стоит образование самородной серы.

Этим районы нефтяных месторождений определяются как особые геохимические комплексы большого теоретического и практического значения.

П р и л о ж е н и е

Поиски нефти (по С. С. Кузнецову, 1935):

«можно наметить следующие основные положения, которыми следует руководствоваться при поисках нефти. Эти положения таковы:

- 1) наружные признаки, показывающие на возможное присутствие в пластах нефти;
- 2) литологический состав пород стратиграфического разреза района;
- 3) тектоническое строение или геологическая структура его.

Поверхностными признаками нефти являются:

- а) высачивание нефти,
- б) отложение асфальта и кира,
- в) выделение газов в водоемах грязевых вулканов или непосредственно из земли,
- г) присутствие солевых источников,
- д) наличие серы в пустотах пород или ничтожных следов ее в виде точек и пятнышек,
- е) выделения сероводорода,
- ж) присутствие в пластах гипса,
- з) наличие песчаников или известняков, пропитанных нефтью или битумами,
- и) чахлая и недоразвившаяся растительность, а также легкий запах нефти, который чувствуется иногда даже в тех местах, где настоящих выходов жидкой нефти не имеется.

В природных выходах на поверхность нефти может наблюдаться в виде:

- а) пленок на воде родников или рек,
 - б) небольших скоплений жидкой нефти,
 - в) скоплений густой нефти в виде натеков, а иногда целых озер,
 - г) окрашенных или пропитанных нефтью так называемых закированных пород.
- В отношении литологического состава надлежит: а) выявить наличие или отсутствие свит, которые могли бы явиться нефтепроизводящими, б) выявить наличие пластов, которые могли бы благодаря своей пористости собирать, коллектировать нефть из окружающей толщ пород, обладая высокой проницаемостью, легко отдавать эту нефть при откачке в пробуренных на данные пласты скважинах.

Для нефтеносных районов Кавказа Н. В. Вассоевич рекомендует руководствоваться при изучении свит следующим: «а) в свите должны быть терригенные или смешанные пелитовые породы — глины, известковистые глины, реже — мергели (карбонатность особенно большой роли не играет); б) среди пелитов должно быть много пиробитуминозных пород. Выявить последние иногда удастся и в полевой обстановке благодаря целому ряду признаков: цвет их обычно темный, слоение тонкополосчатое;

дошние организмы или совсем отсутствуют или крайне редки и принадлежат определенным группам животного мира; довольно часто встречаются планктонные и некоторые другие формы (например, рыбы); при выветривании пиритобитуминозные пролои выделяют ряд характерных материалов, свидетельствующих о содержании мелко-рассеянного пирита в первоначальном осадке, как то: гипс, лимонит, ярозит, квасцы; внесенные в пламя кусочки испытываемых на пиробитумы глины чернеют, иногда загораются на мгновение, иногда только издают характерный запах, напоминающий запах жженой резины или сапропеля и т. д.».

Совершенно необходимо учесть:

- а) возраст и стратиграфическое положение всех пород района поисков;
- б) присутствие среди нефтеносных песков, в их кровле и почве, глинистых пластов, предохранителей нефти от растекания и утечки или миграции;
- в) при установлении наличия в свете пород-коллекторов необходимо выяснить их роль во всем разрезе, общую мощность и мощность по отдельным пластам, а также характер пористости, состав и свойства пористых пород;
- г) фаціальную изменчивость свит по падению и простиранию, их выклинивание;
- д) глубину денудации, мощность размытой части нефтепосной свиты, характер ее и общее значение для залежи.

В отношении геологических структур следует искать наличия таких тектонических форм, которые создали бы в данном месторождении благоприятные условия для скопления и сохранения нефти в имеющихся коллекторах.

Обычно считают благоприятными тектоническими формами куполообразные и брахантиклинальные поднятия, в которых на глубине залегают пористые пласты, заключенные в непроницаемых или малопроницаемых толщах: флексуорообразные или ступенчатые изгибы пластов, сбросы, надвиги и другие нарушения также создают условия, способствующие скоплению нефти в коллекторах, так как образуют перекрытия, закупоривающие нефтяные залежи. Короче говоря, благоприятную оценку найденному нефтяному месторождению можно дать в случае присутствия антиклиналей, диапировых складок, моноклиналей, флексур, соляных структур или погребенных надвиговых сооружений. Необходимо возможно точно установить элементы залегания пород: величину углов падения, их постоянство или изменчивость по простиранию и падению залежи. При этом чем положе углы, тем постояннее условия залегания пород в структуре, а следовательно, тем благонадежнее нефтяное месторождение.

Большое значение имеет установление типа аяктиклиналей: прямая, косая, опрокинутая.

Кроме перечисленного, при поисках нефти, изучая тектонику, надо установить:

- а) существование или отсутствие вторичной складчатости, при которой образуются параллельные боковые складки на главной антиклинали, а также изогнутость, волнистость (овдупляция) осей отдельных куполов или брахантиклиналей на фоне общей складчатости;
- б) характер и число нарушений в разрывом сплошности пород, нарушений сбросового типа, величину перемещений, характер трещин и размеры затронутой сбросами части общей структуры. Чем меньше нарушения, тем благонадежнее нефтяная залежь;
- в) наличие вторичной складчатости (квиважа), раздробленность пород и присутствие дислокационных брекчий.

Наряду с тектоническими и стратиграфическими наблюдениями при поисках нефти весьма важное значение имеет изучение подземных вод. В этом отношении надлежит выяснить:

- а) присутствие и характер пластовых вод и особенности их минерализации в разных породах, входящих в общий разрез залежи;
- б) положение пластовых вод в отношении нефтеносных пород;
- в) характер пород, отделяющих водяные пласты друг от друга и от нефтяных;
- г) химический анализ воды; он может говорить о наличии и размере нефтесодержащих пород, а именно: бедность воды сульфатами, содержание иода и брома, а также нефтяных кислот являются признаками, чаще всего свойственными водам нефтяных месторождений;

д) приуроченность водопровывлений к линиям нарушений, к тем или иным элементам складки. Вода, встречающаяся в песке, дающем вытяжку нефти в бензине, на далеком крыле, еще не может опорожить залежь, но нахождение воды в таком песке где-нибудь в сводовой части понижает шансы залежи по крайней мере в отношении рассматриваемого пласта. Воды, восходящие по зияющим сбросовым трещинам, секущим ряд пород залежи, также поведут к пониженной оценке ее.

Обилие соленых вод, приуроченных к тем или иным пластам залежи, при оценке месторождения вообще следует рассматривать как фактор отрицательный. Но не следует упускать из виду и таких взаимоотношений, когда вода является основным и в некоторых случаях могущим фактором промышленной значимости залежи, как, например, в Новогрозненском месторождении с его гидродинамическим режимом».

Главнейшая литература

- А. Д. Архангельский. Условия образования нефти на Северном Кавказе. 1927, 1—100.
- В. В. Белоусов и Л. А. Яроцкий. Грязевые сопки Керченско-Таманской области. ОНТИ, 1936, 1—155.
- И. М. Губкин. Учение о нефти. ОНТИ, 1937, 1—443, особенно стр. 200.
- И. М. Губкин и С. Ф. Федоров. Грязевые вулканы Советского Союза. Изд. Акад. Наук СССР, 1938, 1—43.
- С. С. Кузнецов. Поиски полезных ископаемых. Л., 1935 (популярное издание).
- К. Краг. Поиски нефти. Нефт. издат., 1923, 1—345.
- Г. Л. Стадников. Происхождение углей и нефти. Изд. Акад. Наук СССР, 1937.
- П. И. Степанов и С. И. Мионов. Геология месторождений каустобиолитов. ОНТИ, 1937. Особенно 411, 441.
- Krejš Graf K. Geochemie der Erdöllagerstätten. Abhandl. prakt. Geol., 1930, XX, 1—52.

35. ПОИСКИ В ОБЛАСТИ БОЛОТ И ТОРФЯНИКОВ

Геохимически области болот и торфяников представляют, несомненно, очень большой интерес, и изучение восстановительных реакций в болотной среде и болотных водах при обилии гуминовых кислот и микродеятельности организмов составляет очень интересную задачу исследования, частично захваченную в последние годы исследователями северных районов (И. И. Гинзбург; Аарнио в Финляндии).

Практический интерес в районах торфяников представляет:

1. Новообразование торфа нередко связано с отложением сапропелей, представляющих, несомненно, очень интересное химическое сырье ближайшего будущего.

2. Характерно для низин в средних и северных широтах накопление железных руд типа оолитовых. Скопления небольшие и вряд ли могут сейчас играть какую-либо роль, которая была понятна в условиях кустарной промышленности XVII и XVIII веков (Устюжна, Южная Карелия).

3. Наиболее характерным минералом торфяников является фосфат закиси железа — вивианит, синий цвет которого связан с сочетанием понов закиси и окиси железа. Это соединение в некоторых местностях образует довольно мощные горизонты и может добываться сотнями и, может быть, тысячами тонн. Практическое применение как красителя невелико, и вивианит лишь кустарно используется как синяя краска. Реакции образования этого минерала еще не выяснены, его окисление в буро-красные фосфаты понижает достоинства красителя. Гораздо важнее применение, как удобрения, фосфо-торфа.

36. ПОИСКИ В МЕСТОРОЖДЕНИЯХ УГЛЯ
(БУРОГО И КАМЕННОГО)

Месторождения углей являются геохимически важными образованиями, связанными с серьезными процессами дифференциации химических элементов земной поверхности. Те поверхностные факторы, которые вызывают образование углей и связанные с ними физико-химические условия (восстановительная среда, низкие рН кислых растворов), ведут к специфически очень важным скоплениям полезных ископаемых, нередко накапливающихся в угленосных породах или переслаивающихся с ними. Таковы следующие полезные ископаемые¹:

¹ Мы не касаемся поисков самих углей, как очень большой и сложной проблемы, требующей специального руководства. Отметим лишь несколько деталей: нередко слои угля на выходах вырисовываются по массам «сажи», т. е. выветрелых сортов угля; в Донецком бассейне на уголь указывают «мягówki» — рыхлые массы изменен-

1. В самих углях или сопутствующих непосредственно глинах и песках — конкреции пирита (марказита) в количествах, имеющих иногда практическое значение (например, в Подмосковном угольном районе, в Боровичах); особая ценность этого пирита для бумажной промышленности заключается в отсутствии в нем селена.

2. Хорошие чистые кварцевые пески.

3. Глины огнеупорные высоких термических качеств; иногда в связи с бурными углями (например, Украина) — каолины.

4. В толщах, связанных с углями, очень типичные скопления FeCO_3 — сферосидеритов, связанных, очевидно, с восстановительной средой¹.

5. Наконец, несомненно большой геохимический интерес связан с содержанием в золе углей редких металлов — германия, мышьяка, ванадия, бора, скандия и др. Однако практическая возможность их извлечения пока под сомнением; она не исключена, впрочем, для германия и ванадия. Геохимический анализ указанного комплекса пока отсутствует, и до сих пор идет лишь накопление точного экспериментального материала.

Приводим интересную табличку Гольдшмидта (Goldschmidt, 1935) для золы углей разного происхождения (табл. 12).

Как видно, наибольший интерес представляет накопление бора, германия, мышьяка и ванадия (о последнем элементе см. стр. 691).

Главнейшая литература

- Ю. А. Жемчужников. Общая геология каустобиолитов. ОНТИ, 1935.
 А. К. Русанов и В. М. Кострикин. К вопросу о распространении *Ge* в ископаемых углях. Сб. в честь 50-летия научной деятельности акад. В. И. Вернадского, 1937, I, 169.
 П. И. Степанов и С. И. Мионов. Геология месторождений каустобиолитов. ОНТИ, 1937, 1—547.
 V. M. Goldschmidt u. Cl. Peters. Über die Anreicherung seltener Elemente in den Steinkohlen. Nachr. Ges. wiss. Göttingen, 1933, 371—386.
 V. M. Goldschmidt u. Cl. Peters. Rare elements in coal ashes. Ind. a. Eng. Chem., 1935, XXXII, 1100—1104.

37. ПОИСКИ В ПРИПОЛЯРНЫХ РАЙОНАХ

В полярных районах и в некоторых высокогорных районах больших горных плато (например, Памира) мы имеем дело с рядом специфических геохимических процессов, которые до сих пор, к сожалению, мало изучены.

Территория Севера заболочена, покрыта тундрами и обломками горных пород или занесена моренными отложениями ледников. В течение значительной части года она покрыта ледяным или снеговым покровом и доступна для непосредственной работы геологов иногда только 1—2 месяца в течение короткого лета. Наличие вечной мерзлоты создает две геохимически и геофизически разнородные зоны. Геологическая работа исследователя наталкивается, таким образом, на громадные затруднения и требует специальных и специфических методов для разрешения тех больших проблем хозяйственного овладения, которые стоят на очереди. Постепенно начинает вырабатываться методика, и в сущности две основные линии начинают все больше и больше преобладать при освещении полярных

ных пород (каоилинизация и карбонатизация). В Кузнецком бассейне — приметой залежей угля являются «горельники» — пространства, обожженные подземными пожарами.

¹ Отметим еще распространение янтаря в некоторых бурых углях.

Таблица 12

Содержание редких металлов в золе углей
(по В. М. Гольдшмидту)

Металлы	Содержание в %		Концентрация		Металлы	Содержание в %		Концентрация	
	максимальное	среднее	максимальная	средняя		максимальное	среднее	максимальная	средняя
Be	0,1	0,03	100—500	30—150	Y	0,08	0,01	80	10
B	0,3	0,06	1000	200	Zr	0,5	—	25	—
Sc	0,04	0,006	70—130	10—20	Mo	0,05	0,02	30	13
Co	0,15	0,03	40	8	Sb	0,1	0,02	—	—
Ni	0,8	0,07	80	7	Sn	0,05	0,02	10	4
Zn	1	—	50	—	Pb	0,1	—	—	—
Ca	0,04	0,01	30—40	7—10	Bi	0,003	—	—	—
Ge	1,1	0,05	1600—2800	70—120	Ag	0,0005—0,001	0,0002	50—100	20
As	0,8	0,05	1600	100	Au	0,00002	—	40—100	—

пространств и изучении их полезных ископаемых. Это методы геофизики, с одной стороны, и геохимии — с другой.

Методы геофизики сделались сейчас доминирующими в целом ряде исследований и поисков полезных ископаемых. Эта специфическая методика особенно необходима для поисков металлических или сульфидных полезных ископаемых в областях, сплошь покрытых валунами и глинистыми наносами. Сочетание низкой скорости химических процессов с отсутствием перемещения больших количеств воды, при низком рН и восходящих течениях, ведет к целому ряду геохимических и геологических процессов, типичных для полярных областей.

В тесной связи с характерными особенностями геохимии приполярных областей находятся и некоторые своеобразные геохимические реакции и наличие ряда минералов, свойственных этому климатическому режиму. Мы перечислим наиболее характерные и интересные минеральные виды.

1. Лед как минерал очень мало изучен. Его образование связано с трехфазовой системой из двух компонентов ($\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2$); настоящее минералогическое исследование его началось лишь в последние годы под руководством профессора П. Ниггли в Альпах на Давосской снеговой станции, первый отчет которой вышел в 1937 г.

2. Гидрогалит $\text{NaCl} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Замечательный пластинчатый минерал, впервые описанный из Кемпендэйских, соляных источников на р. Вилуе Э. Мааком (1850 г.). Позднее (в 1907 г.) он был хорошо изучен царским сынным поселенцем П. Л. Дравертом.

Образование этого минерала, несомненно, пропускается полярными исследователями, и при замерзании и замораживании соленой воды ниже 5° образующиеся иглы и пластины гидрогалита и его криогидрата — криогалита принимаются, очевидно, за кристаллы льда. Об этом по шероховатости полярного морского льда писал еще Ф. П. Врангель. Диаграмма его равновесия и образование зимой в рапе Баскунчакского озера хорошо описаны А. П. Николаевским.

3. Хлористый натрий. Явление вымораживания морской воды является интересным геохимическим процессом, который был описан и в полярной Канаде и на севере Кольского полуострова. Выделяющийся при этом хлористый натрий (с другими солями) образует как бы выцветы, напоминающие выцветы солей на ледниковых моренах. Выделение солей при низких температурах могло бы быть использовано даже промышленно на нашем севере, так как, например, условия Белого моря позволяют в Кандакше в течение семи месяцев вести химические процессы при температурах ниже нуля. Особенную роль для испарения при этом играет ветер.

4. Сера. Очень своеобразна реакция выпадения серы при низких температурах, на что имеется ряд интересных указаний. Сера образуется вследствие замерзания воды и выделения растворенного в ней сероводорода в районах, богатых гипсом; благодаря этому в некоторых местах Архангельской области после таяния снегов в озерах и водах происходит выделение серы, которое давало иногда начало кустарному промыслу. Хотя такое образование серы и не может считаться типичной «арктической» реакцией, тем не менее оно заслуживает особого внимания после работы в Антарктике Э. Шекльтона (1903 г.), который, описывая вулкан Эребус, говорит о сольфатарах из желтого льда с мелкодисперсными частицами серы, что представляет замечательный минерал, требующий изучения.

5. Для гидратов железа и марганца мы имеем в приполярных широтах образования, по преимуществу соединенные с большим количеством воды, — гидропиролузита в первом случае и лимонитов и эсмеральдитов — во втором. Эти образования многоводных гидратов ве-

дут и к резко буро-желтым тонам продуктов окисления железа и к черно-грязным тонам для марганца.

6. Типичным процессом северных областей является накопление опала в виде диатомовых панцирей. Этот процесс особенно широко охватывает Канаду, Кольский полуостров, Гренландию и, вероятно, будет широко встречен и в северных областях Сибири (особенно в приполярной Якутии).

Отложения диатомита, иногда смешанные с осадками сапропеля, представляют большую практическую ценность как вяжущее вещество при строительстве, но до сих пор с успехом они употребляются лишь в полярной Канаде, где, пользуясь различием уровней, воду спускают из озер, богатых диатомитом, после чего диатомит добывают экскаваторами.

7. Типичным минералом приполярных тундр является вивианит — яркосиний фосфат торфяников. Хотя мы его знаем в очень больших количествах и в средних широтах, под Москвой и в Белоруссии, но все же поразительно его обилие и сохранение в чистом виде без окисления, например в Большеземельской тундре, в ряде болот Таймырского п-ова и т. д. Этот минерал может быть рекомендован и как дешевая местная синяя краска и как удобрение для бедных фосфором полевых угодий.

8. Свообразным, но совершенно неизученным соединением являются фосфаты, образующиеся из громадного количества скоплений гуано на птичьих базарах. Это соединение геохимически в полярных условиях не изучалось, хотя огромное количество накапливающихся фосфорных соединений не может пройти без влияния на субстрат. Если мы не можем ожидать здесь тех крупных скоплений фосфоритов, которые образуются из гуано на коралловых островах тропиков, то все же их изучение с точки зрения проблемы миграции фосфора представляет значительный интерес. Еще в 1845 г. была предпринята попытка вывезти гуано с о-ва Колгуева для его использования как удобрения. На своеобразии этих процессов обращал внимание А. Н. Норденшильд — тонкий географ и минералог.

9. Но, может быть, самым замечательным минералом северных морей являются так называемые беломорские рогульки, которые впервые были отмечены Н. Щегловым в 1824 г. и позднее неоднократно описывались Деклуазо, Соколовым, П. В. Еремеевым, П. Л. Дравентом, Е. Д. Ревуцкой и др. Эти образования вылавливаются сетями рыбаков из глубин Белого моря около Архангельска и иногда достигают 12 см длины при толщине 2,5 см. Кроме того, они встречены в больших количествах в устьях многих полярных сибирских рек, а также в некоторых третичных и четвертичных породах Шпицбергена и Новой Земли. В Минералогическом музее Академии Наук мы имеем богатейшие собрания этого минерала, который остается для нас и сейчас загадочным. Обстоятельное описание его было сделано еще в 1882 г. П. В. Еремеевым, который определил рогульки как псевдоморфозы арагонита по целестину, хотя и отметил исключительное сходство их с кристаллами так называемого псевдогейлюссита.

Из приведенных данных вытекает, что полярные области характеризуются рядом специфических полезных ископаемых и нуждаются в специфических методах исследования. К ним в особенности применимы все указания общего характера, требующие от поисковиков тонкого геохимического знания всей геологической и петрографической обстановки.

Приложение. Совершенно особый и притом практический интерес представляют некоторые биохимические процессы на высокогорных плато: так, на Памире, т. е. на высотах порядка 4000 м, наравне с сильным и механическим выветриванием, наблюдается образование корок селитры, что, вероятно, связано с жизнедеятельностью

микроорганизмов. Процесс мало изучен, но может иметь некоторое местное значение. Возможно и влияние катализаторов, как Fe_2O_3 и Fe_3O_4 , образующихся под действием сильной инсоляции.

Главнейшая литература

- В. И. Вернадский. Опыт описательной минералогии. 1914, I, 510.
 А. П. Николаевский. Природа, 1938, № 1, 87.
 Б. К. Поленов. Проток. Об-ва естествоиспыт. Казанск. ун-та 1908—1909, № 246, 1—9.
 А. А. Подканов. Вестн. Геол. ком., 1927, № 6, 22—28.
 А. Е. Ферсман. Перспективы полезных ископаемых в приполярных областях Союза (разобраны методы поисков в полярных областях). За индустр. Сов. Вост., 1932, 1, 5—16.
 А. Е. Ферсман. Геохимия и минералогия полярных областей. Доклады Акад. Наук СССР, 1938, XIX, № 8, 623—626 (литература).

38. ПОИСКИ СРЕДИ ЛЕДНИКОВЫХ ВАЛУНОВ

Скопления ледниковых валунов вообще представляют очень большой теоретический и практический интерес¹. В районах, отдаленных от центров оледенения (в Средней России, в Германии), анализ ледниковых валунов дает лишь ответ на общие геологические проблемы; но в северных областях (например, в Швеции, Финляндии, Карелии и на Кольском полуострове и далее к востоку вплоть до Западной Сибири) изучение валунов является очень важным методом поисков **к о р е н н ы х** месторождений. Зная характер и направление движения ледников, можно по находкам валунов постепенно приблизиться к местам коренных выходов самих полезных ископаемых; именно этим методом по валунам колчедана было открыто в Финляндии крупное сульфидное месторождение Оутокумпо.

У нас необходима постановка этих исследований, особенно на Кольском п-ове и в Карелии, но необходимо иметь в виду, что успешное использование этого метода возможно лишь при хорошей изученности четвертичной геологии края. В указанных районах этот метод должен быть применен для поисков известняков, сульфидных руд меди и никеля и особенно для отыскания выходов щелочных пород, богатых различными полезными ископаемыми.

Главнейшая литература

- С. С. Кузнецов. Поиски полезных ископаемых. 1935, 67 (популярное изд.).

Глава VI

ПОИСКИ ОТДЕЛЬНЫХ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

(в порядке менделеевской таблицы)

Задачей настоящей главы является характеристика тех поисковых признаков, которые необходимо иметь в виду при поисках отдельных химических элементов.

¹ Не надо забывать, что в ряде районов Севера идет широкое использование валунов, как «булыжника» для строительства (в частности мостовых) и для приготовления памятников. Необходимо считаться с тем, что в качестве валунов остаются самые прочные породы и наиболее неизменные куски, чем и определяется их практическая ценность.

В своей основе эта глава опирается на IV том «Геохимии» и имеет целью в краткой и доступной форме дать характеристику тех главнейших черт элементов и их соединений, с которыми приходится сталкиваться при полевой работе. Необходимо, однако, при этом иметь в виду, что для правильного полевого определения и первой ориентировки, помимо большого опыта и привычного глаза, неизбежно обычно применение простых химических или физических методов.

Как указано было в первой части этого руководства, особенно важным является определение свойств твердости, отчасти удельного веса, отношения минерала к воде и особенно к кислотам и наиболее характерных реакций перед паяльной трубкой.

За последнее время огромное значение приобретают и некоторые специальные методы люминесцентного и спектроскопического анализов.

Особое значение необходимо придавать широкому использованию цвета как поискового признака. Правда, как было указано выше, при этом необходима большая осторожность; но вместе с тем для опытного глаза мельчайшие оттенки цвета, его сочетания с другими тонами дают такой огромный материал наведений и выводов, что геохимик в полевой обстановке должен приучить свой глаз к распознаванию цвета как первого и важнейшего диагностического признака.

Необходимо иметь в виду, что целый ряд внешних свойств не может быть выражен обычным описанием или определенными словами и понятиями. Тонкие различия блеска, цвета, отражательной способности, характер поверхности и излома создают столько специфического в характеристике каждого данного минерала, что нередко, не зная даже минералогии, опытный поисковик, просто на основе огромного опыта, подходит к правильным выводам в своей поисковой работе.

Поэтому мы должны с особой настойчивостью рекомендовать приучать свой глаз к минералам, знакомясь с их собраниями в музеях¹. Перед каждой полевой поездкой в район, в котором намечается возможность нахождения тех или других минералов и полезных ископаемых, необходимо знакомиться вначале с самими минералами в музеях и приучать свой глаз к тем мельчайшим различиям, которые характеризуют их различные типы. Распределение отдельных минералов по геохимическим типам, т. е. по отдельным химическим элементам, дает возможность знакомиться с теми особенностями, которые характерны для разнообразных соединений одного и того же химического вещества. Такова, например, геохимическая выставка в Минералогическом музее Академии Наук (Москва, Б. Калужская, 32).

В последующем изложении элементы расположены в порядке менделеевской таблицы, причем цифра перед названием элемента дает его порядковый номер.

2. ГЕЛИЙ

Значение поисков гелия обуславливается возрастающей ролью его в воздухоплавании и в промышленности сверхнизких температур. Добыча гелия возможна из радиоактивных минералов, минеральных источников и газовых струй, причем серьезное значение имеет только последний источник.

¹ Например, для поисков оловянных руд обязательно знакомство с теми своеобразными типами оловянных минералов, которые типичны для месторождений Африки и Боливии.

Из радиоактивных минералов больше всего гелия содержится в древних уранинитах, не измененных последующими процессами, а также в монацитах из песков (см. поиски этих минералов).

Особое значение принадлежит гелию в газовых струях, содержащих углеводороды и азот. В этом случае руководящими при поисках обычно являются следующие факторы:

- 1) повышенное содержание азота в газовой струе;
- 2) связь с районом распространения гранитов, богатых ураном и радием;
- 3) образование мощных зон подвергающейся разрушению дресвы, из которых мог бы извлекаться гелий;
- 4) прохождение через скопления гранитной дресвы легких углеводородов (из более глубоких струй);
- 5) наличие над районом разрушения гранитов кровли, которая бы задерживала и накапливала газы.

Таким образом, в качестве районов, богатых гелием, намечаются края древних щитов с их гранитными массивами и связанные с ними площади массового накопления обломочных образований и мелкодисперсного вещества при наличии особой тектоники и сети разломов, облегчающих проникновение глубинных вод и газов.

Как видно, для образования и сохранения больших скоплений гелия необходимо сочетание многих геологических и геохимических факторов, и поэтому поиски этого полезного и важного ископаемого возможны лишь на основе углубленного геологического и тектонического исследования каждого района.

3. ЛИТИЙ

Поиски соединений лития в нашей стране представляют несомненный интерес как для получения литиевой руды, так и для открытия богатых литием минеральных вод.

Практически приходится говорить исключительно о двух типах месторождений, в которых нужно искать литиевые минералы (рис. 58).

Меньшее значение имеют пневматолиты вместе с кварцем, оловянным камнем, реже вольфрамитом.

Нередко по залебам наблюдаются каемки слюдистых минералов — богатого литием циннвальдита, который при эксплуатации жил на олово обычно идет в отброс.

Гораздо большее значение имеют гранитные пегматитовые геофазы E — F — G, в которых литий встречается в виде силикатов или фосфатов обычно с лиловым и розовым лепидолитом, полихромными, особенно розовыми турмалинами, в белом или зеленоватом альбите. В этих случаях важно организовать добычу вместе с рудами олова, иногда ниобия, часто бериллия. В самих лепидолитах встречается нередко повышенное содержание рубидия и цезия, которые должны использоваться попутно.

Указанные литиевые пегматиты обычно встречаются на контактах верхних (аппикальных) частей гранитов или на некотором расстоянии от них, но не выше 1 км.

Внешние признаки самих литиевых минералов мало характерны, но для литиевых пегматитов типичны светлые — белые или розоватые — тона и наличие вообще розовых литиевых слюдок и цветных турмалинов.

Поиски районов, богатых литием, могут вестись путем изучения расхождения этого элемента в поверхностных зонах земной коры. Точная методика этих поисков, однако, еще не проработана.

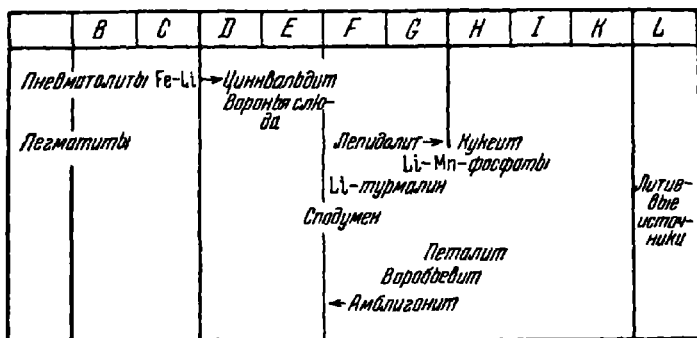


Рис. 58. Тип геохимической диаграммы для отдельных химических элементов.

Диаграмма дает сводную картину пространственных и хронологических соотношений минералов, содержащих литий в разных геофазах и в разных типах геохимических процессов. Она составлена на основе суммарной геохимической картины распространения данного химического элемента и его миграции в земной коре.

4. БЕРИЛЛИЙ

Поиски промышленных месторождений руд металла бериллия практически связаны исключительно с поисками минерала берилла в гранитных пегматитовых жилах и сопряженных с ними пневматолитах.

Особняком стоит вопрос о поисках других берилловых минералов, как, например, фенакита или изумруда, имеющих значение преимущественно в промышленности драгоценных камней.

Берилл практически в крупных месторождениях приурочен исключительно к пегматитам двух типов. В пегматитах чистой линии, связанных с гранитами, реже гранодиоритами, берилл накапливается в определенную геофазу процесса E, причем до него образуются пьшменные граниты, после него — альбитовые скопления с литиевыми минералами. Это определяет тот средний тип пегматитов, который обычно приурочен к самым верхним, аликальным частям гранитной интрузии, изредка выходя несколько за пределы самого гранита.

Для бериллов этого типа характерны типоморфные изменения окраски. При более высоких температурах мы имеем желто-зеленые тона, при понижении температуры геофаз F и G мы встречаемся с бериллами белыми или розовыми, которые редко образуют очень крупные промышленные скопления, но чаще всего представляют интерес или как красивые драгоценные камни (воробьевит) или как указание на наличие скоплений редких металлов — рубидия и цезия.

Поиски этого типа пегматитов должны быть направлены в сторону богатых полевым шпатом жил, причем для берилла положительным указанием является небольшое количество черного шерла, отчасти листочки мусковита и зерна топаза.

Второй тип скоплений берилла связан с гранитными пегматитами десиликации, т. е. с пегматитовыми жилами, давшими при внедрении в основ-

ные или ультраосновные породы начало особым контактным и мигматическим зонам, в которых накапливается берилл и, в качестве его спутников, фенакит, хризоберилл, флюорит и др.

Нет никакого сомнения, что основные скопления бериллового сырья связаны именно с этим типом (Южная Африка).

Нередко этот тип приобретает особое значение благодаря тому, что с ним связано образование красиво окрашенного изумруда.

Наконец, третьим типом берилловых месторождений являются пневматолиты гранитного типа, характеризующиеся обилием кварца и содержанием обычного голубого или синего аквамарина с другими продуктами пневматолита — флюоритом, сульфидами, оловянным камнем, вольфрамитом и т. д. Очень крупные скопления берилла в этом типе нам неизвестны, но иногда берилл может попутно извлекаться из них одновременно с добычей других полезных ископаемых. Необходимо при поисках иметь в виду, что берилл и фенакит хорошо сохраняются в элювиальных и аллювиальных россыпях.

5. БОР

Бор является в настоящее время одним из важнейших объектов минерального сырья. Поиски его должны идти по линии отыскания различных боратов кальция и магния, так как борные силикаты (турмалины или

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	K	L
Скарновый процесс				Везувий Лабрадорит		Домбурит		Аксинит			
Пневматолиты				Турмалин Шерл		Зеленый турмалин		Шерл с сульфидными Au Cu		Борные соединения	
Пегматитовые остаточные						III IV V		VI			
	I шерл (в салтызах)			Шерл II турм. бор. зелен. розов. шерл игалоч.		Родолит		Аксинит			
	Дамфтерит					Гамберит					
						Домбурит					
						Едемевит (?)					
								Датолит			

Рис. 59. Геохимическая диаграмма соединений бора.

Построение, аналогичное диаграмме рис. 58, дает краткую картину геохимической миграции бора и взаимоотношений отдельных борных соединений в процессах магматической и постмагматической деятельности.

датолит) могут получить применение лишь в особых условиях комплексного использования.

Для обычных боратов при поисках следует считаться с двумя типами процессов. В одних случаях борнокислые соединения и, в частности, борная кислота связаны с эманациями как современных, так и четвертичных угасших вулканов. Поиски их связаны с изучением налетов и возгонов в вулканических местностях, а также с химическим опробованием минеральных вод и горячих терм.

Гораздо большее значение принадлежит у нас в Союзе второму типу борных месторождений, в которых бор связан по существу со свитами химических осадков отмирающих морских бассейнов. Однако вторичная

концентрация из рассеянного состояния может иметь место лишь при наличии некоторых специальных условий.

Частично бор вымывается нефтяными и сопочными водами; соответственно поиски скоплений борнокислых солей необходимо вести по линии изучения состава нефтяных и сопочных вод, а также налетов и грязей, которые в иных случаях оказываются содержащими большое количество боратов.

Более интересный и крупный процесс связан с перегруппировкой и вторичной концентрацией бора в самих осадочных соленосных свитах. При этом обычно наблюдаются перемещения и концентрации бора в кровле соляных куполов вместе с гипсом и корками кальцита белоснежного цвета. Нередко радиальная лучистость, трудная растворимость солей в воде и отсутствие шипения при действии кислот служат первыми признаками при определении боратов кальция и магния.

При организации планомерных поисков мест скоплений боратов необходимо идти двумя путями. С одной стороны, в их основу должны быть положены палеогеографические схемы изучения судьбы древних морей (особенно пермских и третичных), образования замкнутых озер или лиманов и постепенных смен влажного климата климатом сухим, пустынным.

Палеогеографические схемы подсказывают места поисков солевых отложений, особенно поздних фаз кристаллизации, т. е. богатых калием, бромом, иодом и бором. Однако этих процессов недостаточно для образования крупных месторождений борнокислых солей. Необходимо наличие еще позднейшей геохимической перегруппировки и тектонического воздействия на скопления солей при образовании куполов и миграции бора к периферии и поверхности.

Благодаря наложению этих двух процессов, при поисках бора можно исходить из анализа ореолов его рассеяния, чтобы путем сравнительного анализа содержания бора в осадочных свитах, в источниках и озерах, подойти к выявлению тех точек целого района, с которыми связано максимальное его накопление (см. подробнее стр. 577).

Главнейшая литература

А. Е. Ферсман. Геохимия. 1939, IV, 49.

Наиболее полную сводку мы имеем в сборнике «Большая Эмба». Изд. Акад. Наук СССР, 1937, 369, 601, 860 (со статьями общехимического и геохимического характера).

6. УГЛЕРОД

Поиски различного рода полезных ископаемых, связанных с углеродом, не могут входить в задачу нашего руководства. О поисках углей см. некоторые замечания на стр. 669; о поисках алмаза и графита см. стр. 722; о поисках нефти, углеводородных газов см. стр. 667.

Несколько слов приходится лишь сказать о поисках угольной кислоты, применение которой в промышленности возрастает с каждым годом. Выделения угольной кислоты в основном связаны с остыванием магматических и вулканических эманаций и обычно являются результатом одной из последующих фаз эманационной деятельности. Поэтому наиболее крупные выделения угольной кислоты мы наблюдаем для действующих вулканов — в более отдаленных от очагов эманациях, для уже прекративших свою деятельность — в более поздних, так называемых

углекислых фазах охлаждения, которые обычно следуют после галоидных, сернокислых и сернистых выделений.

Картирование и точный учет всех углекислых струй представляют важную задачу для поисковика, который не должен упускать из вида, что нередко струи или источники только кажутся насыщенными угольной кислотой, тогда как образование пузырьков связано с наличием других газов, особенно воздуха или азота. Поэтому всегда необходимо специальное испытание газов на угольную кислоту или путем химического анализа, или отдельной пробы на горение лучиной (необходимо, однако, предостеречь исследователей, что возможны взрывы, если выделяющиеся газы содержат большое количество углеводородов).

7. АЗОТ

Хотя в настоящее время наибольший интерес с практической точки зрения и представляет азот воздуха, все же необходимо сказать несколько слов о поисках с е л и т р ы, т. е. природных азотнокислых солей калия и натрия. Эти соли в общем бесцветны, легко растворимы, гигроскопичны и потому не характеризуются никакими внешними признаками, которые облегчали бы их поиски. Благодаря легкой растворимости, мы можем ожидать найти скопления этих солей лишь в местах сухого или пустынного климата, особенно в районах высокогорных, где их происхождение может быть связано или с бактериальными процессами или с разрядами атмосферного электричества. При поисках селитры необходим химический анализ и опробование тех соляных корочек или налетов, которые столь характерны для пустынных или полупустынных образований. Нередко такие соли, в виде своеобразных выцветов, наблюдаются в трещинках или в маленьких пещерках, особенно известковых пород.

Особый тип скоплений селитры, имеющий лишь местное значение, связан в Средней Азии и в Китае с местами крупных стойбищ скота, в которых растворимые аммиачные и азотистые соединения явились результатом скоплений органического вещества в течение сотен лет. Такие стойбища связаны с древними культурными поселениями, приуроченными к местам пересечения крупных промышленных или хозяйственных путей. Они нередко выделяются в виде целой серии холмов, содержат часто большое количество глиняных и кирпичных черепков и привлекают к себе внимание не только по своему рельефу, но и по обилию соляных выцветов.

Совершенно особый характер носят поиски н а ш а т ы р я, т. е. хлористых соединений аммиака. С одной стороны, нашатырь в довольно больших количествах (может быть, местного значения) накапливается в продуктах возгонки вулканов. Легкая растворимость, обычная желтизна (благодаря примеси железа), волокнистая структура выделяют его среди других солей выцветов.

Другим типом месторождения нашатыря являются продукты подземных пожаров, о чем см. стр. 621.

9. ФТОР

Исключительное значение фтора в промышленности заставляет обратить самое серьезное внимание на поиски фтористых соединений. К ним с практической точки зрения относятся: флюорит, или плавиковый шпат; апатит (фосфорит) и криолит. Наибольшее значение принадлежит первому;

в то же время он обладает рядом характерных признаков, облегчающих его поиски.

Окраска в пестрые цвета, нередко фиолетовых, розовых или зеленых тонов, своеобразная спайность, средняя твердость, яркое свечение при облучении — все это выделяет в поле плавиковый шпат и облегчает его поиски. Однако надо помнить, что встречаются и такие разности, которые имеют совершенно сплошной характер и не отличимы от плотного известняка; в иных случаях флюорит в виде бесцветной массы образует цемент в осадочных породах и благодаря этому совершенно ускользает даже от опытного глаза минералога.

Поиски плавикового шпата должны вестись по отношению к двум генетическим типам. С одной стороны, необходима проверка на плавиковый шпат осадочных пород, в особенности пермских и каменноугольных отложений, в которых фтор играл большую роль. Но особенно поиски надо вести в районах гранитных батолитов, нередко выносящих громадное количество фтора.

Лишь небольшая часть фтора сохраняется в гранитных пегматитах, и то в более холодных их частях, где соединения фтора накапливаются редко в больших промышленных количествах в геофазах Н, I и К. Практически мы почти не знаем крупных месторождений, связанных с чистыми пегматитовыми процессами. Главные массовые скопления плавикового шпата связаны с пневматолитами, и обычно этот минерал образует отдельные жилы в более холодных, отдаленных от очагов гранитах, но не далее, чем на расстоянии 2—3 км от самого очага. В этих жилах флюорит сопровождается нередко кварцем, кальцитом, баритом и сульфидами свинца и цинка. В иных случаях он просто представляет тело рудных жил и тогда может добываться как отброс при добыче сернистых руд, особенно свинца.

Для жил плавикового шпата характерны частью метасоматические неправильных очертаний образования карманов, жеод и многочисленных ветвистых отщеплений. Иногда в контактных зонах мы имеем как бы сплошное пропитывание целых зон плавиковым шпатом.

Не менее важными являются поиски к р и о л и т а, внешний вид которого очень мало характерен, представляя ряд трудностей для его отыскания. Как показывает само название, это бесцветный минерал, напоминающий лед. Отличить его от некоторых сортов кварца или даже прозрачного чистого адуляра трудно. Необходим очень опытный глаз, чтобы определить в поле криолит вместе с продуктами его изменения, образующими вокруг него характерные кокарды или пленки. Генетически криолит надо искать в контактных, богатых пегматитами зонах щелочных гранитов.

Пространственно криолитовые месторождения всегда связаны с районами, в которых известны нефелиновые сиениты, но генетически криолит никогда с ними самими не стоит в связи, а приурочен к определенным и притом поздним фазам гранитного процесса.

Указанные черты определяют и районы и методы поисков этого полезного ископаемого, при которых необходимо иметь в виду, что криолитовые пегматиты относятся к более холодным частям пегматитового процесса и обычно связаны с ним геофазами G и H, в которых наблюдаются и скопления сульфидов.

Главнейшая литература

10. БЛАГОРОДНЫЕ ГАЗЫ

Трудно дать руководящие указания для поисков благородных газов в природе. Нормальное их получение связано с фракционированием охлажденного до состояния жидкости воздуха. Однако за последние годы накапливается много данных, говорящих за то, что благородные газы распределены в земной коре в других соотношениях, чем в самом воздухе, и что, в частности, в гранитных породах неона во много раз больше, чем в самой атмосфере. Поэтому поиски особенно легких благородных газов должны идти по линии поисков гелия (см. стр. 675), а также путем изучения содержания неона в гранитных областях.

11. НАТРИЙ

Поиски натриевых солей приходится связывать с вопросом о нахождении следующих минералов или их растворов:

- а) хлористый натрий, галит NaCl
- б) сернокислый натрий, тенардит . . Na_2SO_4
- в) мирабилит $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$
- г) карбонат натрия, сода $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$

По отношению к хлористому натрию поисковые работы представляют в нашей стране значительный интерес, ибо, несмотря на имеющиеся грандиозные месторождения, их география довольно неблагоприятна, и восток Сибири лишен пока крупных месторождений хлористого натрия. Для этого минерала мы должны считаться с несколькими типами месторождений:

- 1) скопления твердых солей в осадочных свитах разного возраста;
- 2) глубинные водные растворы, получающиеся в результате выщелачивания хлористого натрия из рассеянного состояния в породах;
- 3) современные отложения хлористого натрия в лиманах и соляных озерах.

Первый тип (каменная соль в осадочных свитах) связан с палеогеографическими судьбами отдельных районов Союза. Образование соляных бассейнов в геологические эпохи, отшнуровывание отдельных лиманов, смена влажного климата сухим или пустынным определяют возможность образования скоплений солей как химических осадков в отмирающих морских или океанических бассейнах.

Следовательно, поиски этого типа месторождений должны прежде всего идти на основе палеогеографического анализа древних свит. Наибольший интерес в отношении хлористого натрия представляют, как мы знаем, в отдельных районах Союза отложения древнего палеозоя (силур и девон), третичных и особенно олигоценовых свит; в этом направлении необходимо изучение фациального характера осадков этих важнейших моментов геологической истории нашей страны.

Второй генетический тип (в рассолах) по существу связан с первым и служит обычно наведением для поисков каких-либо более крупных месторождений твердых солей. Более детальное изучение рассолов как показателей соляных месторождений, несомненно, заслуживает внимания.

Наконец третий тип — современных озер и лиманов — требует исследований связанных с ними физико-химических систем и тех процессов, которые определяют последовательность осаднения отдельных чистых солей. Продуманное соляное хозяйство в наших южных лиманах

и озерах возможно лишь на основе изучения диаграммы равновесия, ибо только в этом случае можно будет отделить более ранние осадки (гипс, доломит) от чистых солей, а последние — от более поздних кристаллизаций (солей магния, кальция и др.).

В общем при изучении и поисках солевых скоплений надо считаться с нормальным разрезом, при котором внизу залегают карбонатные породы, потом доломит, далее гипс и ангидрит, еще выше — ангидрит и каменная соль перемежающимися слоями, за которыми следует чистый осадок хлористого натрия. Если процесс кристаллизации отмирающего морского бассейна идет до конца, то нормально хлористый натрий перекрывается солями кальция и магния, реже сульфатов натрия, перемешанных с глинистыми осадками.

Второй натриевой солью является карбонат натрия — сода. Это характерный хроноксенный минерал, который не сохраняется в геологических осадках и известен нам исключительно в современных отложениях, в условиях теплого сухого климата, где он накапливается обычно в рассолах и лишь в особенных (плохо изученных) условиях встречается в виде твердого осадка.

Поиски содовых озер и природных скоплений соды весьма интересны в нашем Союзе, но и для них мы не имеем характерных признаков, позволяющих предсказать те физико-географические, почвенные и геологические условия, при которых карбонат натрия накапливается в значительном количестве. В этом случае изучение диаграммы равновесия является совершенно необходимым.

Наконец, третья соль натрия, его сернокислая соль, представлена минералами — тенардитом и мирабилитом, являющимися тоже по существу хроноксенами: для них наиболее типичны современные преобразования, и лишь в третичных породах мы иногда встречаемся с этими легко растворимыми в воде минералами.

Условия и время образования сернокислого натрия решаются диаграммой равновесия при определенных условиях температуры. Поэтому изучение тех озер и водоемов, в которых может идти осаждение сернокислого натрия, требует детального изучения кристаллизационных путей этих рассолов. Для третичных отложений возможны отдельные скопления, которые сохраняются нерастворенными лишь при условии сухого климатического режима и отсутствия водоносных горизонтов, что мы имеем практически лишь в Средней Азии. Таким образом, для осмысленных поисков месторождений сернокислого натрия необходимо широкое применение, с одной стороны, палеогеографических и климатических исследований, а с другой — тех физико-химических диаграмм равновесия, которые определяют условия осаждения и накопления этих солей.

Главнейшая литература

А. Е. Ферсман. Геохимия. 1939, IV, 64.

12. МАГНИЙ

Полезные ископаемые, связанные с магнием, настолько разнообразны, что трудно дать какие-либо общие указания для поисков этих соединений. В общем мы имеем три большие области минеральных скоплений, на которых следует остановить внимание:

Магнезиальные породы и минералы, связанные с ультраосновными магмами. Сюда относятся обычно породы, содержащие

оливин и пироксен, а также вторичные минеральные образования, как, например, разновидности змеевика, асбест, магнезит, тальк, тальковый камень и т. д. Обычно мы имеем здесь дело с осевшими глубинными зонами целых зеленокаменных поясов, в которых указанные магнезиальные соединения накапливаются в очень больших количествах и на пространстве многих тысяч и десятков тысяч квадратных километров. Геохимический анализ таких поясов (например, Урала, Северного Кавказа, Восточных Саян) представляет необычайный интерес, и только на фоне его — путем исследования процессов дифференциации и позднейших термальных и гидротермальных изменений — могут быть выявлены внешние признаки и взаимные отношения указанных выше полезных ископаемых. Поиску-разведку необходимо иметь в виду, что главные минералы — магнезит, асбест и змеевик — обычно связаны с зонами автопневматолита в верхних частях ультраосновных массивов, тогда как тальк и тальковый камень приурочены скорее к метаморфическим зонам при изменении основных и ультраосновных пород.

Для всех этих образований в общем характерны темнозеленые, зелено-черные, черные и серо-зеленые тона.

Сочетание на контактах темных ультраосновных пород с гранитами намечает дальнейшие типы минеральных образований, причем нередко гранитные жилы в зеленокаменных породах обогащаются магнием и дают начало новым минеральным образованиям.

Процесс выветривания (как глубинного, так и поверхностного) таких массивов ведет к сильной миграции магния и других элементов, причем в этом случае нередко образуются вторичные скопления магнезита (коллоидального) большого промышленного значения.

Другой тип магнезиальных пород связан с пластовыми осадочными отложениями доломита и магнезита. В одних случаях мы имеем дело с первичными образованиями мелководных бассейнов, и в этих случаях доломитовые осадки обычно мергелисты и не обладают высокими техническими качествами. Зато в случаях вторичной метаморфической переработки карбонатные осадки нередко обогащаются магнием благодаря чему образуются месторождения вторичного характера со скоплениями чистых кристаллических магнезиальных карбонатов.

Ввиду отсутствия характерных внешних признаков для этих пород (за исключением крупной кристаллизации магнезитов), поиски в областях карбонатных образований должны быть связаны с детальным химическим их опробованием, причем наибольший интерес обычно представляют те зоны карбонатных пород, которые приурочены к кристаллическим сланцам и лежат параллельными линзами или зонами вдоль горных хребтов.

Главнейшая литература

- В. Н. Лодочников. Серпентины и серпентиниты. Изд. ЦНИГРИ, 1936, 1—817.
П. М. Татаринов. Курс перудных месторождений, 1934, I.
А. Е. Ферсман. Геохимия. 1939, IV, 68.

13. АЛЮМИНИЙ

Основными полезными ископаемыми, связанными с высоким содержанием алюминия, являются каолин (см. стр. 645), алунит и боксит (а также частично корунд и дистен-кианит).

А. К а о л и н. Кислые гуминовые воды, связанные с буроугольными месторождениями, могут вести к накоплению каолиновых (реже боксито-

вых) веществ и к образованию пластических глин, переслаивающихся нередко со слоями угля.

Под действием кислых источников или струй по периферии охлаждающихся вулканических эруптивов могут также возникать скопления каолина при разрушении гранитов.

Наконец, процесс каолинизации может иметь место и в пустынном климате при условии разложения алюмосиликатов и их гидролиза в псевдо-термальной обстановке.

Как видно, поиски каолина связаны с очень разнообразными генетическими процессами (о чем подробно см. Геохимия, 1939, IV, 77).

Б. А л у н и т. Особый процесс характерен для кислых эффузивов в вулканических местностях и ведет нередко к образованию прежде всего алуниита — весьма интересной комплексной руды алюминия. Такие скопления алуниита известны особенно в кислых риолитовых и трахитовых лавах, иногда в виде весьма крупных скоплений плотных или пестрых алунитовых пород разной чистоты.

Б. О к с и т. Гораздо сложнее и важнее для нас поиски настоящих бокситов, свойства которых весьма разнообразны, а внешние отличия столь непостоянны, что определение бокситов на глаз в общем довольно затруднительно. Однако иногда бокситы обладают замечательной характерной чертой: пизолитовой, бобовой структурой, которая дает возможность для белых и красных «глинистых» скоплений сделать предположение о наличии гидратов глинозема и частично железа. Нахождение такой структуры наводит довольно определенно на мысль о бокситах, но ее отсутствие еще не говорит против. Следующие три типа генетических образований характерны для накопления бокситового вещества:

1. Образования типа «терра росса» при выщелачивании карбонатных пород. Этот процесс связан в целом ряде местностей с разрушением известняков в карстовом процессе и ведет к неправильному, очень неравномерному накоплению обычно сильно железистых остаточных бокситов в виде карманов. Поиски этого типа возможны лишь в теплом, но влажном климате нашего Юга.

2. С ними тесно связан второй тип — тип латеритного покрова, образующегося в условиях определенного климатического режима. По существу этот тип, хорошо известный в субтропических странах, для нас не представляет большого значения, хотя нельзя отрицать, что в некоторые геологические эпохи, особенно в Средней Азии, господствовали аналогичные условия.

3. Наиболее интересным типом накопления боксита является осаждение гидратов глинозема в морях и озерах из растворов или гидрозолей. Эти осадки, подобно осадкам бурого железняка или марганцевых руд, осаждаются на дне морей в совершенно определенных зонах, нередко поэтому связаны со скоплениями ферри- и ферросиликатов и пространственно могут переходить в чистые скопления гидратов или силикатов железа. Глубокий геохимический и палеогеографический анализ морских осадков позволяет совершенно точно предсказать, где в полосе береговых очертаний можно ожидать встретить накопления бокситов. Пространственное распределение осадков алюминия, железа или марганца зависит в первую очередь от кислородного потенциала. При недостатке кислорода восстановительная среда железа и марганца остается в виде двухвалентных ионов, выпадающих лишь при весьма высоких рН. Такие растворы будут осаждать вдоль берегов преимущественно гидраты окиси алюминия и значительно дальше осадки железа и марганца.

Однако, для того чтобы морской бассейн был обогащен алюминием,

нужны специфические условия привноса больших количеств этого металла. Это возможно лишь при двух условиях: при наличии щелочных (содовых) растворов пустыни или при окислении сульфидов серную кислоту и выносе большого количества сернокислых солей алюминия. Таким образом, для промышленных накоплений глинозема в морских осадках необходимо наличие ряда специфических условий, которые прежде всего определяются знанием палеогеографии, стратиграфии и геохимии осадочной свиты. Нет никакого сомнения, что путем углубленного анализа отдельных геологических разрезов можно будет в будущем предсказывать возможность нахождения в них алюминиевых скоплений.

В заключение нашего обзора условий поисков бокситов необходимо еще указать, что, помимо указанных выше трех типов бокситовых образований, мы должны считаться с возможными образованиями боксита при известном климатическом режиме как продукта разрушения богатых алюминием кристаллических пород и, в частности, нефелинсиенитовых (реже основных, но не кислых горных пород). Нахождение этого типа возможно у нас в Союзе, и мы должны с большим вниманием отнестись к тем современным и древним процессам выщелачивания и гипергенного изменения, которые характерны для таких образований, как траппы Восточной Сибири или нефелинсиениты Саян и Средней Азии.

Главнейшая литература

- А. Д. Архангельский. Типы бокситов СССР и их генезис. Труды Конфер. по генезису руд железа, алюминия и марганца. Изд. Акад. Наук СССР, 1937, 365—512.
 П. М. Татаринов. Курс нерудных месторождений. 1934, I, 93—116, 157—175, 512—595.
 А. Е. Ферсман. Нефелин, его месторождения, применение и экономика. Сб. «Хибинские апатиты», Л., 1931, III, 23—44.
 А. Е. Ферсман. Геохимия. 1939, IV, 73.

14. КРЕМНИЙ

При большом разнообразии минералов кремния трудно дать какие-либо общие признаки для его поисков.

Горный хрусталь и дымчатый кварц — см. стр. 725, пенные разновидности кварца — стр. 728, агат — стр. 721, яшма — стр. 737.

Главнейшая литература

- В. И. Вернадский и С. М. Курбатов. Земные силикаты и алюмосиликаты. ОНТИ, 1937, 1—373.
 А. Е. Ферсман. Геохимия. 1939, IV, 88.

15. ФОСФОР

Для фосфора мы имеем два типа минералов, используемых в промышленности: с одной стороны, разнообразные фосфаты, содержащие литий и идущие для получения этого металла, и, с другой, — две разновидности минерала апатита (магматический апатит и осадочный фосфорит).

Что касается литиевых фосфатов, то они характерны исключительно для гранитных пегматитов геофазы G, причем нередко темнозеленые и буро-красные тона, связанные с повышенным содержанием железа и марганца. Поисковыми признаками являются разнообразно окрашенные вторичные образования продуктов разрушения этих фосфатов.

Апатит магматический в основном является ведущим сырьем и, несмотря на наличие у нас в Союзе крупнейших эксплуатируемых месторождений в Хибинах, его поиски заслуживают внимания на всей территории Союза. Основные скопления магматического апатита известны нам в крупных количествах исключительно в связи с щелочными магмами, в конечных пегматитовых геофазах кристаллизации нефелин-сиенитовых пород, богатых окисью железа и потому характеризующихся обилием эгирина, эгирин-авгита, титаномагнетита и нефелина. В больших массивах агапитовых магм необходимо искать всегда скопления апатита, особенно в сильно дифференцированных породах и на их контактах с карбонатными породами. Довольно темные цвета породы, зеленый тон большинства минералов, обилие железистых соединений, — таковы характерные черты этих образований. Гораздо реже два других типа, которым при поисках приходится уделять меньше внимания. Первый связан с апатитовыми прослойками в кристаллических сланцах, вероятно возникшими вторично из каких-то осадочных образований фосфоритов. Такие кварцевые апатитовые прослойки или линзы известны в Китае, и не исключено их нахождение в каких-либо метаморфических свитах Восточной Сибири. В этих случаях характерны светлые тона этих образований, большая мягкость и выщелачиваемость апатита, вследствие чего на поверхностях выветривания такие скопления характеризуются своеобразным ячеистым кварцем.

Столь же малое значение имеет и третий генетический тип, связанный с апатитовыми жилами в породах типа габбро. Эти жилы носят контактные или метасоматический характер, выделяются светложелтыми, зелеными тонами на фоне темных пород и нередко окаймлены темнобурыми каемками листоватого флюорита, иногда с содержанием скаполита и кальцита.

Происхождение таких жил до сих пор является не решенным, хотя не исключена их связь с гранитными массивами и позднейшими выделениями продуктов их дифференциации в габброидные породы. Этот тип нельзя считать исключенным у нас, особенно в Сибири.

Совсем иной характер имеют поиски фосфоритов в осадочных образованиях. Здесь мы имеем дело иногда с осадками прибрежного плато, в которых фосфориты образуют неправильные желваки различного типа, цементируясь или образуя цемент с песчинками кварца или зернами глауконита. Это сравнительно мелководные осадки, которые палеогеографически могут быть выделены на картах, благодаря чему и связанные с ними месторождения могут быть заранее предсказаны.

Однако гораздо интереснее второй тип скоплений фосфоритов, связанных с глубинными зонами в морях синклинального типа. В этом случае фосфориты образуют грандиозные скопления огромной мощности и большой чистоты и, по всей видимости, носят характер типичных химических осадков в определенных термодинамических условиях морского бассейна (частично создаваемых специфическими биохимическими процессами).

Намечаются как бы особые глубинные фауны фосфоритов, и поиски их вдоль западных склонов Урала, в Средней Азии и на востоке Сибири должны быть связаны с детальным геохимическим (физико-химическим) изучением разрезом, особенно палеозоя.

Внешние отличия апатита в крупных месторождениях не очень характерны; определяющими являются твердость (меньшая, чем у кварца и полевого шпата, но большая, чем у мрамора), обычно зеленоватый цвет и иногда игольчатое строение. Для фосфоритов типичным является парагенезис, причем характерно как для прибрежного, так и для синклинального типа

повышенное содержание органического вещества, придающего образованиям или целым породам черный или бурый цвет. Для прибрежных фосфоритов характерна внешняя форма неправильных стяжений, рогулек, реже шаров с радиально-лучистой структурой, для глубоководных — сплошной характер породы, напоминающей роговики или плотные известняки, но тяжелее.

Необходимо еще предостеречь исследователей относительно многочисленных ошибок при анализах фосфоритных пород, так как малоопытные химики принимают обильный осадок от аммиака за гидрат глинозема и неверно относят образцы к бокситам.

Главнейшая литература

- Ю. А. Петрови́ч. К вопросу методики поисков фосфоритов. Минеральное сырье, 1937, № 9, 47—52.
 П. М. Татари́пов. Курс перудных месторождений. 1934, I, 79—92, 296—349.
 А. Е. Ферсма́н. Геохимия. 1939, IV, 87.

16. СЕРА

По отношению к сере вопрос может быть представлен в двух направлениях: может идти речь о поисках или самородной серы или серного колчедана (о последнем см. стр. 730).

Что касается поисков серы, то их следует вести преимущественно в районах сухого климата или в областях восстановительных процессов в гипсовых свитах, причем положительным для поисков серы может считаться парагенезис гипса с нефтью, жидкими и твердыми битумами, а также углеводородными газами. Положительным признаком в гипсоносных породах является совместное нахождение с абсорбционными глинами, трепелом или вулканическим туфом. В самих месторождениях серы к характерным образованиям принадлежат кристаллики целестина и арагонита.

Для серных месторождений весьма характерно окисление серы на поверхности с образованием белоснежных корок гипса и квасцов, а также белых глинистых минералов¹, которые в сухом климате обычно скрывают серное месторождение под покровом мощностью в несколько метров. При сильном окислении серы поисковыми признаками могут служить нахождение в районе глубинных месторождений кислых вод со свободным ионом $[SO_4]^{-2}$ и наличие продуктов воздействия этих ионов на пески и глины с образованием кремневых (опаловых) кор в одних случаях и гипсовых или квасцовых кор — в других.

Главнейшая литература

- П. М. Татари́нов. Курс перудных месторождений. 1934, 350—387.
 А. Е. Ферсма́н. Геохимия. 1939, IV, 97.

17. ХЛОР

Практически поиски хлора связаны с поисками солей натрия, калия, магния, отчасти кальция, а главным образом — с поисками хлористого натрия.

Среди месторождений солей заслуживают внимания купола с их специфической тектоникой, соляные озера и соляные источники. Последние

¹ Типа мыльных камней комплексных образований алюмо-кремнево-сульфатных пород и алунитов.

могут быть вызваны молодыми вулканическими процессами, но чаще всего связаны с выщелачиванием пластов солей. При поисках важно иметь в виду накопление в верхних частях разреза солей брома, иода и бора. В общем в природе соли хлора бесцветны, легко растворимы и сильно мигрируют.

19. КАЛИЙ

Источником калия в промышленности являются галоидные или сульфатные соли калия, а также, в подчиненном количестве, некоторые силикаты, богатые калием, — лейцит, нефелин или полевые шпаты. Последние добываются из гравитных пегматитов с одновременным получением из них цементного сырья. Нефелин и лейцит дают калий при комплексной переработке их на металлический алюминий и на калий, который обычно связан с натрием и получается в виде соды и поташа.

Аналогично этим минералам алунит может быть использован по линии одновременного получения как глинозема, так и солей калия.

Однако основная масса калиевых солей получается из типичных соляных месторождений, причем калий обычно связан с верхними частями солевых разрезов, где он переплетается с солями магния, с одной стороны, брома и иода — с другой.

В общем разрезе калий, таким образом, связан с конечными фазами кристаллизации из водного бассейна, из отмирающих лиманов или высыхающих соляных озер. В общем соли калия бесцветны, легко растворимы и гигроскопичны. Однако для некоторых из них, имеющих большое практическое значение, как, например, карналлит, характерны красные тона кирпичного цвета, указывающие сразу по внешнему виду на наличие солей калия.

С калием связаны соединения рубидия и частично — цезия.

20. КАЛЬЦИЙ

По отношению к этому элементу речь может идти о поисках двух основных полезных ископаемых, а именно: гипса и углекислого кальция. (О первом см. стр. 724, 0 втором в виде чистых разновидностей исландского шпата см. стр. 729.)

Что касается поисков известняков и мраморов, то в этом случае необходим учет тех специфических свойств, которыми они должны обладать для намечаемого производства.

Так, для строительных целей необходимы определенные механические и декоративные свойства; для стеклоделия не опасно содержание кремнезема, но вредны примеси железа и магния; для содового процесса и ряда химических производств необходимы очень чистые известняки. Наконец, для определенных сортов цемента имеются соответственные нормы содержания магния, кремнезема, глинозема и т. д.

21. СКАНДИЙ

Хотя этот элемент по исключительной редкости и своему рассеянию не нашел себе пока сколько-нибудь большого практического применения, тем не менее можно указать, что для извлечения чистого скандия-металла практически может быть использован только один минерал — тортвейтит, изредка встречающийся в гранитных пегматитах геофаз D — E. Внешние свойства этого зеленовато-желтого минерала мало определены, и

требуется привычный глаз для того, чтобы отличить удлиненные кристаллики этого редчайшего минерала среди полевого шпата пегматитовой жилы. Надо его искать в пегматитах Бердянска и Мариуполя.

22. ТИТАН

Особое значение, которое в последние годы приобретает титан в промышленности, заставляет обратить на него самое серьезное внимание, тем более, что поиски этого элемента в общем не легки и требуют большого знания минералов титана и их геохимических свойств. Практически титан извлекается в настоящее время из следующих минералов: рутила, ильменита и титаномagnetита.

Новые открытия в Союзе показывают на возможность использования титана и из перовскита и сфена. Таким образом, намечается пять различных минералов, на которые необходимо обращать внимание при поисках титановых руд.

Рутил приурочен к контактам габбровой магмы, и только в этих условиях нам известны его крупные месторождения. Возможно частичное накопление и в россыпях.

Гораздо важнее скопления ильменита и титаномagnetита, причем нередко мелкие включения ильменита в титаномagnetите не могут быть получены из последнего путем обогащения. Крупная мировая промышленность в значительной степени базируется или на чистых ильменитовых месторождениях или на концентратах, получаемых при обработке титаномagnetита. Эти минералы, по существу, связаны с магмами габброидными, в гораздо меньшей степени щелочными, причем титаномagnetиты нередко образуют большие скопления в контактных зонах габбровых массивов или массивов пироксенитов и лабрадоритов.

Вообще необходимо иметь в виду, что в гранитных магмах мы имеем обычно дело с чистыми или почти чистыми магнетитами, тогда как титановые рудности почти всегда приурочены к магмам основным или щелочным.

Для титаномagnetита и ильменита мы должны считаться с возможностью образования крупных вторичных месторождений в россыпях, особенно при разрушении массивов лабрадоритов и габброидных пород (Вольты).

Что касается сфена, то крупные его месторождения известны только в контактных зонах апатитовых скоплений щелочных пород вместе с апатитом и нефелином. Так же единичны, хотя практически и важны, месторождения ильменорутила, богатого титаном, в контактных сиенитовых фазах нефелинсиенитовых магм.

Наконец, мало обычны месторождения третьего ископаемого — перовскита (кнопита или дизаналита), образующиеся лишь при дифференциации щелочных магм, обычно на контактах с известняками. Во всяком случае выходы агпайтовых магм со специфическими переходами к породам, богатым пироксеном и эгиринном, являются наведением для поисков этих редких титановых руд.

Внешних признаков для титановых соединений мы не знаем, хотя, за исключением сфена, для всех них характерны темные, черные или металлургические тона, напоминающие соединения железа. Обычно необходим химический анализ для установления наличия титана.

Равным образом отсутствуют и характерные внешние черты окисления в гипергенных изменениях указанных пород и минералов. Общее окисление железа обычно скрадывает сложные и мало изученные еще пути миграции титана в поверхностных процессах.

23. ВАНАДИЙ

Поиски на ванадий представляют исключительный интерес и требуют большого внимания и детального знания его минералогии и геохимии.

В глубинных породах мы имеем дело с низшей степенью окисления ванадия, благодаря чему его окись оказывается связанной с соединениями окиси железа, образующими скопления в основных и щелочных магмах. Не образуя нигде очень крупных самостоятельных скоплений, ванадий в количестве нескольких десятых процента входит в состав магнетитов, титаномагнетитов, некоторых пироксенов и эгиринов. Во всех этих случаях отсутствуют какие-либо характерные внешние черты, которые позволили бы без анализа предсказывать повышенное содержание ванадия в указанных минералах.

Второй тип месторождений ванадия связан с осадочными свитами, битумами, асфальтами и песчанистыми породами, содержащими остатки органического вещества. И здесь мы не имеем ясных внешних признаков для суждения о наличии этого элемента, и в целом ряде случаев ванадиевые слюдки в песчаниках или повышенное содержание ванадия в асфальтах пропускаются поисковиками и полевыми исследователями.

Гораздо легче поиски ванадиевых соединений в поверхностных окисленных зонах, где мы встречаемся с более высокой степенью окисления ванадия, дающего начало разнообразным красным, желтым, оравжевым и зеленым минералам различного состава. Ванадий сочетается, с одной стороны, с ураном, с другой — с кальцием, свинцом, медью. Пестрые окраски этих соединений, особо типичные яркожелтые тона урано-ванадатов являются весьма характерными признаками, позволяющими предсказать наличие ванадия в окисленной зоне и сделать предположение о нахождении более крупных первичных зон залежей ванадия.

При всей характерности этих окрасок необходимо предостеречь исследователя от смешения их с простыми желтыми охрами или некоторыми яркожелтыми феррисульфатами, которые вместе с вторичными ванадиевыми соединениями одинаково характерны для сухого или пустынного климата.

24. ХРОМ

Поиски на хром в общем довольно просты, потому что единственной практически используемой его рудой являются хромиты специфического генезиса; для хромита мы знаем исключительно его скопления в меланократовых, темнозеленых и черных породах, преимущественно в продуктах дифференциации дунитовых, реже норитовых массивов.

Тяжелые скопления черного, слабо просвечивающего хромита, с одной стороны, достаточно характерны, чтобы отличить его от магнетита; с другой стороны, они обычно выделяются по тонким яркозеленым намазкам в трещинах и пустотах вторичных по хромиту минералов, и эти образования зеленого, а иногда и красивого фиолетового цвета указывают на хромит при его поисках, тем более что по своему тону они довольно резко отличаются от вторичных соединений меди (где нередки синие тона) и могут быть смешаны лишь с некоторыми минералами, содержащими никель.

Для хромита характерны скопления его в элювии с образованием крупных элювиальных россыпей. Сравнительно реже встречаем мы его в аллювиальных месторождениях.

25. МАРГАНЕЦ

Поиски на марганец имеют особое хозяйственное значение на севере и востоке СССР. Обычно характерным признаком марганцевых руд считается их резко черный, бурый или красновато-черный тон, который отличает их от бурых тонов железных руд. Если известны руды иного цвета, то все же при выветривании или глубинном разрушении и эти марганцевые соединения дают начало пленкам, выцветам, дендритам, корочкам резко черного цвета. Однако не надо забывать, что, кроме этих, несомненно важнейших, марганцевых руд, имеются еще два типа, которым не всегда уда-

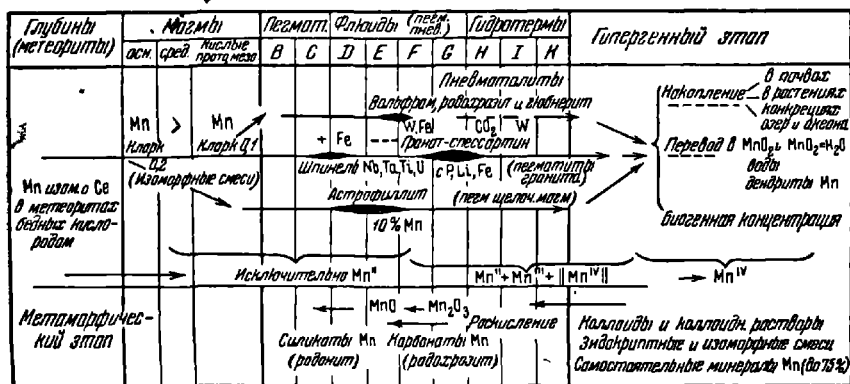


Рис. 60. Геохимическая диаграмма марганца по данным В. И. Вернадского 1930 г.

Один из методов обозначения миграции отдельных химических элементов в разных геологических и геохимических условиях, примененный для большинства элементов; он дает наглядную картину распространения отдельных минералов, соотношения средних кларков, моментов превращений и т. д.

лется должное внимание. Прежде всего сюда относятся месторождения углекислого марганца (родохрозита), по внешнему виду и бесцветности похожего на простой известняк, но отличающегося большей тяжестью, а также почернением в отдельных местах окисления.

Второй возможной рудой на марганец являются марганцевые силикаты, иногда связанные с карбонатами, которые обычно характеризуются розово-красным цветом (красные гранаты, родонит и др.). Однако в этом случае практическое значение имеют не столько сами эти силикаты, сколько продукты их поверхностного или глубинного окисления.

Для черных марганцевых руд имеется еще вторая отличительная черта, сближающая их с рудами алюминия (красные или белые бокситы) и бурными зелено-черными и красными рудами окислов силикатов железа. Это — бобовая оолитовая структура, особенно характерная для морских и прибрежных осадков марганцевых руд.

Поиски марганцевых силикатов должны вестись в районах кристаллических сланцев, где обычно при известных климатических условиях наблюдается окисление марганцевых минералов.

Равным образом силикаты марганца известны в связи с подводными осадками и их метаморфизмом. Таковы, например, марганцевые месторождения Урала и Сибири, переслаивающиеся с роговиками, яшмами и вулканическими туфами¹.

¹ Гораздо реже наблюдаются рудные жилы с родохрозитом или продуктами его окисления.

Наибольшее значение имеют поиски марганцевых окислов, которые или связаны с корой выветривания и накапливаются как продукт выветривания марганца в древнем элювии, или представляют непосредственные осадки морских бассейнов, связанных с определенными глубинами и особым типом известковых песчанистых фаций бассейнов. Такие месторождения протягиваются обычно, особенно среди третичных отложений, целыми поясами, отмечая определенные границы морского бассейна или отдельных заливов и бухт. Оконтурирование и поиски таких месторождений должны вестись на основе палеогеографических карт и изучения фациального изменения этих морских осадков. Интересно отметить, что в ряде случаев такие черные осадки марганцевых окислов перекрываются белыми слоями карбонатов марганца, что связано с уменьшением свободного кислорода в морском бассейне.

Для некоторых районов, особенно при изучении месторождений, связанных с древним или современным элювием, возможно применение манга-нографической съемки путем оконтурирования целых районов и проведения изолиний содержания марганца в осадках.

Главнейшая литература

- В. И. Вернадский. Геохимия марганца в связи с учением о полезных ископаемых. Труды Конференции по генезису руд. Изд. Акад. Наук, СССР, 1937, 229—246.
А. Е. Ферсман. Геохимия. 1939, IV, 128.

26. ЖЕЛЕЗО

Вопрос о поисках железных руд представляет настолько большую и сложную задачу, что вряд ли может быть изложен сколько-нибудь полно в настоящем руководстве.

Типы образования скоплений железа настолько разнообразны и настолько хорошо изучены, что всех работников, занятых изучением и поисками железных руд, надо отослать к имеющейся по этому вопросу литературе. Здесь же мы отметим несколько характерных черт, применительно к железным рудам самых разнообразных типов.

Обычным и наиболее распространенным признаком железных руд является образование при выветривании ржавых и бурых скоплений (птитов, корочек или дендритов). Это — тот цвет ржавчины, который мы хорошо знаем в быту и который меняется в разных климатических условиях от желто-бурых тонов севера до красных и темнокрасных оттенков в условиях тропиков и пустынь. Как известно, с геохимической точки зрения эти соединения характеризуются особым координационным числом 6 кристаллических решеток и являются наиболее устойчивыми в поверхностных частях земной коры, богатых элементами воды. Однако необходимо иметь в виду, что при глубинном выветривании в отсутствии избытка кислорода при определенном pH образуются феррисиликаты яркозеленого или желто-зеленого цвета, которые часто ошибочно принимают за закисные соединения железа, причем обычно не учитывается их огромная роль как богатых железных руд. В этих соединениях мы имеем дело с той же окисью железа, но в особом координационном сочетании. Такие образования представляют местами (гора Магнитная) громадные скопления практически важных руд. Они свойственны глубинному выветриванию древней материковой коры, нередко приурочены к массивам основных или ультраосновных пород и поэтому требуют к себе особого внимания.

По внешним признакам характерной окраской отличаются зелено-бурые или табачные осадки железа в морских бассейнах. Табачные или зеленые силикатные руды железа обычно характеризуются одновременным присутствием закиси и окиси железа, благодаря чему и преобладают те сине-зеленые тона, которые характерны как для больших рудных скоплений этих минералов, так и для рассеянного состояния в глинах, известняках, песчаниках и т. д. Сюда относятся глаукониты, разнообразные железистые хлориты и хлоритоиды, которые в свою очередь при поверхностном выветривании переходят в бурые тона нормальных гидратов окислов железа.

При безводных соединениях как чистой окиси, так и магнетита мы имеем дело с красно-синими, темнокрасными или черными тонами. Это — характерные признаки, с которыми приходится считаться при поисках крупных месторождений железа среди изверженных или метаморфических пород. Отличить по внешним признакам, без специальных химических анализов, магнетит от титановых разностей в общем трудно. От хромита он отличается весьма резко, вследствие просвечиваемости хромистого железняка в тонких осколках. Для красного железняка характерен металлический отблеск или синий отлив некоторых пластинок и кристаллов, причем необходимо иметь в виду, что красным цветом могут обладать и некоторые гидроокиси железа, содержащие мало воды.

Наконец, железные руды могут быть представлены и более светлыми или даже совершенно бесцветными минералами. Таковы сидерит, карбонат железа светложелтого или серого цвета; таковы желтые сульфаты окиси железа (как, например, ярозит и др.).

По и по отношению к этим минералам необходимо считаться с образованиями при выветривании корочек бурого цвета нормальных гидратов.

Что касается генетических условий железных руд, то мы обращаем внимание на необходимость поисков следующих крупнейших генетических типов:

- 1) в контактах спенитов и щелочных гранитов с карбонатными породами, а также с диоритами и гранодиоритами;
- 2) в метаморфических сланцах;
- 3) в морских осадках на небольших глубинах (с характерной бобовой или оолитовой структурой);
- 4) в скоплениях коры выветривания как среди материковых отложений, так и в осадках болот и пресноводных озер.

Главнейшая литература

- А. Е. Ферсман. Геохимические параметры железа. Геохимия. 1937, III, 355—370.
А. Е. Ферсман. Геохимия. 1939, IV, 135.

27. КОБАЛЬТ

Внешние свойства первичных минералов кобальта в общем мало характерны, хотя при резком окислении соединения кобальта, особенно сульфиды, образуют очень характерные по окраске розовые продукты (особенно арсенаты), которые маскируются лишь в случае большого содержания гидратов окиси железа.

По отношению к кобальту мы имеем три типа рудных образований, из которых наиболее важным является первый — в виде сульфидных руд вместе с никелем, частью медью и железом. Кобальт в этом случае является спутником никеля, и мы встречаем его в тех высокотемпературных образованиях, которые характерны для ультраосновных пород и их

контактов. В этих случаях отношение кобальта к никелю обычно колеблется от 1 : 10 до 1 : 40, и кобальт может попутно извлекаться при металлургическом процессе получения никеля и меди.

Гораздо важнее второй подтип сульфидов кобальта, связанный с более низкими температурами холодных терм геофаз I и K, где кобальтовые руды, почти лишенные никеля, идут вместе с серебром, часто с урановой смолкой, с баритом и красными карбонатами магния, марганца, железа и кальция. Этот тип, заслуживающий наибольшего внимания, мы должны искать сравнительно далеко от первичных очагов магм, причем в ряде случаев генетически такие холодные термы связаны с диабазами, порфиритами и гранодиоритами. В иных случаях этот тип мы можем встретить в контактах гранодиоритов и диоритовых, реже гранитных массивов, но в них сульфиды кобальта резко обособлены хронологически, хотя и не всегда пространственно, от силикатов железа и магния или магнетита, образующих контактный скарн.

Меньшее практическое значение имеет второй тип кобальтовых руд, связанный с процессами поверхностного выветривания, ведущими к образованию вторичных скоплений окиси кобальта (Co_2O_3) в виде черных асболонов, лампадитов и других коллоидальных минералов, богатых марганцем, никелем, медью и железом.

Коллоидальная структура, очень темные цвета и специфические черные налеты позволяют в поле заподозрить существование этого типа, но эти образования легко могут быть смешаны с простыми марганцевыми окислами. Искать этот тип необходимо преимущественно в областях древней коры выветривания, там, где гипергенная переработка ультраосновных пород ведет к накоплению в самой поверхностной зоне гидратов и коллоидных масс железа и марганца в первую очередь. При этом надо иметь в виду, что кобальт не играет роли в нонтронитовой зоне этих месторождений.

Наконец, последний тип, хотя и очень редкий, образует (в Конго) весьма крупные промышленные месторождения. Он связан с метасоматическим замещением кобальтом карбонатов и приводит к образованию в известковых осадках (в форме линз или неправильных карманов) карбонатов кобальта, марганца и кальция.

Красивые розовые и фиолетовые тона этих соединений сразу выделяют этот тип месторождений.

Главнейшая литература

А. Е. Ферсман. Геохимия кобальта. Изв. Акад. Наук СССР, сер. геол., 1939, вып. 3.

28. НИКЕЛЬ

Для никеля мы имеем два резко характерных типа месторождений. Главным промышленным типом являются месторождения сульфидов никеля вместе с сульфидными железами и меди (пирротин и халькопирит), по преимуществу в ультраосновных породах — перидотитах, норитах, пироксенитах и реже в габбро.

Наведением на поиски служат рассеянные блестки сульфидов в указанных темных, серо-зеленых или буро-зеленых породах, нередко сопровождающиеся при выветривании яркими яблочно-зелеными налетами продуктов окисления. В этих ультраосновных массивах поиски никелевых руд должны идти в контактных зонах, в глубинных, так называемых донных залежах и в жильных или трубчатых выделениях позднейшего времени. Для жпл в этом случае характерны резкие тектонические контуры и ясно выра-

женные зальбанды. Для штоков, как раз наоборот, характерна связь с рассеянными сульфидами в боковых породах.

Иной характер носит второй тип никелевых месторождений, связанный с корой выветривания в змеевиках и других ультраосновных породах. Скопления зеленых, реже бурых вторичных силикатов приурочены здесь к более глубоким горизонтам, лежащим под буро-красной корой гидратов железа, где они тесно переплетаются с нонтронитами и некоторыми вторичными хлоритами.

Обычно выше них лежат горизонты, обогащенные кобальтом, ниже — белоснежные скопления магнезитов плотного типа.

29. МЕДЬ

Поиски медных соединений облегчаются теми типичными синими и зелеными тонами вторичных соединений, которые обычно сопутствуют на поверхности любому месторождению медных руд. При этом необходима, правда, некоторая осторожность в определении происхождения зеленого цвета, так как никель и некоторые феррисиликаты (саладонит) дают сходные зеленые тона, однако более яблочного и желтого оттенка.

С другой стороны, золотистые скопления простого железного колчедана (пирита) постоянно ошибочно принимают за медный колчедан; в этом случае вопрос легко решается пробой на твердость.

Геохимия меди в общем изучена очень плохо, а парагенетические типы медных месторождений весьма разнообразны, так что дать в краткой схеме сколько-нибудь точные практические советы для лиц, занятых поисками медных месторождений, невозможно. Можно лишь указать на следующие типы генезиса малых скоплений, на которые приходится обращать особое внимание:

1) в ультраосновных породах вместе с пирротинными соединениями никеля;
2) в пустотах мелафиров основных эффузивов совместно с цеолитами;
3) в выделениях халькопирита из дериватов гранодиоритовой магмы и особенно связанных с ними альбитофиров;

4) в рудных жилах, связанных с кислыми гранитами, а геохимически — частью с золотом и вольфрамом, частью с бором и цинком; характерные геофазы процесса G и H;

5) контактный тип гранодиоритовых магм обычно во вторую фазу контактных процессов после накопления скарна из граната, пироксена и магнетита; медь обычно накапливается в геофазы G и H;

6) в многочисленных и своеобразных осадочных скоплениях меди в песчаниках, сланцах, песках, битуминозных остатках. Геохимически этот тип изучен плохо. Обычна, но не обязательна генетическая связь с биохимическими реакциями.

К сказанному об этих шести основных типах мы должны добавить, что четвертый тип нередко переходит в шестой и само месторождение территориально оказывается связанным с осадочной свитой, хотя по существу оно и является телемагматическим.

За последние годы наметилось большое значение совершенно особого типа медных руд, связанных с кислыми выделениями порфиров и образованием «вторичных кварцитов».

30. ЦИНК

Поиски цинка представляют столь же важную, как и трудную задачу, так как для этого металла неизвестны такие характерные и красочные реакции, которые легко позволили бы определить нахождение цинка в поле.

Однако генетически рудные месторождения цинка сравнительно просты. Если оставить без внимания особый контактный тип цинковых руд, связанных с марганцем сложным переплетом разных генетических процессов (тип Франклина), то мы в сущности практически имеем дело лишь с одним основным типом накопления цинка в рудных жилах цинко-свинцовой формации, в которой цинк, как правило, выделяется и вместе с ним и глубже свинца, но во всяком случае выше мышьяковых руд с золотом и оловянных комплексов, сопровождаясь свинцом, нередко с высоким содержанием серебра. Типичные рудные жилы характеризуются в более глубоких частях кварцем, в более высоких — карбонатами, еще выше — баритом, нередко обогащаются с глубиной цинком, теряя свой свинец и серебро; в иных случаях параллельно с этим идет и некоторое увеличение содержания олова.

Таким образом осуществляется переход к более высокотемпературному типу медно-цинковых месторождений, представленных медистыми колчеданами с высоким содержанием сфалерита и играющих значительную, хотя и меньшую роль, чем свинцово-цинковые месторождения.

Сильный блеск цинковой обманки, большой диапазон ее тонов — от металлически черных до яркокрасных и блестящих — являются характерными признаками основной цинковой руды — сфалерита. Однако, наравне с этими первичными цинковыми рудами, нам приходится считаться с их вторичными изменениями в гипергенной обстановке, как под влиянием чисто поверхностных процессов, так и при метасоматическом замещении осадочных пород идущими из глубин цинковыми растворами. В результате одного из этих двух процессов образуются невзрачные, обычно сильно обохренные корки или сплошные массы смитсонита, которые нередко неотличимы от таких же невзрачных масс карбоната и силикатов свинца. Все эти образования, смешанные с бурым железняком, нередко по ошибке выбрасываются в отвал. Между тем они представляют очень ценные руды на цинк и свинец. Необходимо при наличии таких образований подвергать их соответственному химическому анализу.

При поисках цинковых руд надо учитывать, что цинковые руды являются вместе с тем носителями более редких металлов: кадмия, индия, галлия и германия. При этом кадмий образует нередко типичные яркожелтые налеты гринокита, черные цинковые обманки более богаты индием, светлые чаще содержат несколько повышенный процент германия.

31. ГАЛЛИЙ

Галлий принадлежит к самым редким элементам земной коры и не образует собственных минералов; поэтому поиски галлия должны идти одновременно с геохимическим изучением тех элементов, которые он в природе сопровождает. Наибольшее значение принадлежит к ним обманкам, богатым железом.

Второй тип генезиса связан с замещением галлием алюминия, что относится к некоторым бокситам и частично к нефелину.

Поиски галлия требуют постоянной химической и спектроскопической работы и выяснения специальных галлиевых провинций (таковой, например, является Алтай), причем для каждой провинции устанавливается вероятность тех комплексов, которые могли привести к его накоплению.

Главнейшая литература

А. Е. Ферсман. Геохимия. 1939, IV, 159.

32. ГЕРМАНИЙ

Подобно галлию германий не образует собственных минералов. Его наибольшие скопления наблюдаются в поздних сульфидных геофазах I и K, преимущественно в сильно телескопированных месторождениях более холодных гидротерм (в светлых сфалеритах).

Поиски должны идти наравне с изучением распространения оловянных сульфосолей, блеклых руд, сульфидов серебра.

Однако сейчас намечается еще второй, более интересный тип концентрации германия, а именно: в золеуглей как каменных, так и бурых, в которых содержание германия может доходить до 0,1%. Ввиду особой летучести германий может концентрироваться в некоторых продуктах технической переработки угля, чем намечаются интересные новые пути для его улавливания.

Такой же путь намечается и по отношению к некоторым продуктам цинкового производства, где известно накопление германия в медно-кадмиевых казах.

33. МЫШЬЯК

Практически главное количество мышьяка добывается попутно с разными сульфидными рудами, в массе которых рассеяны его соединения. Тем не менее не лишены значения и месторождения чистых мышьяковых соединений, относящиеся в основном к трем типам геохимических образований. В дериватах кислых пород мы встречаемся со скоплениями мышьяка в арсенопирите, в рудных кварцевых жилах геофазы G с золотом, шеелитом и пиритом. Здесь арсенопирит образует довольно крупные скопления, выделяющиеся по своему серебристому цвету, и нередко извлекается попутно с добычей золота.

Несколько иной тип мышьяковых соединений связан с более поздними жильными рудными процессами в геофазах I — K, где мышьяк образует сульфомышьяковые соединения со свинцом, кобальтом и никелем. Этот тип приурочен к породам разного характера — не только кислым, но и средним. Для него типично телескопирование, и обычно месторождения практического значения связаны с лежащими неглубоко магматическими очагами.

Отсюда естественен переход к третьему типу — настоящих телемагматических выделений в вулканических местностях, где мышьяк в виде аурипигмента и реальгара накапливается в термах и эманациях вулканических процессов. В последнем случае яркожелтые и красные окраски характеризуют отложения указанных минералов, обычно связанных с образованиями каолинита, флюорита и кальцитов.

Главнейшая литература

А. Е. Ферсман. Геохимия. 1939, IV, 162.

34. СЕЛЕН

Селен не образует характерных собственных соединений, которые могли бы служить типичными рудами на этот элемент. Обычно добыча его производится или из пыли или из шламов, где он накапливается после электролитической и металлургической переработки различных сульфидов, содержащих селен в рассеянном состоянии. В сущности мы не знаем никаких специфических признаков, которые позволили бы заранее пред-

сказать повышенное содержание селена в том или ином сульфидном комплексе. Нам известны, однако, эмпирические наблюдения, что наиболее богатые селеном сульфиды полиметаллического недифференцированного типа как раз богаты серебром, золотом, мышьяком и сурьмой и относятся примерно к геофазе I рудного процесса. Отсюда делается понятным, что селен нередко связан с теллуrom, хотя его соединения в общем несколько более высокотермальные, чем соединения последнего. Последовательность отложения — сера, селен, теллур — отвечает геоэнергетическим свойствам этих трех элементов. При отсутствии внешних характерных черт практически вопрос о содержании селена в рудах решается анализом, причем не следует упускать из вида, что методы определения селена довольно сложны и для некоторых природных комбинаций требуют большой сноровки от аналитика.

Помимо указанных первичных соединений, можно говорить о селене в шляпках окисления в некоторых натроярзитах яркожелтого цвета, в которых иногда можно встретить повышенное его содержание; однако практическое значение таких месторождений сомнительно.

35. БРОМ

Бром, весьма редкий галогид, по своим свойствам располагается между хлором и иодом, химически примыкая ближе к первому, геохимически — ко второму. Поскольку соли брома обычно бесцветны (или слегка сероваты), легко растворимы и не характеризуются какими-либо особенными внешними чертами, поиски брома должны вестись лишь аналитическим путем, путем детального химического, физико-химического и геохимического исследования тех комплексов, в которых ожидаются скопления солей брома.

Оставляя в стороне не имеющие практического значения бромистые соединения в рудных шляпках выветривания, необходимо при поисках брома все внимание обратить на два генетических типа: на остаточные шлоки и их осадки в древних отмирающих соляных бассейнах и на нефтяные сопочные воды. В первом случае соли брома, нередко даже в большей степени, чем соли иода, накапливаются в последующих стадиях кристаллизации вместе с солями калия и магния. Отсюда — огромные скопления солей брома в верхних частях соленосных толщ.

Второй тип генезиса соединений брома в связи с нефтяными и сопочными водами, нередко обогащенными солями калия и часто лишенными серноокислого иона, должен привлекать к себе наше внимание в районах нефтяных месторождений. Здесь необходимы анализы на содержание брома в водах нефтяных скважин и грязевых вулканов.

При поисках мест концентрации соединений брома можно идти путем оконтуривания соляных районов и проведения изолиний с одинаковым содержанием брома в источниках и пластовых водах.

Главнейшая литература

- П. М. Татарипов. Курс нерудных месторождений. 1934, II, 489—511.
А. Е. Ферсман. Геохимия. 1939, IV, 166.

37. РУБИДИЙ

Поиски рубидия, так же как и брома, могут вестись только аналитическим путем, причем, однако, лучшим методом для первоначального выявления содержания рубидия является метод спектроскопический, позво-

ляющий даже грубо количественно судить о содержании рубидия в данном соединении. Соли рубидия, как и следовало ожидать, должны быть приурочены к солям калия и цезия и по ничтожной величине эка и значительному размеру своих ионов должны обладать особой подвижностью и легкой способностью к миграции. Отсюда основные черты геохимии рубидия, скопляющегося в крайних точках следующих двух типичных остаточных процессов.

Прежде всего рубидий концентрируется в последних геофазах I—II гранитных пегматитов, частично в постпегматитовых термах в гранитных районах, на что до сих пор не обращалось особого внимания. Носителями повышенного содержания рубидия являются, в общем, два минерала с резкими характерными внешними признаками: лепидолит розово-фиолетового цвета и амазонит сине-зеленых тонов.

Если первый характерен вообще для литиевых пегматитов, приуроченных нередко к боковым породам, то второй связан с промежуточными геофазами обычно щелочных гранитов (иногда сопровождающих районы нефелин-сиенитовых массивов).

Впрочем, до сих пор извлечение рубидия из силикатов практически разрешено лишь для лепидолита, в связи с возможностью одновременного получения из него, помимо рубидия, солей лития и цезия.

Второй тип месторождений связан, как и у брома, с остаточными целлоками в соляных бассейнах и поэтому сопровождается обычно верхней частью соляных месторождений, где вместе с солями калия и магния накапливаются, с одной стороны, соли брома и иода, с другой — рубидия и частично цезия. Это — главный источник для извлечения рубидия.

38. СТРОНЦИЙ

При поисках соединений стронция практическое значение имеют лишь два минерала: *ц е л е с т и н* и гораздо более редкий, но и более ценный *с т р о н ц и а н и т*. Из-за нередко волокнистого строения стронцианита отличить его в поле от волокнистых разновидностей карбонатов кальция или бария очень трудно. Зато для целестина обычно характерны приятные нежноголубые цвета, служащие довольно определенным признаком, отличающим его от барита, в общем очень сходного с целестином по своим внешним свойствам, хотя известны месторождения целестина почти бесцветного или слабожелтоватого.

Генетически для целестина важна связь с определенным типом осадочных пород, именно с мергелистым известняком или с доломитовыми породами, приуроченными палеогеографически к отложениям мелководных отмирающих морских бассейнов. Обычно такие осадки переслаиваются с гипсами или даже хлористым натрием; нередок парагенезис целестина с гипсом, халцедоном, жидкими и твердыми битумами и самородной серой. Целестин в таких районах связан с вторичными накоплениями в процессе диагенеза и определяет особые палеогеографические провинции и зоны. Равным образом возможны и обратные выводы: по палеогеографическим картам на основании знания фациальных особенностей свит перми, триаса, верхнего и нижнего мела и нижнетретичных отложений можно наметить те районы, в которых должен быть встречен вторичный целестин.

Гораздо меньшее значение приходится приписывать гидротермальным осадкам стронциевых соединений, связанных с метасоматозом карбонатных пород (частично в рудных процессах со свинцом).

39. ИТТРИЙ

Геохимически иттрий тесно связан с другими редкими землями, с которыми он обычно встречается вместе (см. стр. 711). Однако в ряде случаев мы знаем некоторые специфические минералы, характеризующиеся специальным преобладанием иттриевых окислов над другими типами редких земель. Эти минералы неизменно генетически связаны или с типичными гранитными пегматитами или с пегматитовыми разновидностями гранитных пород. В этом случае иттрий содержится в редких урано-титано-циобатах или фосфатах и может из них извлекаться попутно с другими редкими элементами.

Характерные черты иттриевых пегматитов: образование в очень ранние геофазы С—D, обилие окиси железа, нередко придающей пегматитам красный тон, и накопление черных редкоземельных минералов, иногда с буро-желтыми каемками на поверхности. Часто повышенная активность.

Эти минералы редко накапливаются в россыпях, а потому практическое значение имеют лишь их коренные месторождения.

Однако гораздо интереснее другое соединение иттрия, именно ксенотим, его фосфат, который частью кристаллизуется в жилах гранитных пегматитов геофаз D—E, частью же иногда рассеян, подобно монациту, в последующих фазах кристаллизации самих гранитов. При разрушении этих пород вместе с монацитом, а иногда и самостоятельно, ксенотим накапливается в больших количествах, и в целом ряде местностей известны россыпи с повышенным содержанием этого минерала. Характерные внешние контуры его под микроскопом, желтовато-серый цвет, слабая ториевая активность—нередко позволяют легко выделить этот минерал среди других минералов шлихов. Обследованию шлихов (особенно сибирских) на ксенотим следует уделить серьезное внимание.

40. ЦИРКОНИЙ

При поисках циркониевых соединений и местных концентраций циркония, очень нужных нашей промышленности, практически речь может идти о трех минералах; бадделеите, эвдиалите и цирконе.

Поиски первого минерала очень трудны, ввиду своеобразных, мало четких его свойств. Мы знаем бадделеит в виде мелких черных кристалликов значительного удельного веса, накапливающихся в россыпях щелочных гранитов вместе с цирконом, ксенотимом и оловянным камнем. Отличить этот тип по внешнему виду необыкновенно затруднительно, и для этого требуется опытный глаз минералога. Но есть еще и более трудно отличимые разновидности бадделеита, так называемые цирконфавасы, которые характеризуются столь малотипичными признаками коллоидальных сплошных масс, что их находка и определение могут быть сделаны лишь на основе специфически поставленных поисков. Эти «фавасы» практически мы можем искать лишь в элювиальных или аллювиальных россыпях щелочных нефелиновых сиенитовых массивов, и притом не везде, а только в таких, которые сами по себе богаты цирконием и в которые гидротермальные процессы вынесли этот элемент в результате разрушения других более ранних циркониевых соединений.

Второй минерал, частично используемый промышленностью,— это эвдиалит. Его яркорозовые, фиолетовые или буро-красные тона выделяются как важный поисковый признак среди серых или зеленых выделений обычных нефелин-сиенитовых пород.

Эвдиалит мы должны искать в пегматитах агпаитовых магм, причем местами повышенной концентрации его являются или жильные выделения с полевым шпатом, или скопления зеленых пород, богатых эгирином и содержащих эвдиалит как породообразующий минерал.

Однако самым интересным и важным полезным ископаемым для циркония является минерал *ц и р к о н*. Нам известны такие крупные первичные месторождения, из которых он мог бы добываться с промышленной выгодой. Для циркона гораздо важнее россыпи разного типа или аллювиальные осадки, или, в особенности, элювий, местами переходящий в рассычатую древесу горной породы (доступную для кайлы или лопаты).

В этих трех случаях циркон иногда накапливается вместе с магнетитом, титаномагнетитом и монацитом в районах как гравитных пород, так и нефелинсиенитовых.

Наиболее типичными породами накопления первичного циркона являются сиениты промежуточного типа или пefелиновые сиениты, бедные пefелином или даже лишенные его.

Скопления циркона в элювиальных и аллювиальных россыпях грандиозны. Он может извлекаться попутно с золотом, оловянным камнем и другими более редкими минералами.

Типоморфные свойства циркона весьма характерны и позволяют по форме определить генетические условия: повышенный pH ведет к укорочению кристаллов по вертикальной оси.

41. НИОБИЙ И (73) ТАНТАЛ

Поиски этих двух элементов представляют значительный интерес и заслуживают особого внимания. По своим внешним признакам природные их соединения представлены в большинстве случаев черными, смоляного вида минералами, изредка с буровато-красной наружной каймой, нередко с полуметаллическим блеском. Благодаря постоянной связи с урановыми соединениями ниобо-танталаты характеризуются обычно лучистой структурой окружающих минералов, столь характерной для радиоактивных соединений пегматитов, и допускают применение радиоактивных методов при поисках, хотя содержания урана и тория в них в общем необязательно и в иных случаях мы имеем месторождения ниобо-танталовых минералов, лишенных радиоактивных примесей (например, колумбиты и танталаты).

По существу поиски соединений ниобия и тантала должны вестись в районах или гранитных или нефелинсиенитовых пегматитов, в которых они выделяются прежде всего своим черным цветом главного минерала — колумбита.

В большинстве случаев они выкристаллизовываются весьма рано (в геофазы В—С) вместе с магнетитом и урано-ниобатами, причем пегматиты, богатые ниобием и танталом, обычно характеризуются красным цветом или вообще повышенным содержанием железа (магнетит, биотит). Эти минералы обычно мы должны искать ближе к зальбандам, особенно в глубинных пегматитах древних щитов или герцинских цепей.

Однако, в тех же гранитных пегматитах наблюдается еще второй момент кристаллизации ниобо-танталатов. Это начало геофаз F и G, тесно связанных с началом альбитового замещения, причем в этом случае обычно (хотя и не всегда) ниобий преобладает над танталом. Этим пегматитам сопутствуют темный оловянный камень, содержащий ниобий, изредка вольфрамит, нередко литиевые соединения.

Что касается второго типа ниобиевых минералов, связанных с нефелин-сиенитовыми магмами, то в этом случае генезис ниобо-танталовых руд гораздо более разнообразен и сложен и далеко еще не решается однозначно.

С одной стороны, мы встречаем ниобо-танталаты в виде лопарита в качестве весьма ранних выделений, одновременно с другими титановыми минералами, в нефелиновых породах, богатых железом; с другой стороны, известны накопления титанатов с ниобием типа кнопита или дизаналита, связанные с контактами нефелиновых пород с известняком, причем кубические минералы этих титановых соединений нередко накапливаются в самих контактных известняках.

Из этих двух типов первичного образования ниобо-танталовых соединений они легко попадают в россыпи, где, однако, в общем подвергаются довольно быстро механическому разрушению и гидратации. Это особенно характерно для сложных ниобо-танталатов, богатых ураном. Однако в элювиальных россыпях и в верхах речного аллювия колумбиты встречаются иногда в значительных вторичных скоплениях; в этом случае обычна их связь с касситеритом, реже с вольфрамитом.

42. МОЛИБДЕН

Поиски молибденовых руд в основном должны вестись на два молибденовых минерала: молибденит (в листочках с металлическим блеском) и вульфенит — молибденовокислую соль свинца. Последний мы встречаем в поверхностных продуктах окисления рудных месторождений; вместе с другими вторичными соединениями свинца, меди и железа он образует в железной шляпе рудных месторождений скопления молибдатов с хроматами и сульфатами. Несмотря на то, что вульфенит характеризуется иногда довольно специфическими и резкими цветами окраски, поиски его представляют в общем значительные затруднения. Только настоящий химический анализ и геохимическое оконтуривание таких месторождений могут привести к отысканию крупных скоплений вульфенита и дать начало промышленным запасам.

Больше 90 % молибдена получается из молибденового блеска, и поиски этого минерала составляют основную задачу геохимика. Прежде всего нужно обратить внимание на характерный внешний облик. Мягкие пластины свинцового цвета легко, однако, смешать с пластинками графита, и поисковик должен с особой осторожностью относиться к блестящим пластинчатым минералам и всегда проверять химически свои находки. Помимо чистого графита, весьма сходны с молибденитом некоторые мусковиты с графитовыми прослойками, по своему внешнему облику настолько напоминающие молибденит, что нередко их ошибочно принимали за богатую молибденом руду.

В основном молибденит связан с гранитной магмой, и хотя нам известны некоторые отдельные месторождения молибденовых руд в связи с нефелиновыми сиенитами, но такие находки случайны и не давали крупных месторождений. Молибденит преимущественно связан с кислыми гранитами и их кварцевыми дифференциатами. В меньшей степени молибденит сохраняется в самих гранитных пегматитах. Он уходит с кремнеземом в кварцевые жилы и частично накапливается в контактных скарпах с пеелитом и сульфидами.

Нам известны также рассеянные месторождения молибдена в порфировых медных рудах, причем в этом случае он может быть обнаружен лишь путем анализа.

В кислых кварцевых дериватах молибденит осаждается в двух геофазах: главным образом С — D, частично и в меньшей степени (преимущественно в скарнах) в геофазах G—H.

Благодаря своей мягкости и способности к окислению молибденит никогда не встречается во вторичных скоплениях, отсутствует в шлихах, в поверхностных выходах нередко заменяется продуктами окисления в виде желто-зеленых налетов или образует пластинчатые пустотки, очень характерные по своей форме и нередко наводящие мысль на поиски коренных молибденовых руд.

Во всяком случае поиски молибденита должны быть связаны непосредственно с районами гранитных и гранодиоритовых интрузий, с учетом, что месторождения его никогда не встречаются дальше 500 или 1000 м от гранитного очага. Обилие кварца, особенно серо-белого, является характерным при поисках молибденовых руд. Геофизические методы разведки возможны, но до сих пор не дали сколько-нибудь серьезных результатов.

В скарновых месторождениях мы нередко имеем дело с большим количеством рассеянного молибденита, причем концентрация его создается лишь при особо благоприятных условиях. Однако для месторождений скарнового типа благоприятны совместное нахождение с шеелитом и возможность одновременной добычи этих двух полезных ископаемых.

Заканчивая на этом обзор основных руководящих идей для поисков молибденовых руд, считаем необходимым обратить внимание на то, что с молибденом, особенно в наиболее высоких температурных геофазах, связано повышенное содержание рения и частично мазурия. Поиски практических источников этих двух металлов должны быть тесно связаны с опробованием молибденовых рассеянных руд всех высокотемпературных месторождений.

Главнейшая литература

А. Е. Ферсман. Геохимия. 1939, IV, 180.

47. СЕРЕБРО

Вся геохимическая история серебра связана с специфическими чертами строения его атомов, определяющих не только его миграцию, но и типы окраски его химических соединений. Как характерный металл сильной поляризации ионов, серебро в промышленных количествах встречается лишь в тех летучих образованиях, которые превращаются в так называемые рудные жилы, где серебро, как одновалентный металл, выпадает довольно поздно в ходе геохимического процесса охлаждения. Значительная часть серебра добывается попутно с золотом, с которым оно образует соответственные сплавы. Этот тип собственно характерен для низкотемпературного золота геофаз I — K и характеризуется специфическим светлосеребристым тоном самородного минерала, в котором привычный глаз по внешнему виду может довольно точно определить процент примеси серебра к золоту.

Второй тип, собственно серебряных месторождений, связан с определенными геохимическими процессами геофазы I; в них серебро образует ряд соединений, входя обычно в состав сульфомышьяковых и сульфосурьмянистых руд. Для жил этого типа характерны, вообще говоря, довольно низкие температуры. Рудное тело заполнено железистыми карбонатами или баритом. Наблюдается сильное телескопирование процессов; суль-

фиды носят характер блеклых руд. Для самих серебряных соединений — сульфосолей — характерен красный отлив металлического блеска или красивая красная прозрачность свежего излома. Так как обычно этот тип руд серебра связан с сульфидами кобальта и никеля, то нередко он характеризуется наличием выцветов или светлорозовых, говорящих о кобальте, или яблочно-зеленых, указывающих на никель.

Однако главное количество серебра в промышленности получается не из этих двух типов месторождений, а из жил со свинцовым блеском, в состав которого входит серебро, занимающее при высоких температурах закономерные узлы в решетке галенита.

Обычно содержание серебра в галените колеблется мало и не превышает 0,001 или 0,002 весового процента. По внешнему виду галениты, более богатые серебром, не обладают сколько-нибудь специфическими признаками. В общем этот тип месторождений серебра приходится связывать с рудными свинцово-цинковыми жилами геофаз G—H.

Надо сказать, что, как правило, вторичные образования серебра мало характерны и мало бросаются в глаза поисковикам. Однако при разрушении руд, богатых серебром, нередко в их железной шляпе образуются галлоидные соединения серебра землистого, серого или бурого цвета, очень характерные по своей мягкости, что связано, как известно, с поляризационными свойствами ионов серебра.

48. КАДМИЙ

В последние годы кадмий приобретает все большее и большее значение, в первую очередь для металлического покрытия, и потребляется во многих тысячах тонн. По существу мы знаем для кадмия лишь один тип руды, вызванный геохимической общностью свойств цинка и кадмия: кадмий входит в состав большинства цинковых обманок. Особенно характерен он для сплошных медово-желтых сфалеритов более светлых тонов, причем интересно, что благодаря меньшей энергии решетки сульфид кадмия принадлежит к более поздним выделениям (чем сульфид цинка) и потому при перекристаллизации сфалеритов обычно выделяется в виде особого минерала — гринокита, характерного по своим яркожелтым тонам. Содержание кадмия в цинковой обманке может быть определено лишь химически, хотя обилие выцветов желтого гринокита в трещинках подсказывает наличие жил, богатых кадмием.

При окислении цинковых руд и образовании так называемых галмеев и смитсонитов карбонат кадмия выпадает несколько раньше карбоната цинка, и поэтому галмеем оказывается более богатым кадмием.

Таким образом, в общем поиски кадмиевых руд должны быть связаны с низкотемпературными сфалеритами геофазы H и G и с вторичными галмеем как в железных шляпах, так и в метасоматических месторождениях.

49. ИНДИЙ

Индий принадлежит к тем очень редким металлам, которые не образуют собственных минералов, а рассеяны в сфалеритах, сульфостаннатах и сульфогерманатах. Спектроскопическим методом легко определять содержание индия в этих минералах, причем поиски более богатых индием рудных жил должны вестись путем массового спектроскопического изучения целых районов, обогащенных этим элементом, и выявления статистическим путем мест наибольшей его концентрации.

Вместе с тем сейчас уже определенно подмечено, что наиболее богаты индием сфалериты ранних фаз кристаллизации, т. е. марматиты высоких температур, богатые железом и марганцем. Эти марматиты обычно отвечают геофазе Н, где они связаны с сульфидами олова, свинца и цинка.

Вторичные месторождения индия неизвестны, и полевые методы его поисков отсутствуют. В основе поисков должны лежать геохимические признаки и непосредственное массовое опробование руд.

50. ОЛОВО

Поиски олова представляют совершенно исключительной важности задачу. Поэтому весьма важно выделить следующие основные генетические типы, в которых должны идти поиски олова:

- 1) в пневматолитах и грейзенах гранитных пород,
- 2) в гранитных пегматитах,
- 3) в сульфидах рудных жил в виде касситерита, сульфостаннатов и сульфогерманатов и
- 4) в россыпях (генетически связанных со всеми тремя вышеуказанными типами).

Основными поисковыми минералами являются: оловянный камень — касситерит, а также разновидности последнего; отчасти сульфостаннаты.

При поисках надо иметь в виду нижеследующие основные характерные черты этих минеральных тел:

1. Внешние свойства оловянного камня для неопытного глаза мало характерны, хотя бросается в глаза сильный блеск минерала, его свежесть, при разнообразной окраске от черно-бурого до почти бесцветного. Однако, помимо типичной крупнокристаллической разновидности, оловянный камень существует еще в виде мелкокристаллических образований, которые чаще всего связаны с перекристаллизацией коллоидальных осадков. Этот второй тип иногда образует как бы агатовую структуру и в этом случае по внешности трудно отличим от простых полосатых агатов, хотя повышенный удельный вес образцов сразу заставляет отнести их к соединениям тяжелых металлов.

2. Второй характерной чертой оловянного камня является его недурная сохранность в россыпях, заметные ореолы рассеяния как кристаллической, так и аморфной разновидностей, благодаря повышенной твердости и химической индифферентности соединений. Кристаллы сохраняют обычно свою резкость контуров, причем по их форме можно судить об их происхождении: короткостолбчатые кристаллы говорят о связи с пегматитами; удлиненные — указывают на пневматолиты или гидротермальные геофазы.

3. Сульфостаннаты и очень редкие сульфиды олова не обладают какими-либо особыми характерными признаками. Их легко пропустить при исследовании и смешать в поле с арсенопиритом или сульфосурьмянистыми соединениями. Обычно при разложении сульфостаннаты дают начало иголочкам вторичного касситерита или деревянистому и агатовидному оловянному камню.

4. Особый интерес представляют для добычи оловянного камня скопления касситерита в россыпях. Минеральные ассоциации в плихе дают указание на тип первичного месторождения, что может быть подтверждено еще и анализом форм его кристаллов. Находки кристаллов топаза указывают на связь с пневматолитами, кристаллов тантало-ниобатов — на происхождение в пегматитах. Наконец, обилие вторичных железных руд

и продуктов изменения сульфидов говорит о связи с гидротермальными месторождениями. Большее значение имеют соединения других сопутствующих минералов — шерла, вольфрамит, шеелита и золота.

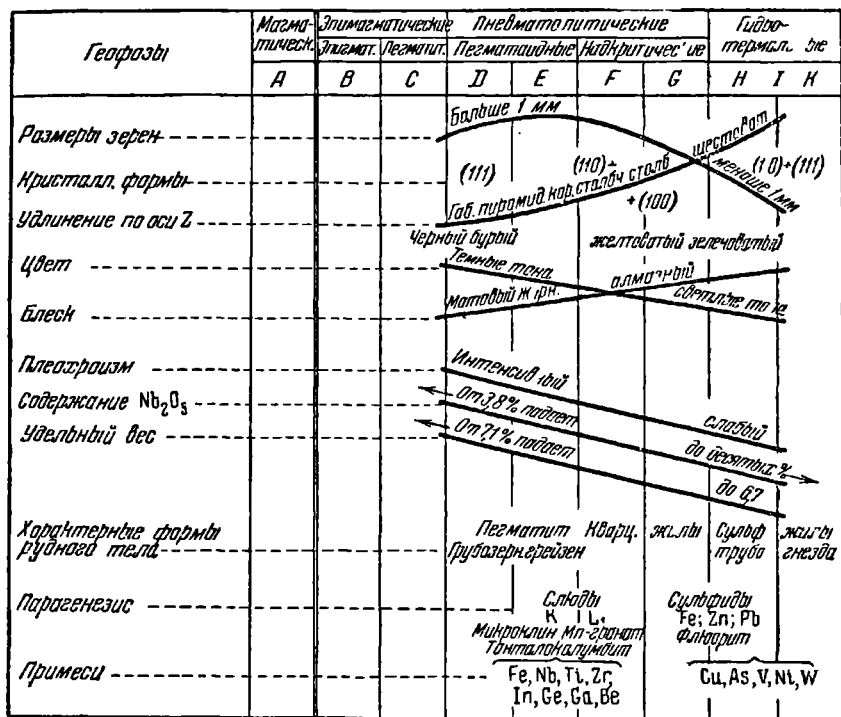


Рис. 61. Типоморфные свойства касситерита.

Составлено по литературным данным. В общем отвечает большинству месторождений, хотя в ряде случаев наблюдаются и отклонения от этой схемы. Наиболее изменчивым и непостоянным является цвет.

5. Физические свойства касситерита отличны у различных типов месторождений касситерита: в пневматолитовых месторождениях зерна касситерита трещиноватые, крупные, сравнительно небольшого удельного веса и светлой окраски; в пегматитах обычны зерна с меньшей трещиноватостью, различных величин, с большим удельным весом и черного цвета; в сульфидных месторождениях зерна касситерита мелкие, хрупкие, темной окраски.

Поэтому наиболее благоприятными типами коренного оруденения для рождения россыпей касситерита являются месторождения пневматолитового и пегматоидного типа.

6. Обогащение касситеритом рыхлых отложений, помимо прочих условий, зависит от способа транспортировки:

а) Перенос, вследствие силы тяжести и временности водных потоков, касситеритсодержащего материала на небольшие расстояния (до 2,5 км) от коренного месторождения, создавшего этот материал, является наиболее благоприятным способом для создания россыпей касситерита. Такого

типа россыли касситерита относятся к делювиально-аллювиальным: они наиболее богаты касситеритом.

б) Перенос касситеритосодержащего рыхлого материала водными потоками на большие расстояния приводит к раздроблению, раскалыванию, истиранию и распылению зерен касситерита. Промышленные скопления россыпей касситерита в аллювиальных отложениях редки.

7. Благодаря сравнительно небольшому удельному весу зерна касситерита обычно распылены во всей массе рыхлых отложений, но максимальное их содержание чаще наблюдается у плотика (Саркисян, 1939).

8. Поисковыми признаками для коренных месторождений, помимо спутников касситерита, являются:

а) сростки касситерита с другими минералами: сростки с кварцем указывают на кварцевые жилы, с полевым шпатом, мусковитом и кварцем — на пегматиты, с топазом и турмалином — на грейзены, с кальцитом — на оловоносные известняки;

б) окраска касситерита: черный касситерит указывает на пегматиты; коричневый, желтый и светлый — на кварцевые и кварцево-полевошпатовые жилы; буроватый, темный — на сульфидные месторождения;

в) идиоморфность и величина зерен касситерита (принимая во внимание дальность переноса): при мелких (а тем более идиоморфных) зернах касситерита в рыхлых отложениях разрушению подвергались сульфидные тела, при более крупных зернах — пегматиты и пневматолитовые месторождения (Саркисян, 1939).

Как видно из сказанного, в общем оловянные руды связаны с кислыми гранитами и принадлежат к двум основным типам месторождений: одни связаны с самим гранитом и его пегматитами, и в них преобладает оловянный камень с вольфрамитом и плавиковым шпатом, другие образуют сульфидно-касситеритовые месторождения, генетически также связанные с гранитами, но, несомненно, более телемагматические.

Геологические партии выработали за последние годы ряд методов поисковой работы. С одной стороны, применяется станнометрический метод, с другой — широко используется спектроскопия, дающая блестящие результаты при хорошо проработанной полевой методике. Подробные данные о применении этих методов см. в приведенной ниже литературе.

Главнейшая литература

- П. М. Озеров. Станнометрическая съемка при поисковых методах. Разв. недр., 1937, № 24.
- С. Г. Саркисян. Петрография рыхлых касситеритосодержащих отложений Забайкалья. Тезисы, 1939. [Работа опубликована в Трудах Ин-та геол. наук СССР, 1941, 56 (петр. сер. № 15). — *Ред.*].
- С. С. Смирнов. Некоторые замечания о сульфидно-касситеритовых месторождениях. Изв. Акад. Наук СССР, 1937, 853—862.
- А. Е. Ферсман. Геохимия. 1939, IV, 198.
- Б. Л. Флеров. Применение оловометрической съемки при поисках коренных месторождений олова. Редкие металлы, 1935, № 1.
- Б. Л. Флеров. Методика поисков коренных месторождений олова. Сов. геол., 1938, № 10, 63—81.

51. СУРЬМА

Хотя значительное количество сурьмы в мировой промышленности извлекается попутно со свинцом и медью из разнообразных руд, поиски чистого сурьмяного сульфида — антимонита — представляют значительный практический интерес.

Геохимия сурьмы в общем довольно проста, так как сурьма, за немногими исключениями, принадлежит к низкотемпературным элементам и ее выпадение в рудных жилах относится исключительно к геофазам I — К. При более высоких температурах образуются сурьмянистые сульфосоли, при более низких — антимонит, а в еще более охлажденных частях жильных образований — мышьяк в виде аурипигмента и реальгара. В наиболее отдаленных, почти холодных частях растворов осаждается ртуть в виде киновари. Таким образом, сернистой сурьмой как бы начинается последний этап в истории охлаждения магматических растворов, и поэтому ее отложение приходится искать на больших расстояниях от первичных магматических очагов (до 2 км).

Для сурьмянистых соединений очень характерен парагенезис антимонита с плавиковым шпатом, халцедоном, белым кристаллическим каолинитом, баритом и киноварью. Отдельные лиловые пятна плавикового шпата обычно характеризуют эти рудные образования.

Такие отдаленные от очагов месторождения связаны обычно с молодыми и варисийскими тектоническими процессами; на поверхности соединения сурьмы испытывают сильное окисление, и вместо больших кристаллов антимонита иногда на значительной глубине наблюдаются скопления желтоватой сурьмяной охры, которые обычно пропускаются поисковиками ввиду их малой специфичности и нехарактерного цвета.

В районах сильного гипергенного выветривания необходимо считаться с этим важным явлением, иногда обесценивающим месторождения на значительные глубины или осложняющим методику его поисков, разведок и особенно обогащения.

52. ТЕЛЛУР

Несмотря на наличие многочисленных теллуристых соединений, этот элемент постоянно пропускается при поисках и даже при химических анализах. Теллуристые соединения по своим внешним свойствам напоминают сульфиды и поэтому не обладают сколько-нибудь характерными внешними признаками. Главная масса теллуристых соединений — золота, серебра, висмута и свинца осаждается позднее селенистых соединений в геофазе К.

Сейчас для нас неясны закономерности районов, обогащенных теллуrom. Чисто эмпирически наблюдается связь теллуристых соединений с сильно телескопированными рудными жилами и высокорасположенными очагами гранитных или чаще гранодиоритовых массивов.

Поиски теллура должны поэтому вестись одновременно с изучением химизма более холодных геофаз рудных процессов, а также путем проверки на рассеянный теллур медистых пиритов и колчеданных залежей, с которыми связаны полиметаллические руды.

53. ПОД

Практически поиски иода надо вести, учитывая накопление его в ряде конечных геохимических процессов. Мы встречаем скопления иода:

- а) в остаточных соляных водах и озерах;
- б) в продуктах пустынного типа;
- в) в продуктах жизнедеятельности морских водорослей и
- г) в нефтяных водах и грязевых вулканах.

В первом случае иод надо искать в наиболее поздних выделениях соляных комплексов, при условии, что эти образования не были подвержены

позднейшим процессам выщелачивания или метаморфизма. Надо, однако, иметь в виду, что в ряде соляных месторождений под отсутствует или уступает по содержанию брома, что связано с легкостью его окисления, образованием легко растворимых иодатов или с летучестью его самого и выносом в атмосферу. Исключительная растворимость солей иода ведет к тому, что они могут накапливаться лишь в районах с сухим пустынным климатом, что и типично для некоторых высокогорных областей.

Очень характерно высокое содержание иода в нефтяных водах, где нередко повышенное содержание иода сопровождается увеличением содержания радия и мезотория. В связи с нефтяными водами находятся и выделения грязевых вулканов.

Таким образом, в основном поиски соединений иода должны вестись в области поверхностных процессов и требуют детального геохимического обследования целого ряда территорий, обычно богатых выделениями газов и нефтью, с одной стороны, и конечными скоплениями солей калия и магния — с другой.

55. ЦЕЗИЙ

Практическое значение цезия увеличивается с каждым годом.

Для цезия, как и для рубидия, характерна исключительная дисперсность, благодаря чему соли этих металлов обладают весьма большой растворимостью, бесцветны, в ряде геохимических условий летучи. Из свойств их атомов и ионов вытекают те руководящие идеи, которые определяют поиски цезия в районах скоплений солей, прежде всего, богатых калием и рубидием.

Три конечных остаточных геохимических системы определяют основные генетические типы цезия:

1. Летучие эманации вулканов калиевых магм. В этом отношении интересны поиски цезиевых соединений в связи с некоторыми магматическими выделениями Камчатки, а также Центрального Казахстана.

2. Остаточные щелока соляных растворов. Несмотря на общее весьма низкое содержание цезия в карналлитах, при некоторых технологических приемах возможно его извлечение из остаточных щелоков калиевых месторождений.

3. Остаточные пегматиты гранитных магм и их дериваты. Несомненно, самым интересным и реальным источником для извлечения цезия являются образования поздних геофаз гранитных процессов, а именно: F—G—H.

В начале гидротермальных геофаз выпадают кристаллические массы силиката цезия — поллуцита, а также происходит внедрение ионов цезия в решетки минералов лития и калия, равно как берилла — воробьевита. Наконец, намечается повышенное содержание цезия в голубовато-зеленом амазонском камне.

Если амазонский камень по своему яркому цвету является прекрасным и легко бросающимся в глаза объектом для поисков, то гораздо сложнее обстоит вопрос с поисками важнейшей руды — поллуцита, который по своим внешним признакам настолько напоминает кварц, что в поле неотлипно даже для глаза опытного минералога. Только на самом месторождении поисковик научается отличать по своеобразной разъеденности этот минерал от белого кварца; но эти признаки не позволяют подметить поллуцит в условиях остаточных гранитных пегматитов, где и кварц носит характер белесовато-просвечивающего вещества, также со следами разъедания растворами геофаз G — H.

Наконец, третий минерал, содержащий цезий, — это лепидолит. В нем содержится повышенный процент лития, рубидия и цезия, что позво-

ляет добывать одновременно эти три полезных вещества. Красно-фиолетовые и розовые тона и листоватая структура лепидолита бросаются очень резко в глаза при исследовании пегматитовых жил. При этом мы не должны забывать, что этот минерал накапливается в образованиях геофаз F — G пегматитового процесса и обычно связан с так называемыми литиевыми пегматитами типа V и VI, которые встречаются вне гранитного очага, нередко на расстоянии до 1 км и характеризуются чисто белыми или розоватыми тонами и некоторой неправильной ветвистостью внешних форм.

56. БАРИЙ

Барий принадлежит вообще к весьма рассеянным элементам земной коры. Геохимически он весьма напоминает стронций, и отличить эти соединения иногда представляется трудным. Практически важными минералами бария являются барит (сернокислый барий) и витерит (углекислый барий). Характерным признаком обоих минералов может служить высокий удельный вес (легко опутимый в руке); однако барит в ряде случаев трудно отличим от довольно тяжелых и сходных по внешнему виду аналогичных соединений стронция. Окраска барита обычно белая, желтоватая или розоватая. Характерный блеск, красная способность к кристаллизации и типичная спайность выделяют его среди других минералов, причем одно характерное свойство позволяет отличить его в поле от сходных соединений: на огне кристаллы барита необычайно шумно и бурно растрескиваются, чем нередко пользуются поисковики, испытывая образцы в костре. Поиски барита как главного соединения бария должны вестись в жерлах сульфидных жил и линз и вообще в областях геофаз I — K. Обычно бариты сопровождаются плавиковым шпатом, кварцем, халцедоном, свинцовым блеском, нередко чешуйками накрита и диккита. Часто их образование связано с метасоматизмом карбонатных пород. В других случаях бариты накапливаются в зонах цементации сульфидных жил и при образовании глубинных частей железных шпал из окисленных сульфидов.

Необходимо иметь в виду, что скопления барита с железными охрами нередко указывают на существование жильных полиметаллических месторождений или служат поисковыми признаками для открытия колчеданных жил.

Барит очень часто пропускается поисковиками, особенно в тех случаях, когда он образует цемент песчаников или конгломератов, а между тем этот генетический тип представляет несомненный практический интерес и иногда носит чисто региональный характер.

57—71. РЕДКИЕ ЗЕМЛИ

О поисках иттрия см. стр. 701.

О поисках скандия см. стр. 689.

О поисках тория см. стр. 718.

Поиски редких земель по их особому значению в промышленности представляют столь же важную, как и интересную задачу. До последних лет единственной промышленной рудой для редких земель и, в частности, для церия, был монацит, который не столько добывался из коренных месторождений, сколько извлекался из морских или речных россыпей, продуктов разрушения древних гранитов или гнейсов, где он нередко

образует в шлихах значительные скопления, особенно вместе с золотом, оловянным камнем, цирконом и магнетитом. Поиски монацита в шлихах должны вестись в районе морских и речных наносов. Этот минерал и до настоящего времени сохранил свое промышленное значение.

Меньшее значение имеет использование церия из ортитов гранитных пегматитов геофазы В.

Но гораздо интереснее и практически важнее те новые источники цериевых руд, которые связаны с одной стороны, с апатитом, с другой — со специфическими ниобо-титанатами — ловчорритом и лопаритом. Во всяком случае цериевая группа редких земель генетически связана с щелочными магмами, и потому во всех областях щелочных нефелинситовых массивов необходимо обращать самое серьезное внимание на поиски специфических редкоземельных минералов. При этом контакты нефелинситовых пород с известняками обычно являются поисковым признаком для этих соединений. В пегматитах гранитных магм мы встречаем накопления другой группы редких земель — иттриевых (см. стр. 701).

72. ГАФНИЙ

Гафний в основном аналогичен цирконию, и поэтому поиски его должны быть связаны с некоторыми видами цирконов в кислых дериватах гранитных пегматитов, особенно геофазы Е.

Интересно отметить, что выпадение в решетке циркона большого количества гафния и тория ведет обычно к нарушению ее цельности, к изогнутым кристаллам, мутному цвету и неправильным очертаниям. Такие разновидности цирконов (альвит, циртолит, малакон и другие) довольно резко бросаются в глаза при поисках, причем искать их надо в более богатых кварцем частях полевошпатовых жил (т. е. в образованиях геофаз Е—F, иногда в начале альбитовой геофазы замещения).

73. ТАНТАЛ

См. подробнее при ниобии, стр. 702.

В общем необходимо иметь в виду, что тантал значительно менее распространен, чем ниобий. В сочетаниях этих элементов в нефелиновых породах ниобий всегда в 10—15 раз превышает тантал. В гранитных пегматитах мы наблюдаем обычно это же соотношение в образованиях более холодных геофаз; однако в типичных пегматитах высокотемпературных геофаз В и С преобладают ниобо-танталаты с более высоким содержанием тантала.

Тип пегматитов, более богатых танталом, мы должны искать в районах древних кристаллических щитов или размытых до корней складчатых горных систем, обычно непосредственно в самих материнских гранитах.

74. ВОЛЬФРАМ

Огромное значение вольфрама в промышленной технике и разрастающееся его применение выдвинули за последние десять лет энергичные поиски руд этого металла. В целом ряде стран специальные проспекторы занимались поисками новых месторождений этого важнейшего металла обороны (в Бирме, в Центральной Африке, Южной Америке, особенно в Аргентине, Мексике и США).

Поиски вольфрама облегчаются тем, что практически в природе мы должны считаться только с двумя минералами, дающими крупные

месторождения: с вольфрамитом, с одной стороны, и шеелитом — с другой. Для первого характерны бурые и темные тона окраски, полуметаллический блеск, наличие прекрасной спайности, сравнительно легкая истираемость при переносе. Для второго — просвечиваемость или прозрачность, светложелтые, реже янтарные тона, своеобразный жирный блеск, которые дают возможность опытному глазу отличить шеелит от очень сходного с ним в некоторых случаях жирного кварца. Если, таким образом, вольфрамит сравнительно легко отличить в поле, то хуже обстоит дело с шеелитом, который обычно пропускался и пропускается и сейчас в месторождениях и нередко вместе с кварцем идет в отвал или вовсе не учитывается при поисках.

Для шеелита нужно, однако, отметить две характерные черты. С одной стороны, шеелит в коренных месторождениях легко подвергается механическому и отчасти химическому разрушению. Поэтому в верхах его коренных месторождений мы вместо кристаллов шеелита нередко наблюдаем в породе пустоты примерно октаэдрического типа, которые позволяют предполагать существование в данной породе шеелитовых месторождений.

Второе необычайно цепное свойство шеелита заключается в его сильной люминесценции при освещении катодными или ультрафиолетовыми лучами. Эта люминесценция настолько характерна, что превратилась в метод практического опознавания шеелита не только в лаборатории, но и в полевой обстановке — в самом рудничном забое, где при освещении ультрафиолетовой лампой шеелитовые пятна начинают резко светиться на фоне других минералов. Применение указанного метода очень ценно и для отыскания шеелита в шлихах и песках. Здесь простое освещение сразу выделяет яркие точки вольфрамового минерала. Вместе с тем для шлихов имеются прекрасные методы красочных реакций, позволяющие очень быстро в фарфоровой чашке получить синие тона на шеелитовых зернах.

В основном и вольфрамит и шеелит связаны с гранитами или гранодиоритовыми магмами. Вольфрамит надо искать в меньшей степени в пегматитах, где его месторождения незначительны, но главным образом в пневматолитах гранитных пород — в том ореоле рудных жил, который непосредственно прилегает к гранитным или к гранодиоритовым массивам. При этом мы должны иметь в виду, что до вольфрамита и, следовательно, ближе к очагам будут наблюдаться скопления руд олова и молибдена, после них и, следовательно, дальше от очага будут располагаться рудные жилы с сульфидами, с золотом и арсенопиритом. Таким образом, вольфрамит занимает в геохимических концентраторах в общем весьма определенное место, и сравнительно редки месторождения этого минерала в гораздо более поздних геофазах (именно I — K), как это иногда отмечается в месторождениях телескопированного типа.

Как сказано выше, вольфрамит довольно легко разрушается и сохраняется лишь в элювиальных россыпях, тогда как в аллювии ореолы его рассеяния в общем не велики.

Сложнее и для поисковика гораздо труднее складывается геохимическая история шеелита.

Уже сами его внешние признаки затрудняют поиски, тем более, что иногда (особенно в скарных породах) он образует настолько мелкие зерна, что они трудно определимы в поле на глаз.

Для шеелита мы имеем три типа месторождений. Сравнительно ограниченное значение имеют пегматиты и рудные золотые жилы с шеелитом, хотя из последних этот минерал может извлекаться одновременно и попутно с рудным золотом.

Большое значение имеют россыпи, в которых шеелит совместно с золотом накапливается довольно хорошо, что позволяет легко добывать его из шлихов в больших количествах.

Однако главное внимание при поисках надо обращать на контактные месторождения гранитов и гранодиоритов, в которых шеелит накапливается в две разные геофазы. В одних случаях он образуется еще в первую фазу скарнового процесса, к которой относится кристаллизация окрашенных силикатов — граната, пироксена и роговых обманок. Повидимому, шеелит этой генерации отвечает примерно геофазе D—E. Большого значения он не имеет. Главная роль принадлежит шеелиту геофаз G—H, который приходится на более отдаленные от контакта участки скарнового процесса и связан с обильными выделениями кварца и замещением известняков кремнистыми растворами. В этом случае шеелит связан с началом светлой неокрашенной зоны контактного скарна и легко выделяется по своему жирному блеску.

78 (76, 77, 44, 45, 46). ПЛАТИНОВЫЕ МЕТАЛЛЫ

Поискам и разведкам платиновых металлов посвящены многочисленные руководства. Однако общий характер этих металлов настолько специфичен, что с геохимической точки зрения позволяет лишь кратко остановиться на поисковых признаках.

Исключительный удельный вес платиновых металлов, своеобразный блеск, отсутствие всяких следов вторичного окисления — таковы характерные черты самородных элементов платиновой группы и их взаимных сплавов.

Однако значительная часть платины получается не из этих вполне очевидных платиновых минералов, а из гораздо более сложных, рассеянных платиновых соединений, которые или в виде самородного металла или в форме редчайших сульфидов и арсенидов распределены в массе высокотемпературных сульфидов, особенно пирротинов.

Поиски платиновых руд должны вестись, таким образом, в двух направлениях. С одной стороны, на платину и в особенности на палладий нужно химическое опробование высокотемпературных сульфидов, связанных с основными или ультраосновными магмами. Особое внимание должно быть обращено на анализ пирротина и пентландита, в меньшей степени — пирита и халькопирита.

Однако главное распространение этих металлов связано с россыпями, в которых открытие этих элементов достигается отмучиванием легких фракций и анализом тяжелого шлиха. Во всяком случае промышленные районы накопления платиновых минералов всегда связаны с областями ультраосновных пород, реже пород типа норита и диабазы. В районах этих петрографических образований необходимо проводить поисковую работу в россыпях как элювиальных, так и аллювиальных.

79. ЗОЛОТО

Для поисков золота существует целый ряд практических руководств, особенно на английском и французском языках; в этих руководствах содержится большое количество чисто практических сведений о том, как вести промывку песков и эксплуатацию первых пробных участков, причем в основном задача связывается с поисками россыпного золота. Но в этих руководствах очень мало уделяется внимания золоту коренному и его поискам, а также совершенно не содержится тех практических вы-

водов, которые дают идеи геохимии и которые должны служить наведениями для поисков золотых месторождений.

Необходимо учитывать, что в промышленности золото добывается из четырех весьма разнородных источников. С одной стороны, значительное количество добывают из россыпных месторождений, в которых золото накапливается во вторичном залегании — в так называемых черных шлихах. Сюда же относятся и вторичные конгломераты или песчанники, поскольку можно говорить о вторичном залегании золота в них.

Второй тип связан с попутным извлечением золота при добыче сульфидных медных или колчеданных руд.

Третий, очень важный генетический тип связан с теллуридами серебра и золота; отличить в нем золото значительно труднее, а дать оценку месторождению без специального химического анализа невозможно. Наконец, четвертый тип связан с коренными месторождениями в золотых жилах, в которых золото обычно не видно невооруженным глазом и где лишь специальные пробы могут показать его присутствие.

По отношению к первому — россыпному — типу целый ряд очень характерных признаков позволяет легко его обнаружить даже и в случае весьма дисперсного состояния. Высокий удельный вес, специфический цвет, неизменяемость при окислении, сильный блеск, — все это настолько характерные черты, что частицы золота бросаются в глаза в ковше или промывальной машине при отмучивании глины, песка и более редких составных частей россыпи. Опытный поисковик для каждого данного района знает специфические условия россыпей, в которых приходится искать золото, устанавливает закономерности в его распределении в зависимости от строения долины, характера лога, типа водоносных горизонтов, величины и окатанности зерен, цвета и блеска кварца и т. д. Поисковики и практики своего дела (как мне в этом пришлось убедиться в многочисленных беседах) приходят к ряду замечательных практических выводов, а опытные старатели на золото нередко, на основе накопленного опыта, действительно легко находят более богатые части россыпей или вторичных месторождений. Характерной чертой для золота во вторичном залегании является все же его легкая миграция. Рассказы о том, что золото вновь появляется в перемытой дрове, несомненно, имеют некоторый смысл, и мне известны вполне проверенные факты на Южном Урале, где наблюдалось перемещение золота в более высокие горизонты и осаждение его ближе к поверхности под влиянием поверхностных вод¹.

Труднее вопрос поисков золота в месторождениях второго типа. В полиметаллических рудных залежах, особенно пиритов и медистых пиритов, золото обычно оказывается рассеянным, что не препятствует его извлечению попутно с медью, цинком или другими металлами. В этом случае интересными для золота являются вторичные зоны обогащения, особенно зоны цементации вместе с вторичными колчеданными песками, кварцем, песчанистым баритом и т. д. В этом направлении на Урале выработан целый ряд конкретных признаков для поисков золота в отдельных зонах сульфидных месторождений.

Третий тип золотых месторождений, связанных с теллуридами, практически у нас почти неизвестен, хотя по аналогии с Австралией и Северной Америкой (Колорадо) на него следует обратить самое серьезное внимание. Вообще нужно думать, что восточнее меридиана Иркутска мы встретим еще ряд месторождений золота этого типа.

¹ При поисках на золото в Конго пользуются анализом россыпного золота: чем оно чище, тем дальше от первичного месторождения (Ланесвирт, 1936 г.).

Наконец, очень большое значение принадлежит золоту в рудных жилах. После долгих и многочисленных споров мы приходим к выводу, что в рудных кварцевых жилах золото в основном связано с геофазами I—K, но что при известных условиях наблюдается и более высокотемпературное золото геофазы G.

Для последнего характерна связь с арсенопиритом, цинковой обманкой, иногда с шеелитом, адуляром, турмалином. Этот тип высокопробного в общем золота характерен, например, для некоторых месторождений Урала. Однако надо думать, что главная часть золота в природе отлагается очень поздно, накапливаясь в продуктах кристаллизации коллоидальных растворов кремнезема в геофазы I—K. Здесь золото встречается вместе с кварцем и кальцитом и некоторыми другими карбонатами; его спутниками являются блеклые руды и некоторые сульфомышьяковые и сульфосурьмянистые соединения. Для этого типа характерным является: поздняя телемагматическая кристаллизация, нередко повышенное содержание серебра и специфические типоморфные особенности сопровождающего его кварца. Опытные исследователи рудных месторождений золота уже давно усвоили те специфические черты кварца, которые характерны для месторождений золота. Эти признаки не всегда поддаются описанию, но они столь характерны, что некоторые старатели, например в Забайкалье, с редкой точностью указывали мне на внешний вид кварца, который является золотоносным, и даже предсказывали примерно содержание золота в образце кварца. Позднее школа Нигризолото в Москве обосновала эти чисто эмпирические наблюдения и на ряде конкретных месторождений дала блестящий анализ свойств кварца, отвечающих условиям накопления золота.

Главнейшая литература

- О. Е. Звягинцев. Геохимия золота. Современные проблемы физико-химической технологии. Сб. 3. Унив. физико-химии им. Н. Д. Зелинского, 1939, 46—64.
А. Е. Ферсман. Геохимия. 1939, IV, 254.

80. РТУТЬ

Если исключить некоторое количество ртути, получаемой из блеклых руд или встречающейся в самородном виде, то единственным источником этого металла явится киноварь, типичный минерал, который по своим свойствам и генетически характеризуется рядом весьма легко отличимых признаков. Прежде всего характерны внешние свойства этого минерала — яркий красный цвет, красивая прозрачность, прекрасная кристаллизация; нередко сопровождается блестящим антимонитом. Таковы характерные черты этого минерала, который можно спутать лишь с редким сурьмянистым соединением — кермеситом или с реальгаром, легко, впрочем, изменяющимся на воздухе. Для киновари же характерны неизменяемость и устойчивость, благодаря чему мы встречаем это соединение иногда и в россыпях в довольно значительном количестве. Столь же определена и генетическая картина киновари. Она связана почти всегда с последними геофазами эволюции магм, т. е. по преимуществу с кислыми и частично средними породами.

Как минерал телемагматического типа, киноварь связана с наиболее отдаленными частями магматических очагов и приурочена к глубоким трещинам и зонам разломов. При этом для переноса и осаждения киновари благоприятными являются зоны дробления породы и наличие щелочных растворов.

Этими данными намечаются коренные предпосылки, определяющие районы поисков ртутных месторождений. В то же время геохимическими чертами этих рудных образований являются: сильное окварцевание породы, накопление кристаллов кварца, кальцита, частично сурьмяного блеска; нередко натечные образования халцедона, мягкие белоснежные массы каолинита и фиолетовые пятна плавикового шпата. Все эти данные характеризуют геофазу К.

Главнейшая литература

А. Е. Ферсман. Геохимия. 1939, IV, 275.

81. ТАЛЛИЙ

Таллий принадлежит к весьма редким химическим элементам; однако, при характерном для него общем рассеянии, мы все же знаем ряд специфических таллиевых минералов, правда очень редких и связанных с жильными месторождениями серебра и свинца. Как одновалентный элемент с относительно низкими энергетическими показателями, таллий сильно мигрирует, и лишь повышенная его поляризация (по сравнению с рубидием или цезием) ведет к тому, что он накапливается в конечных частях летучих рудных процессов, частично попадая и в остаточные пегматиты, а также рассеиваясь в щелоках соляных месторождений. Единственно реальным источником для промышленного таллия являются сульфиды геофазы I — К рудных месторождений, где таллий, как сказано, или образует свои собственные соединения или же накапливается в шпритах, особенно в марказитах несколько более поздней геофазы К.

Извлечение таллия из этого рассеянного типа возможно лишь при разработке особой технологии металлургического процесса.

Интересны поиски таллия как летучего элемента в сере наших вулканических местностей (по аналогии с Везувием и Этной).

82. СВИНЕЦ

Для свинца, как и для его спутника цинка, мы имеем два типа геохимических образований: с одной стороны, первичные сульфиды, с другой — вторичные скопления его окисленных руд (церуссит, галмей, каламин и др.).

Поиски промышленных сульфидов в общем нетрудны, тем более, что речь идет главным образом об одном наиболее распространенном минерале свинца — свинцовом блеске — с очень характерными внешними признаками.

Генетически свинцовый блеск приходится связывать с отдельными геофазами жильных рудных процессов, а именно с геофазой Н и началом I, причем до него, следовательно, при более высоких температурах и ближе к очагу, осаждаются руды цинка, после него же, следовательно, дальше от очага, при более низких температурах — комплексы сульфопыrophyковых и сурьмянистых руд серебра, свинца, отчасти золота и т. д. Таким образом намечается совершенно определенный геохимический момент концентрации, благодаря чему ближе к поверхности богатые свинцом месторождения замещаются полиметаллическими, а с глубиной или руды беднеют свинцом и замещаются цинковой обманкой или же к ним просто подмешивается все большее и большее количество сернистого цинка, а в некоторых случаях даже оловянного камня. Характерна связь с жильным и

кристаллическим кварцем, реже с карбонатами, еще реже с баритом. При поверхностном окислении обычно наблюдается явное замещение свинцового блеска карбонатами, сульфатами или силикатами свинца. Эти соединения железных шляп, подобно цинковому галмее, мало характерны, связаны с большим количеством железных охр и лимонита, носят неправильный натеchnый или сплошной характер; только удельный вес позволяет в поле отличить эти образования.

Все же при разработке нередко галмеев цинка и свинца идут в отвал, где иногда накапливаются в очень больших количествах вплоть до того момента, когда опытный глаз минера-лога правильно определит их химическую природу. Определение иногда облегчается наличием резкой окраски фосфорнокислых и мышьяковокислых соединений свинца, образующих корочки или щетки кристаллов. К этим же соединениям присоединяются иногда и ванадиевые минералы свинца. Последние, благодаря своей пестрой — бурой, зеленой или красноватой окраске, нередко наводят мысль поисковика на возможность нахождения здесь вторичных руд свинца и ванадия.

Интересно применение для поисков вторичных руд свинца методов люминесценции.

83. ВИСМУТ

Поиски висмутовых руд в общем довольно трудны, и поэтому висмут обычно пропускают и открывают его только в результате химических анализов в лаборатории. Небольшие количества самородного висмута связаны с гранитными пегматитами и, в частности, с оловянными пневматолитами геофаз G и F. Однако те месторождения, из которых висмут может добываться попутно с касситеритом и частично с молибденовым блеском, не имеют большого промышленного значения.

Главные месторождения связаны с типичными жилами рудных образований геофаз G — H, в которых висмут сопровождает сульфидные соединения олова, серебра и свинца и нередко связан с золотом.

Специфические черты этих месторождений следующие: высоко расположенные очаги магмы и, благодаря этому, сильное телескопирование, частично накопление сульфидов кобальта и никеля с характерными для них цветными выцветами, обилие барита и карбонатов, богатых железом, что нередко придает им характерный красный цвет.

Таким образом, висмут нередко добывается из жильных месторождений одновременно с кобальтом и серебром. Практически поиски этого типа должны быть связаны с северо-востоком Сибири.

90. ТОРИЙ

Для тория мы знаем многочисленные природные минералы, однако для практического извлечения тория и мезотория пригоден только монацит и, может быть, некоторые сложные ниобо-танталаты и титанаты. В основном вся ториевая промышленность до последнего времени держалась на монаците, характерном минерале гранитных пегматитов, тесно связанном с ранними их геофазами B и C. Коренные месторождения этого типа редко давали возможность обосновать серьезную добычу этого минерала, и практически вся его добыча была связана с вторичными месторождениями — с россыпями речными и частью морскими, в которых монацит накапливался при разрушении пегматитовых геофаз гранитов вместе с цирконом, магнетитом и некоторыми другими минералами.

Таким образом, основные поиски промышленных месторождений тория и мезотория должны вестись в области древних (или современных) процессов разрушения гранитов, богатых пегматитовыми фациями.

Тяжелый удельный вес монацита, золотистые тона его — в одних случаях и бурые непрозрачные — в других, накапливание его в шлихах вместе с магнетитом и цирконом — таковы те характерные черты, которые необходимо иметь в виду при анализе шлиховых проб. Однако единственно верным методом для поисковых и разведочных работ на торий является применение радиоактивной съемки. Используя существующую радиоактивную методику (эманационный или α -метод), можно не только определять нахождение тория в данном шлихе или данном минерале, но и очертывать районы, богатые радиевой и ториевой эманацией, а также находить в районах, покрытых наносами и почвенным покровом, месторождения и жилы, содержащие ториевые минералы.

92. УРАН И (88) РАДИЙ

Поиски урановых и радиевых руд, так же как и тория, в основном лучше всего и легче всего ведутся при помощи соответствующей радиоактивной съемки. Повышенное содержание эманации радия нередко служит наведением для поисков в данном районе урановых соединений. Обычно общее определение радиоактивности α -, β - и отчасти γ -методами указывает на наличие скоплений урана и тория, а изучение этими же методами отдельных образцов позволяет судить о содержании радия и (на основании пересчетов) урана в данном образце. Однако применение всех этих методов требует к себе весьма вдумчивого отношения и проверки наличия установившегося радиоактивного равновесия.

Все же, помимо этих методов, необходимо считаться и с чисто геохимическими и минералогическими признаками, которые для урана довольно характерны и, вне зависимости от явлений радиоактивности, позволяют намечать районы распространения урановых соединений.

По существу при поисках руд урана и радия необходимо учитывать три основных типа их скоплений. Первый тип связан с пегматитовыми жилами гранитного типа, в которых уранинит накапливается в геофазы Си D вместе с характерными урано-танталатами, ниобатами и титанатами, богатыми к тому же редкими землями. Все эти минералы характеризуются черным цветом, что является важным диагностическим признаком, и лишь иногда на них и вокруг них наблюдаются красные или желтые корочки коллоидальных продуктов окисления. Для всех этих пегматитов характерна связь с коренными месторождениями, богатыми содержанием железа, придающего им нередко красный цвет. Весьма типичны ореолы и радиально-лучистые трещины вокруг указанных черных минералов, содержащих уран и радий.

Второй тип, практически гораздо более важный, связан с рудными жилами и, в частности, с образованиями геофаз H и I. И здесь характерным признаком является наличие темнокрасных доломитов и кальцита с гематитовыми листочками в рудном теле. Характерна возможность одновременной добычи с висмутом, кобальтом и особенно с самородным серебром. Эти рудные жилы выделяются обычно по своему цвету и структуре и в полярной Канаде были обнаружены и нанесены на карту на основе визуальных наблюдений с самолетов.

Третий тип урановых соединений связан с поверхностными гипергенными процессами. Здесь мы наблюдаем ряд разнообразных форм скоплений; некоторые из них явились весьма важным источником для извлечения

урана и радия. Во всех, однако, случаях в этих месторождениях мы имеем дело с продуктами шестивалентного урана, т. е. с образованием желто-зеленых пластинок с характерной флюоресценцией, свойственной соединениям уранила. Разнообразные желто-зеленые слюдки и налеты, мелкодисперсные скопления в известняках и песчаниках также желтого цвета, иногда отдельные листочки и жилки в торфяных скоплениях — таковы те многообразные типы, которые дают начало месторождениям карнотита, тюямунита и других урано-фосфатов, -арсенатов, -ванадатов. Во всех этих случаях характерными являются: наличие низкотемпературных процессов, восстановительной среды (например, органические вещества, битумы, торфяные массы), а также характерные пластинчатые структуры кристаллических фаз. Поиски этих месторождений и их оконтуривание могут вестись при помощи специальных радиевых карт и выявления районов максимальной радиоактивности¹.

Необходимо, однако, иметь в виду, что многие месторождения вторичного типа являются не чем иным, как «урановой пляжей» над месторождениями коренными. Находки слюдок в процессах гипергенных подсказывают необходимость поисков более глубоких месторождений урана. Правда, переход от вторичных образований слюдок к первичным урановым смолкам (частично UO_2) обычно происходит не непосредственно, а между этими двумя зонами наблюдаются: промежуточная зона вторичного обогащения, зона цементации, в которой уран накапливается в виде разнообразных соединений $UO_2 + UO_3$, и зона урановой черни. В районах южных и пустынных зона цементации может достигать значительной мощности, причем нижняя ее граница отвечает уровню подземных вод и нередко отделена от коренных месторождений зоной выщелачивания и обеднения.

Во всяком случае, для таких месторождений в сухом климате мы в схеме должны ожидать сверху вниз: зоны гипергенных слюдок, связанных с вытягиванием к поверхности растворов; далее — зоны цементации нередко со значительным местным обогащением, но очень непостоянного химического и структурного состава; еще глубже — сравнительно мало-мощные зоны выщелачивания и, наконец, в глубине — зоны первичных урановых руд (смолок), обычно с сульфидами.

Глава VII

ПОИСКИ ОТДЕЛЬНЫХ ПОЛЕЗНЫХ МИНЕРАЛОВ (главнейших)

В дополнение к геохимическому обзору поисковых признаков по элементам, приводим соображения о поисках тех полезных ископаемых, которые не укладываются в рамки отдельных элементов. Изложение весьма краткое; в большинстве случаев за практическим материалом приходится отсылать к соответственным томам многотомного издания Академии Наук СССР «Неметаллические ископаемые» или к большим учебникам по нерудным ископаемым.

Чисто геохимические методы поисков в данной главе уступают место преимущественно методам минералогическим, причем знание минералогических и технических свойств данного минерала

¹ Яркие желто-зеленые тона выплетов могут служить хорошим поисковым признаком, однако при отсутствии меди их нередко трудно отличить от феррисульфатов желтой окраски.

играет ведущую роль. Для этих ископаемых качественная сторона преобладает обычно над количественной, и толковые поиски могут вестись лишь попутно с чисто технологическим опробованием сырья. Во всяком случае исследователь-поисковик должен быть полностью в курсе технических и технологических свойств того вещества, которое им разыскивается или разведывается.

Особенно это касается тех новых минеральных видов, которые в последнее время внедряются очень широко в промышленность; таковы в первую очередь:

Горный хрусталь — для радиотехники и оптических приборов.
Нефелин, элеолит — в многочисленных способах применения, особенно в стеклоделии.

Серпентиниты, дуниты — в качестве удобрения, наполнителя и ценного дорожного материала или химического сырья.

Глауконит — как абсорбер и природный пермутит.

Кианит, андалузит, дюмортьерит — в огнеупорной и кислотоупорной промышленности.

Волластонит — для получения искусственного стекла и ваты.

Пирофиллит — как заменитель талька в ряде отраслей промышленности.

Вермикулит — в качестве изолятора в ряде производств.

Маршалит (SiO_2) — в металлургических процессах и химической промышленности.

Я не говорю о совершенно новом и широком применении криолита (как инсектисида и в стеклоделии), апатита (для получения молочных стекол), топаза и барита (в оптических приборах), талька (в керамике) и многих других.

Расширение круга использования идет совместно с открытием новых месторождений; настоящий полевой исследователь должен быть тесно связан с основными производствами по соответствующим нерудным полезным ископаемым и хорошо знаком с их применением. Это особенно важно у нас в Союзе, где намечаются крупные запасы для ряда очень интересных и мало применяемых в мировой технике и промышленности тел, как андалузит, нефелин, вермикулит, маршалит, топаз и др.

Главнейшая литература

- B. Dammer u. O. Tietze. Die nutzbaren Mineralien. Stuttgart, 1927—1928, 1—2.
R. Laddo. Nonmetallic minerals. New York, 1925, 1—686.
Stutzer. Die wichtigsten Lagerstätten der Nicht-Erze. 1911.

АГАТ

Поиски агата в нашей стране представляют большой интерес, так как точная механика и строительство точных приборов выдвигают огромный спрос на высокосортный технический камень. Качественные достоинства агата заключаются в его твердости, вязкости, отсутствии трещин, достаточной величине кусков вполне однородного материала.

Генетически наиболее ценный материал связан с молодыми мелафитами и базальтами, частью подводными извержениями основных лав, в которых пустоты и трещины заполнены остаточным кремневым гелем при вероятной температуре отложения около 300° .

Поэтому поиски крупных месторождений качественного агата должны быть связаны с изучением покровов базальтовых пород, причем особенно

внимательно следует относиться к подводным извержениям. Практически поиски должны быть приурочены к районам молодых эффузий, следовательно, почти исключительно к Крыму, Закавказью, Восточной Сибири, Прибайкалью и Забайкалью¹.

Особенно богаты такими гальками некоторые полярные реки Сибири (Хатанга, Анабара и т. п.). Наведением на нахождение агатовых минералов и жил могут служить обильные образования зеленоватых селадонитов, скопления цеолитов, прозрачного известкового шпата, аметиста (не горного хрусталя).

Размеры хорошего сплошного агата должны определяться несколькими кубическими сантиметрами, причем наличие прослоек другой структуры считается техническим пороком.

Главнейшая литература

С. С. В а н ю ш и н. Технический агат в СССР и задачи изучения его сырьевой базы. Зап. Маш. об-ва, 1938, 2-я сер., LXVII, вып. 1, 141—153.

АЛМАЗ

Поиски алмаза на территории СССР сохраняют свое практическое значение, хотя получение на наших заводах новых сверхтвердых сплавов и особенно карбида бора позволяет широко заменять этот камень в технике. Несмотря на открытие многих новых месторождений (в Центральной Африке, Конго, на Золотом Берегу, в Гвиане), мы не получили за последние годы новых фактов для суждения о генезисе алмаза, и до сих пор остается доказанной только связь его с взрывными трубками ультраосновных пород.

При изучении генезиса кристаллов необходимо обращать внимание на их поверхность; резкие прямолинейные формы ограничения (или рельефа) характерны для явлений роста при быстрой кристаллизации в основных породах; округлые формы указывают на более сложный генезис в связи с медленным охлаждением магмы. Длительный перенос в песках ведет к особому блеску и своеобразному сглаживанию углов и ребер, что очень характерно для кристаллов некоторых россыпей².

Главнейшая литература

А. Е. Ф е р с м а н. Драгоценные и цветные камни России. 1920, I, 11—25.

АНДАЛУЗИТ, ДЮМОРТЬЕРИТ

Редкость крупных месторождений андалузита связана с своеобразием условий его генезиса: кислой средой, плюмазитовым характером гранитного остатка и выносом из него всех катионов — одновалентных и двухвалентных и частично даже трехвалентных. Остаются лишь элементы высокой валентности и высоких эквивалентов и решетки больших величин энергии (рутил, корунд, андалузит), большой химической и механической прочности. Отсюда своеобразие месторождений: образование крупных первичных — при повторном внедрении гранитов (и пегматитов) в более древние граниты или гранитпорфиры (гнейсы) и иногда грандиозное накопление в россыпях. Близок к андалузиту дюмортьерит и тесно связан с ними корунд (иногда диаспор).

¹ Особняком стоят халцедоны в змеевиковых породах, где в некоторых случаях при гипергенном их изменении получают довольно ценные технические материалы (например, переливты Урала).

² Надо иметь в виду, что при промывке песков алмаз остается в ковше вместе с тяжелым шлихом и, подобно капле ртути, выделяется своим блеском.

Распространение андалузита гораздо шире, чем мы думаем. Он наблюдается в Казахстане, на Тянь-Шане, в Закавказье. Хотя сам процесс еще не может считаться изученным, тем не менее он в основном связан с образованиями, носящими характер вторичных кварцитов в областях повторных гранитных интрузий небольших глубин (частью жальпого порфирирового типа), с сильным гидролизом пород и разбогачением SiO_2 и Al_2O_3 . Внешние признаки мало характерны, связь с вторичными кварцитами, иногда резко окрашенные пятна синего джюмюртьерита или синего корунда; характерны плотные глины типа колыб-таша, агальматолита, служащие несомненным поисковым признаком. Пространственно намечается обычный порядок: в центре интрузии — корунд, далее зона с андалузитом и по периферии — чистые вторичные кварциты (с сульфидами или продуктам их окисления, Cu, Mo и др.).

Главнейшая литература

Н. И. Наковник. Вторичные кварциты, грейзены и березиты. Сов. геол., 1938, VIII, 11, 42.

АСБЕСТ (ХРИЗОТИЛОВЫЙ)

Образование асбестовых жил промышленного значения связано в большинстве случаев с термальной переработкой массивов ультраосновных пород (дунитов, перидотитов и пироксенитов), превращенных в серпентиниты. Обычно эта переработка связана с автопневматолитом, в других случаях — с воздействием эманаций H_2O и CO_2 более поздних, преимущественно кислых магм, которые прорезают более древние ультраосновные породы. Поэтому поиски должны быть связаны с районами сильной дифференциации ультраосновных пород, с отщеплением в конце процесса более кислых остатков с летучими дериватами. Нередко этим процессам сопутствует десиликация гранитных жил (с превращением в плагиоклазовые или гранатовые). Реже золотистые светлые асбесты встречаются в контактных доломитах (офиокальцитах), перекристаллизованных интрузией диабазов, порфиритов или гранитов.

Необходимо иметь в виду, что практическое значение имеют лишь те гибкие волокна хризотила, которые залегают перпендикулярно к стенкам змеевика. Длинные хрупкие волокна, располагающиеся вдоль стенок трещины или косо к ним, обычно ценности не представляют. При поисках такие сорта легко смешать с очень похожим на асбест волокнистым немалитом $\text{Mg}(\text{OH})_2$. Геохимически интересно, что минералы, сопровождающие хризотил, распадаются на несколько генетических групп:

а) минералы материнских пород — оливин, бронзит, диаллаг, хромит, магнетит и др.;

б) минералы до асбеста — гранат, везувин, диопсид, актинолит и др.;

в) минералы немного более поздние (одновременные) — хлорит, антигорит, карбонаты, кварц, магнетит, магнетит;

г) минералы после асбеста — тальк, брусит, сапонит, новтронит, сепиолит и др.

Поисковые работы обычно сводятся к отысканию в змеевиковых поясах зон или районов асбестового изменения, реже поиски связаны с районами инъекции в известково-доломитовые породы диабазов или порфиритов.

Поиски других видов асбеста (амфиболового, антофиллита, крокидолита, амозита) имеют меньшее практическое значение.

Главнейшая литература

П. М. Татаринов. Курс нерудных месторождений. 1934, I, 177—228.

ГИПС И АНГИДРИТ

Поиски этих ископаемых необходимы в ряде районов Союза, хотя в целом наша страна и богата крупнейшими месторождениями этих важных объектов строительной и частично химической промышленности.

В общем внешние черты гипсовых пород довольно характерны, однако разнообразие внешних форм и окрасок столь велико, что иногда представляет трудности для отличия гипсовых пород от мергелей или известняков. Места отложения гипса и ангидрита связаны с осадками мелководных бассейнов или отмирающих озерных и морских районов (особенно с мергелями, доломитами и известняками). Поэтому практически поиски этих пород связаны прежде всего с анализом палеогеографических карт Союза, с изучением районов отступания морей и первых стадий отмирания соляных озер. Поскольку гипс и ангидрит при нормальном испарении морских вод принадлежат к первым наиболее ранним осадкам, они должны залегать в основаниях соляных толщ или же перемежаться с хлористым натрием в нижних частях соляных месторождений (причем обычно сначала выпадает гипс, а позднее, при больших концентрациях рассолов и безводный ангидрит). Частично гипсовые месторождения образуются вторично из скоплений ангидрита. Наведением на месторождения гипса могут служить на поверхности карстовые образования, воронки и провалы.

Стратиграфически месторождения гипса известны в Союзе почти во всех отложениях, причем особенно ими богаты девон, пермь, триас и низы третичной системы. В этих отложениях и необходимы преимущественно поиски гипса, обычно вместе с каменной солью, о присутствии которой можно судить по наличию рассолов и соляным куполам.

Особый характер носят поиски таких сортов гипса и ангидрита, которые подходят для декоративных или поделочных целей: чистых, без трещин и примесей кварца или халцедона; особенно ценными являются: чистые плотные синеватые пласты ангидрита, белоснежные шаровые скопления мелкозернистого «алебастра» (гипса) в мергелях или доломитах, иризирующие волокнистые сорта гипса — селенита, образующего прожилки в гипсоносных мергелях или карбонатных породах.

Как видно, в этих случаях особую техническую ценность имеют разности позднейшей перекристаллизации.

Главнейшая литература

П. М. Татаринов. Курс нерудных месторождений. 1935, II, 149—165.

ГЛАУКОНИТ

Глауконит, несомненно, является исключительно ценным ископаемым, которое в будущем должно получить в промышленности большое применение в качестве краски, удобрения, смягчителя воды, абсорбента и т. д. Поэтому поиски и изучение его месторождений в Союзе представляют большой интерес. Яркий зеленый цвет, временами переходящий в желтоватые или синеватые и сине-черные оттенки, представляет надежный признак для поисков глауконита, который вообще приурочен к осадочным песчаникам, мергелям и известнякам прибрежных частей¹ морских бассейнов. Поэтому поиски крупных месторождений должны вестись прямо по контурам морей на палеогеографических картах, так как глубина между 100—500 м, колебание уровней и трансгрессии, а также колебания в кислородном

¹ Реже к глинам типа, например, кембрийской спией глины Ленинграда.

режиме определяют образование этого минерала на дне бассейна. Особенно часты его скопления в осадках юры и мела, частью палеогена, причем его спутниками обычно являются прибрежные фосфориты и буро-зеленые (табачные) бобовые железные руды (ферро-феррисиликаты). Повидимому, с последними имеется очень тесная генетическая связь, так как небольшие изменения в режиме и составе морских бассейнов ведут к замене глаукопита другими железистыми хлоритами (например, псаммитом) или к образованию осадков гидратов окиси железа (частично и глинозема).

У нас особое внимание на глаукопит надо обратить на Урале (особенно в силурийских отложениях) и в Сибири, где необходимо искать глаукопит особенно в мезозойских породах (например, Якутской республики). В Европейской части Союза надо обратить особое внимание на меловые породы Кавказа, где вопрос об использовании глаукопита должен был бы быть поставлен более решительно и более конкретно. Несомненное обогащение глаукопитом пород по линии глинта около Ленинграда (например, около Копорья) намечает большие, но еще недостаточно изученные возможности; и здесь необходимы решительные практические мероприятия¹.

Главнейшая литература

В. И. Вернадский. Очерки геохимии. 1934, 322 (литература).

ГЛИНЫ ОТБЕЛИВАЮЩИЕ (СУКНОВАЛЬНЫЕ ГЛИНЫ, ФУЛЛЕРОВЫЕ ГЛИНЫ, БЕНТОНИТЫ, АСКАППТ, НАЛЬЧКИН, ГУМБРИН, КИЛ И ДР.)

Ценные свойства этих глин не могут быть определены ни по внешним признакам², ни даже по химическому составу. Поэтому только испытания могут установить практическую ценность данной глины и методы ее предварительной обработки. Наиболее ценные отбеливающие глины связаны, однако, в общем с меловыми или третичными породами, чем и вызывается особое богатство ими юга Союза, Крыма, Кавказа и частично Средней Азии. Генетически можно отметить лишь то, что наиболее ценные глины связаны с разрушением пеплов, туфов или других вулканических выбросов, что интересно проявляется на Кавказе.

Очень важны поиски отбеливающих глин на западном склоне Урала, в Восточной Сибири и на Сахалине. Пока конкретных руководящих указаний для этих районов не намечается, однако имеются общие соображения о возможности их нахождения, что важно для нужд нефтяной промышленности. В последнее время широко развивается применение этих глин при получении с песком особых формовочных материалов при литье.

ГОРНЫЙ ХРУСТАЛЬ

Среди обыкновенных разновидностей кварца выделяется по своему техническому применению горный хрусталь, приобретший большое значение в оптике и радиотехнике³. Для практического применения

¹ Близок по составу к глаукопиту селадонит, накапливающийся в пустотах и трещинах миндалевидных базальтов, мелафиров (траппов), порфиритов, реже диабазов. Своеобразный синевато-зеленый тон этих образований характеризует целые хребты вулканических пород и им отвечающих туфов. И этот минерал недостаточно у нас изучен и оценен. Поиски его промышленных скоплений совершенно необходимы, например в Крыму.

² Для бентонитовых глин (килов) характерны свойства мыловок; однако абсорбционные свойства зависят от гораздо более сложного сочетания свойств в дисперсности и активности частиц.

³ Мировая добыча чистого горного хрусталя превышает 1000 т в год.

необходима достаточная величина кристаллов, отсутствие включений, пустот, свилей, трещин и возможно слабое развитие двойниковых образований (последнее на глаз трудно обнаруживается). Повидимому, цвет хрусталя имеет второстепенное значение, так как опыты показывают, что осторожное прокаливание даже темнодымчатого кварца полностью его обезбечивает.

Геохимически проблема кварца, к сожалению, до сих пор даже не поставлена, т. е. мы не знаем, каких генетических типов кварцы являются наиболее полезными для техники¹. Мы имеем лишь чисто эмпирические данные кристаллографической лаборатории, руководимой А. В. Шубниковым, что для указанных целей подходят особенно кварцы альпийских месторождений и дымчатые кварцы («топазы») пегматитовых жил. На этих двух типах мы кратко и сосредоточим наше внимание.

1. Наиболее чистые и крупные дымчатые кварцы пегматитов связаны с геофазами D — E гранитных массивов обычного градиоритового типа, передко приуроченных к гранитизированным и гнейсированным зонам; во всяком случае мы вообще не можем рассчитывать найти эти образования вне самих гранитных массивов или зон гранитизации. Для образования крупных кристаллов дымчатого кварца необходимо наличие значительных пустот (занорышей), что связано с обилием летучих компонентов в данной части массива. Отсюда залегание таких зон с пустотами по контактам больших гранитных полей и особенно в апикальных верхних их частях. Обычными спутниками хороших дымчатых кварцев являются крупные кристаллы калиевых полевых шпатов, топаза и отчасти черного шерла. Обилие натрия в пегматитовом процессе может служить противопоказанием. В зонах больших давлений ожидать крупных полостей с большими кристаллами не приходится.

2. Второй тип связан с жилами альпийского типа и с кварцевыми дериватами гранитных пегматитов. Большинство крупных месторождений, используемых в мировой технике, относится к этому классическому типу месторождений горного хрусталя (Бразилия, Альпы, Мадагаскар). Приурочен он к процессам гораздо более низких температур (фаз H — I, т. е. около 350—150°) и потому относится к выделениям гидротермального происхождения, отстоящим довольно далеко от магматических очагов или даже совершенно с ними непосредственно не связанным. Нередко мы имеем дело лишь с горячими термами несколько щелочного характера, которые в контакте с гранитами перекристаллизуют кварциты и другие кремневые породы и приводят к новообразованию горного хрусталя в растворенных и перекристаллизованных частях кварцитовых или песчаных массивов.

Этот тип образований мало изучен, но представляет огромный интерес, так как лучшие по своей чистоте и однородности кварцы вообще связаны с ним. Для него показательно наличие зеленых лептохлоритов, аксинита, окислов титана, зеленого сфена, альбита или адуляра. Часто пустоты достигают очень значительных размеров. Цвет кристаллов обычно чистый и прозрачный, реже дымчатый.

Определение в поле ценности горного хрусталя и классифицирование его по сортам требует специального навыка, которым обладают только немногие исследователи, работающие над применением кварца в радиотехнике и оптике. Важна, как сказано, полная прозрачность, отсутствие

¹ Во всех случаях, однако, идет речь только о низкотемпературной модификации кварца.

включений посторонних минералов, отсутствие свилей, «тумана», пустот и плоскостей отблеска; очень важный вопрос о наличии и природе двойников обычно не решается на глаз.

Главнейшая литература

- Г. Н. В е р т у ш к о в. Жилы альпийского типа на Урале. Доклады Акад. Наук СССР, 1937, XVI, № 7, 379—383.
 Г. М. В и р о в л я н с к и й. Кварц с реки Пскем. Зап. Мип. об-ва, 1938, LXVII, № 2, стр. 236—245.
 А. Е. Ф е р с м а н. Пегматиты (2-е изд.). 1932, I, 333 и след.

ГРАНАТЫ

Исключительно интересная и важная группа силикатов, которая характеризуется следующим сочетанием ионов (с характерными для них величинами вэков):

Пироп . . .	Mg ⁺²	1,05	Al	1,65
Альмандин .	Fe ⁺²	1,06	Al	1,65
Спессартин .	Mn ⁺²	1,00	Al	1,65
Андрадит . .	Ca	0,87	Fe ⁺³	1,72
Меланит . . .	{ Ca Fe ⁺²	{ 0,87 1,06 }	Fe ⁺³	1,72
Гроссуляр . .	Ca	0,87	Al	1,65
Уваровит . .	Ca	0,87	Cr	1,58
Шёрломит . .	{ Ca Fe	{ 0,87 1,06 }	Ti ⁺³	1,55

Этот ряд в общем следует постепенному понижению энергии решетки U , повышению MV и понижению вэков и экв главных ионов, причем нетрудно видеть, что наиболее высокотемпературными являются гранаты с наиболее высокими вэками катионов ($Mg + Fe^{+2}$) — пироп и альмандин.

Именно эти два граната и являются главнейшими полезными ископаемыми: пироп — как драгоценный камень, альмандин как абразив. О практическом значении меланита и уваровита пока говорить не приходится¹. Оба граната, пироп и альмандин, связаны с условиями или высоких температур или высоких давлений: первый мы должны искать в глубинных выделениях основных и ультраосновных магм (частью взрывного типа месторождения), второй — в древних кислых кристаллических сланцах, измененных на больших глубинах воздействием гранитов (гранитизированных или пегматитизированных). Пироп мы должны искать одновременно с алмазом, хромовым диопсидом, шпинелью — минералами, сохраняющимися в россыпях, где обычно к ним подмешиваются кварц, агат, халцедон (при разрушении змеевиков) и другие соединения.

Гораздо важнее с практической точки зрения поиски альмандин, широко применяемого в абразивной промышленности; его приходится искать в зонах глубинных контактов (пегматитов и инъекций), содержащих голубой или зеленый кианит, иногда красно-черный ставролит в образованиях, богатых кварцем, иногда мусковитом.

Большое значение могут иметь и альмандиновые пески в районах разрушения гранатовых гнейсов или сланцев; в них обычно содержатся также кварц, магнетит (иногда кианиты), циркон, реже ксенотим, монацит.

¹ Некоторое значение как драгоценный камень имеет демантоид ($Ca + Fe^{+3}$) и спессартин гранитных пегматитов.

Главнейшая литература

П. М. Татаринов. Курс нерудных месторождений. 1934, I, 144—156.

ДРАГОЦЕННЫЕ, ДЕКОРАТИВНЫЕ И ТЕХНИЧЕСКИЕ КАМНИ

Вопрос о правильном толковании генезиса драгоценных и цветных камней имеет далеко не одно научное значение; как и в других областях горного дела, рациональный генетический взгляд является основой для суждения о надежности месторождения или же о направлении поисков и разведок.

Схема главнейших минералообразовательных процессов, приводящих к образованию скоплений драгоценных или поделочных камней

1. В осадочных породах (из холодных водных растворов) галит, известковые натёки, мраморный оникс¹, селенит, алебастр, кремсь-роговик, окаменелое дерево, гаулузит (колыб-таш).
2. В кристаллических сланцах:
 - а) в гнейсах, слюдяных и роговообманковых сланцах, кварцитах — дистен, альмандин, ставролит, авантюрин, кварцит;
 - б) в мраморах, змеевиках, тальковых сланцах — мрамор, офиокальцит, листовенит, благородный змеевик, стеатит, агальматолит, плотный брусит;
 - в) в роговиковых породах — яшмы, родонит;
 - г) в змеевиках и роговообманковых сланцах — нефрит (ср. пункт 6).
3. В жильных гидротермальных процессах:
 - а) жилы рудные — малахит (азурит), опал, роговик, диоптаз;
 - б) жилы альбитского типа — эпидот, гематит, рутил, горный хрусталь, кварц с включениями рутила и асбеста;
 - в) жилы иных типов — опал, бирюза, мраморный оникс.
4. В жильных образованиях гранитной магмы:

Пегматиты и пегматоиды

- а) пегматиты глубинного типа — берилл, аквамарин, фенакит, топаз, циркон, турмалин, амазонит, письменный гранит, дымчатый кварц, розовый кварц;
- б) пегматиты пневматолитических геофаз: воробьевит, аквамарин (топаз), турмалин, лунный камень, лепидолит;
- в) магматические и контактные образования пегматитов: обогащение щелочно-земельными окислами (розовый турмалин, кордиерит); десиликация пегматитов — корунд, андалузит; обогащение хромом — александрит, изумруд и пр.

Аплиты и силекситы

- г) кварцевые и аплитовые жилы — горный хрусталь, дымчатый кварц, аметист;
- д) пневматолиты гранитные и штокверки — аквамарин, флюорит, топаз.
5. В жильных образованиях нефелиновой магмы: пегматиты и пегматоиды — циркон, канкринит, содалит, нефелин, эвдиалит (амазонит).
6. В контактных месторождениях:
 - а) в известняках — шпинель, корунд, гранат, везувиян, лазурит (мрамор);
 - б) в зеленокаменных породах — гроссуляр, везувиян, брусит;
 - в) в контактах гранитных пегматитов (см. выше п. 4);
 - г) в контактах габброидных пород с змеевиками и кристаллическими сланцами — нефрит.
7. В кислых эффузивных породах: обсидиан, частью силицированные порфиры — яшмы (кварцевые порфиры).
8. В основных и ультраосновных магматических породах:
 - в габбропоритах — лабрадор;

¹ Большая часть мраморного оникса и «радиолита» связана с горячими или, вернее, теплыми источниками (термами).

- в базальтах и мелафрах — опал, агат, халцедон, карнеол, гелиотроп и др.; в дунитах и пироксенитах — алмаз, пироп, оливин.
9. При процессах термального или гипергенного изменения оливин-пироксеновых пород:
- а) демантоид, хромдиопсид, уваровит;
 - б) змеевик, тальк, сепиолит, халцедон.
10. Органического происхождения: янтарь, гагат, окаменелое дерево, окаменелый коралл.
11. В россыпях: алмаз, корунд, топаз, циркон, гранат и другие камни.

Главнейшая литература

- А. Е. Ферсман. Драгоценные и цветные камни СССР. 1920, I; 1925, II, 5—28.
А. Е. Ферсман. Пегматиты (изд. 2-е). 1932, I, 600—607.

ИСЛАНДСКИЙ ШПАТ

Чистые прозрачные сорта кальцита представляют ценный материал для изготовления оптических приборов. Они должны отличаться следующими свойствами:

- 1) полной прозрачностью, без мути или полосатости (зональности);
- 2) полной бесцветностью, водянопрозрачностью; интересно отметить, что некоторые желтые или желтоватые тона после осторожного прокаливании исчезают;
- 3) полным отсутствием трещинок (по спайности) или двойниковых образований, видимых иногда при повороте образцов перед глазом;
- 4) отсутствием примесей, посторонних включений и пр.

Необходимо далее отметить, что исландский шпат весьма хрупок, легко дает трещины по спайности, что надо иметь в виду как при добыче, так и при перевозке, пересылке и обработке.

Поиски таких высоких сортов исландского шпата должны прежде всего вестись в базальтах (траппах), лавовых потоках средней кислотности, в которых заполнение пустот и трещин связано с теплыми водами поствулканического характера. Спутники — цеолиты и селадонит.

Гораздо реже хороший исландский шпат встречается в известняках, где мы должны его связывать обычно с теплыми водами каких-либо охлаждающихся рудных процессов; отсюда наблюдающаяся иногда связь этих образований с баритом и редкими сульфидами. Обычно, однако, для этого шпата характерно несколько повышенное содержание железа и нежелательный желтоватый или холодно-сероватый тон.

КВАСЦЫ (АЛУНИТ)

Различные природные квасцы, алунит и близкие к ним водные сульфаты могут явиться сырьем как для получения чистых квасцов, так и для извлечения алюминия и калия. Особое значение в последние годы получают алуниты, широко распространенные в Казахстане, Средней Азии и отчасти в Закавказье.

Во всех этих случаях мы имеем дело с определенным генетическим типом — образованием алунитов за счет изменения полевых шпатов кислых эффузивов (риолитов, трахитов и их туфов, гранитпорфиров и т. д.). Характерным признаком является одновременное накопление вторичных кварцитов (иногда с синими пятнами корунда и дюрмгтерита), специфических алюмосиликатов (галлуазита, колыб-таша). В этих случаях образование алунита приходится относить за счет двух возможных процессов: непосредственного воздействия кислых эманаций SO_3 и H_2S , или продуктов

окисления S и FeS_2 . Поэтому образование алунитов мы можем рассчитывать встретить и в верхах месторождений самородной серы (с гипсом, арагонитом и кальцитом, в виде сплошных белых масс), а также при окислении пропитанных пиритом контактных зон кислых пород (особенно богатых алюминием эффузивов).

Наконец, особый тип скоплений квасцовых минералов связан с так называемыми квасцовыми глинами или квасцовыми сланцами, нередко бурыми осадочными породами, богатыми органическими соединениями и колчеданом. Окисление колчеданов в определенных гипергенных условиях приводит к образованию вторичных сульфатов разного типа, которые постепенно из растворенных соединений типа квасцов переходят в формы трудно растворимых сульфатов типа алунита (нередко с гипсом).

Как видно из сказанного, для алунита и квасцов мы не имеем очень резких внешних признаков, и это приводило к тому, что алунит в течение многих десятков лет пропускаться исследователями.

Главнейшая литература

П. М. Татарinov. Курс нерудных месторождений. 1934, I, 284—299.

КОЛЧЕДАН ЖЕЛЕЗНЫЙ (ПИРИТ)

Железный колчедан, благодаря своему металлическому блеску и цвету обращает на себя внимание и нередко ошибочно принимается неопытными поисковиками за медную руду; надо только учитывать высокую твердость пирита в противоположность халькопириту!

Два типа генезиса пирита имеют практическое значение и заслуживают внимания.

Наиболее крупные скопления связаны с зонами вулканических интрузий. Хотя они генетически и плохо разгаданы, тем не менее можно указать, что их поиски должны вестись в районах сильной металлизации обычно в связи с богатыми Na кварцевыми альбитофирами, порфиритами или диабазами (т. е. с породами средней кислотности, реже более основными). Понвидимому, образованию скоплений благоприятствуют складчатые зоны метаморфического характера.

Второй тип гораздо меньшего практического значения связан с колчеданами в углях (как каменных, так и бурых), где колчеданы образуют обычно отдельные конкреции или даже пропластки как в самих углях, так и в прослойках других пород. Известны и вторичные накопления колчедана при размывании угольных пластов.

Характерные признаки колчедана общезвестны; типичны процессы окисления с ржавыми потеками или налетами зеленоватых и белых солей (мелантерита, легко растворимого в воде).

КОРУНД И НАЖДАК

Поиски корунда и наждака определяются генетическими условиями их скоплений. Однако они настолько разнообразны и настолько не выяснены, что, например, Ладу (Ladoo, 1925) в своей большой сводке по нерудным ископаемым перечислил 12 разнообразнейших генетических типов, с которыми связан корунд. По существу, действительно приходится считаться со следующими главнейшими типами:

1. Десиликация гранитных пегматитов и кислых гранитных остатков на контактах с основными или ультраосновными породами. Это наиболее

интересный и распространенный тип, и на него приходится обращать особое внимание.

2. С этим связаны скопления кристаллов корунда (чаще отдельных драгоценных чистых разновидей) в контактно-измененных известняках (иногда вместе с шпинелью — в доломитах).

3. В условиях гидротермальной переработки кислых пород с выносом катионов (H, Na, Mg, Ca, Fe) и с разобшением Al_2O_3 и SiO_2 (как крайний член грейзенизации, березитизации — при образовании так называемых вторичных кварцитов). Обратит внимание на связь с андалузитом, галлуазитом, колыб-ташем и алунитом.

4. При метаморфизации глиноземистых пород, особенно под влиянием гранитных эманаций, наблюдается образование скоплений корунда и наждака в виде прожилков, линз или целых горизонтов, не лежащих непосредственно у контакта с гранитами, но нередко следующих на определенном расстоянии от него. К этому типу относятся главнейшие месторождения наждака.

5. Благодаря особой устойчивости, прочности и химической неизменяемости корунда этот минерал сохраняется как в элювиальных, так и в аллювиальных россыпях; в больших скоплениях он даже несколько выделяется в рельефе.

6. Менее понятны скопления корунда в некоторых основных породах (андезитах, базальтах и т. д.).

Что касается внешних свойств корунда и наждака, то из них наиболее характерными являются прочность, высокая твердость, химическая неизменяемость и обычно в чистых разновидях — синий или серо-синий тон (гораздо реже красный тон рубина).

КРАСКИ МИНЕРАЛЬНЫЕ

Понятие минеральных красок собирательное и потому не может быть рассматриваемо с геохимической точки зрения. Мы хотим лишь подчеркнуть, что очень многие минеральные виды смогут быть в дальнейшем использованы в красочной промышленности (обычно кустарно) и что на геохимике и минералогии лежит задача в каждом данном случае продумать эту возможность. Так, в последние годы была выяснена красящая способность красных бокситов Тихвина, зеленого волконскоита пермской Приуральской полосы и т. д. Под вопросом стоит, например, использование массовых скоплений устойчивого зелено-желтого нонтронита горы Магнитной.

Несомненно, что наиболее устойчивыми будут соединения наиболее высоких (в природе) степеней окисления преимущественно ионов промежуточного типа (т. е. асимметрического строения). У нас в Союзе надо обратить внимание на следующие природные красители: охры, умбры, селадонит, глауконит, волконскоит, боксит, землистый малахит, сажистый графит и др.

Главнейшая литература

- А. Е. Ферсман. Цвета минералов. Изд. Акад. Наук СССР, 1936, 138.
R. L. Doo. Nonmetallic minerals. New York, 1925, 368—391.

ПОЛЕВОЙ ШПАТ

Поиски полевого шпата должны быть связаны почти исключительно с гранитными пегматитами преимущественно чистой линии. Надо только иметь в виду, что в последние годы все большее и большее значение

приобретают заменители полевых шпатов — чистые жильные нефелины, нефелиновые породы (уртиты, нефелиновые сиениты, нефелиновые базальты, феолизиты и т. д.), а также чистые лейкократовые пегматитовые граниты (называемые в промышленности просто «пегматиты»).

Богаты крупными скоплениями чистого полевого шпата преимущественно граниты и пегматиты в древних архейских щитах, в которых обычно полевой шпат связан с крупными скоплениями кварца, и реже в палеозойских (герцинских) образованиях. Геохимические диаграммы показывают, что скопление полевого шпата в основном приурочено к геофазе D, что говорит о том, что зона письменного гранита (геофаза C) образуется до него, а массы кварца (геофазы E и F) после. Отсюда выявляются те условия, в которых необходимо вести поиски.

Из той же геохимической диаграммы вырисовывается и возможное распределение вредных примесей, так как нормально биотит, шерл и частично берилл выкристаллизовываются раньше полевого шпата, после же пего в основном (хотя частично одновременно) — мусковит, альбит, топаз и литиевые соединения.

Относительно поисков таких разновидностей полевых шпатов, которые используются как драгоценные камни (лабрадорит, солнечный и лунный камень, амазонит и другие), можно дать следующие указания. Поиски красивых разновидностей лабрадора необходимо вести в районах древних анортозитов и основных габброидных или норитовых массивов. Очень сходны по внешним свойствам полевые шпаты некоторых щелочных слепитов (например, лаурвикитов). Поиски лунного и солнечного камня должны быть приурочены к гранитным пегматитам, причем для солнечного камня характерны пегматиты в габброидных или амфиболитовых породах (из которых, очевидно, заимствуется Fe). Поиски амазонита, как правило, должны вестись в районах щелочных гранитных пегматитов, сопряженных (но не связанных непосредственно) с щелочными нефелиновыми породами.

Главнейшая литература

П. М. Татариков. Курс перудных месторождений. 1934, I, 38—54.

СЛЮДЫ (МУСКОВИТ)

Изложение очень важного вопроса о поисках и разведках на слюду я даю по Д. Т. Мишареву.

Широкое промышленное значение имеют только две разновидности слюд: мусковит и флогопит. Практическое использование других слюд сравнительно ничтожно. Лепидолит используется в качестве сырья для получения лития. Он встречается в пегматитовых жилах часто вместе со сподуменом. Биотит, обычный спутник мусковита, является скорее вредной примесью, понижающей часто качество и процент выхода мусковита, чем полезным ископаемым. Использование его ограничивается получением после обжига и размола порошка для краски цвета бронзы. Однако некоторые разновидности биотита обнаруживают довольно высокое пробивное сопротивление и, следовательно, могут быть использованы для электроизоляции.

К слюдам относится и так называемый вермикулит, получивший в последнее время довольно широкое применение для тепловой и звуковой изоляций, в обойном производстве и т. п. Вермикулит является продуктом изменения любых слюд, но чаще магнезиально-железистых. Процесс изме-

нения слюды выражается главным образом в гидратизации и потере щелочей. В результате получается продукт, обладающий способностью при нагревании до умеренной температуры сильно вспучиваться с увеличением в несколько раз против своего первоначального объема, а при достаточном нагреве в окислительном или восстановительном пламени может давать после размола поразительно легкий золотистый или серебристый порошок, известный в Америке под именем зонолита.

Большая часть промышленных слюдяных месторождений заграничных и союзных принадлежит мусковиту. Они встречаются во всех частях света. В противоположность этому, количество флогопитовых месторождений очень ограничено и почти исчерпывается тремя главными: Канадским, Мадагаскарским и нашим, Слюдянским. В отношении дальнейших перспектив слюдяной промышленности главная роль принадлежит также мусковиту.

В обычных горных породах и песках мусковит бывает только в виде мелких зерен и листков, в то время как промышленность, главным образом электротехническая, требует слюду в виде пластинок, имеющих в сыром виде размеры от 10 см² и более, причем цена за более крупные листы растет приблизительно в два раза быстрее, чем увеличивается их площадь. Следовательно, промышленная ценность слюдяных месторождений зависит в гораздо большей степени от процента крупных кристаллов, чем от общего выхода слюды из рудной массы. В США добываются слюдяные сланцы, богатые мусковитом, которые идут для размола на порошок. При обогащении первичных каолинов в качестве побочного продукта также получается мелкочешуйчатая слюда. Но ценность порошка и мелкочешуйчатой слюды ничтожна по сравнению с ценностью крупной листовой слюды, которую, кроме того, они ни в коем случае не могут заменить, в то время как самый слюдяной порошок в настоящее время обычно готовится из отбросов (скрапа), получающихся в большом количестве при добыче и обработке кристаллов слюды промышленных размеров. Поэтому задачей поисков и разведок является обнаружение таких месторождений, которые содержат кристаллы слюды возможно крупных размеров.

Практика слюдяного дела указывает, что крупные кристаллы мусковита и биотита, а следовательно, и промышленные слюдяные месторождения, приурочены исключительно к крупнозернистым пегматитовым жилам гранитного ряда. Мелкозернистые, а тем более графические пегматиты, если и содержат мусковит, то только в виде мелких листиков, имеющих небольшое промышленное значение.

Теоретически это обстоятельство хорошо объясняется геохимическими диаграммами, из которых видно, что кристаллизация крупнозернистых пегматитов происходит при температуре 600—550° С в пегматоидную фазу (D — E), которой именно свойственна наибольшая величина кристаллов, в данном случае мусковита, полевого шпата и кварца. Графический (и мелкозернистые) пегматиты образуются в фазу C при температурах 700—600° С. Однако крупнозернистая структура пегматитовой жилы, т. е. одна принадлежность ее к пегматоидной фазе, еще не решает вопроса о промышленной слюдоносности ее, так как в Карелии и в других местах известны крупнозернистые пегматиты, работающиеся только на полевой шпат и кварц и совсем или почти совсем не дающие слюды¹. Очевидно, кроме условий кристаллизации, необходим еще определенный химический состав

¹ Согласно идее Якоба, электротехнически наиболее ценны слюды наиболее ранних генераций.

пегматитового расплава в указанную фазу, благоприятный для образования мусковита, т. е. богатый K_2O , Al_2O_3 , F, B и OH.

Единственным несомненным отрицательным признаком в отношении слюдоносности является резко выраженная гиабиссальная природа гранита. Следовательно, кроме химического состава материнского гранитного очага, на слюдоносность его производных — пегматитов — должны иметь большое влияние условия их раскристаллизации, глубина, влияние боковых пород и продолжительность самого процесса кристаллизации.

Если на основании геохимической диаграммы и этих предположений составить себе схему раскристаллизации на большой глубине гранитного очага с выделением остаточного пегматитового расплава, то в идеальном случае будем иметь увеличение размеров зерен, слагающих пегматитовые жилы минералов (мусковита, полевого шпата и кварца) по мере удаления от гранитного массива, а в самих жилах — от зальбандов к центру.

Эта теоретическая схема дает серьезное, строго научное указание для поисков слюдоносных пегматитов. На основании этой схемы будет мало вероятным нахождение промышленных месторождений слюды в пегматитах, залегающих вблизи материнского гранитного массива или в самом теле гранита. Здесь будут концентрироваться более высокотемпературные редкоземельные минералы: монацит, ортит, торит и др., а слюдоносных пегматитов можно ожидать в некотором отдалении от гранитного массива, скорее всего в окружающих гранит породах, из которых наиболее благоприятными могут явиться залегающие на больших глубинах (впоследствии вскрытые эрозией) кристаллические сланцы и гнейсы, так как их сланцеватость может служить удобным путем для проникновения пегматитового расплава, а большая глубина залегания обеспечивает длительный период сохранения постоянной температуры и давления, необходимых для образования крупных кристаллов мусковита, кварца и полевого шпата.

Действительно, практика слюдяного дела подтверждает это теоретическое предсказание тем фактом, что большинство промышленных месторождений слюды, в том числе и крупнейшие мировые — приурочены к гнейсам и кристаллическим сланцам, и, наоборот, неизвестно ни одного сколь-нибудь крупного месторождения слюды среди полей гранитов и среди слабо метаморфизованных пород. Неоднократно высказывавшиеся работниками, имеющими дело непосредственно с добычей слюды, опасения об уменьшении или полном исчезновении ослюденения с глубиной в настоящее время не оправдываются ни теоретически, ни практически. Гранитный очаг, источник ослюденения, может быть удален на сотни метров, а то и километров от разрабатывающихся сейчас слюдоносных пегматитов. Наличие промышленного ослюденения в одном и том же месторождении или даже в одной и той же жиле, но на различных гипсометрических уровнях с разницей высот в сотни метров, примеры чему имеются буквально на каждом руднике, с несомненностью свидетельствует о продолжении ослюденения на большую глубину, возможно с постепенным обеднением, но без всякого намека на внезапное прекращение, а наличие хотя и непромышленных месторождений в самом гранитном теле доказывает, что предельная глубина ослюденения простирается до самого материнского гранита. Следовательно, в пределах 100—200 м и возможных эксплуатационных глубин можно предполагать практически одинаковый характер ослюденения, которому вообще, независимо от глубины, присуще непостоянство.

Поисковые признаки слюдяных месторождений сравнительно немногочисленны и могут быть сведены к следующим основным:

Положительные признаки

1. **Геологические.** Общим геологическим признаком является связь слюдоносных районов с глубинными интрузиями щелочных или нормальных гранитов. Однако этот признак не универсальный, так как материнские граниты могут быть и не вскрыты эрозией или отстоять на десятки километров от слюдоносного района. Другим более надежным признаком является наличие кристаллических сланцев и гнейсов. Главные слюдяные месторождения приурочены к кристаллическому комплексу, относимому всеми авторами к докембрию. Этот признак был отмечен еще Голландом в его классической работе о слюдяных месторождениях Индии. В этой работе он предсказывал вероятность наличия слюдяных месторождений в юго-восточной Африке, что впоследствии и подтвердилось.

Возраст материнских гранитов не может служить таким надежным поисковым признаком.

Типичным сибирским поисковым признаком на слюду общего геологического порядка является постоянное соседство и даже частичное перекрытие золотоносных и слюдоносных районов, что указывает на общую материнскую гранитную интрузию и часто общий комплекс вмещающих пород, отличающихся лишь различной степенью метаморфизма.

2. **Формы рельефа.** Слюдоносные районы, сложенные кристаллическими сланцами и гнейсами и включающие пегматитовые жилы, в результате глубокой денудации, дают характерный зубчатый неровный рельеф, особенно на водоразделах, что зависит от неравномерного разрушения при выветривании различной крепости прослоев кристаллической толщи, а в особенности более крепких пегматитовых жил, которые очень часто образуют выступы в виде даек или различных причудливых форм («каменные палатки»). Хотя в большинстве случаев эти выступы сложены мелкозернистым и письменным пегматитами, не содержащими промышленной слюды, но наличие их указывает на возможность находки и слюдоносных пегматитов, которые обычно вследствие своей крупнозернистой структуры быстро разрушаются и не выступают на поверхность.

Следовательно, общим благоприятным поисковым признаком для слюдяных месторождений следует считать наличие докембрийского кристаллического комплекса, инъецированного пегматитовыми жилами. Но этот признак может служить скорее для общего планирования поисковых работ, чем для непосредственных поисков, для производства которых нужны более конкретные прямые поисковые признаки петрографического и минералогического характера, к формулировке которых и перейдем.

3. **Прямые поисковые признаки.** а) Непосредственные находки кристаллов слюды величиной в ладонь или даже с поперечными размерами в 5—6 см служат уже достаточной гарантией наличия слюдоносной жилы. Наличие совместно со слюдой крупных кусков до 10 см в поперечнике полевого шпата или кварца является бесспорным поисковым признаком.

б) Скопление менее крупных выветрелых листков слюды в почвенном слое («парга» первых слюдяников) также указывает на наличие и близость слюдоносной жилы.

в) Находки отдельных кусков полевого шпата и кварца или крупнозернистого пегматита в большинстве случаев также могут служить верным непосредственным признаком слюдоносности, но в отдельных случаях

мы можем встретить и чисто керамические пегматиты, не содержащие слюды или с ничтожным процентом ее выхода.

г) Указанные непосредственные поисковые признаки вполне равноценны находкам старинных слюдяных ям со слюдой, полевым шпатом, кварцем в отвалах, но эти последние (ямы) имеют то преимущество, что по количеству и размерам выработок, количеству и качеству отбросов слюды можно получить уже и некоторые технико-экономические показатели. Поэтому находка следов старых слюдяных работ все же является лучшим поисковым признаком.

Отрицательные признаки

Отрицательными признаками общего геологического характера, как уже можно заключить из вышеизложенного, является отсутствие пород кристаллического комплекса, точнее глубинных фаций метаморфизма, а при наличии последних — отсутствие пегматитовых жил, как результат отсутствия или удаленности глубинных гранитных интрузий.

Искать слюду непосредственно на площади развития гранитных интрузий бесполезно, что подтверждается и практикой и теорией. Следовательно, в этом смысле сами по себе обширные поля гранитов являются вторым отрицательным признаком общегеологического порядка и должны исключаться при определении общей площади того или иного слюдоносного района.

Главнейшая литература

- Пегматиты СССР. Изд. Акад. Наук СССР, 1937, I (со статьями А. Е. Ферсмана, М. Н. Альтгаузена и др.).
 П. М. Т а т а р и н о в. Курс нерудных месторождений. 1934, I, 55—78.
 А. Е. Ф е р с м а н. Пегматиты (2-е изд.). 1932, 191, 598.
 Н. M o h r. Der Nutzglimmer. Berlin, 1930.
 Н. S. S p r e n s e r. Mica. Ottawa, 1929.

СЕРПЕНТИНИТЫ И ОЛИВИНИТЫ

Поиски ультраосновных пород и продуктов их гидротермальной переработки приобретают в настоящее время большое значение в виду выясняющихся многочисленных способов применения этих пород в химической, огнеупорной, дорожной и других видах промышленности. Как показали наблюдения Н. Е. Ефремова на Северном Кавказе, наибольшей разлагаемостью и активностью характеризуются неизменные оливиниты и серпентиниты, обогащенные орточастицей. Отсюда можно сделать тот важный вывод, что практически ценнее неизменные или мало измененные чистые оливиновые массивы, которые вообще наблюдаются лишь в ядрах, более глубоких частях основных магнезиальных магматических комплексов или высокотемпературных взрывных трубках, богатых CO_2 (но не H_2O).

О серпентинитовом асбесте см. стр. 723.

ТАЛЬК (СТЕАТИТ)

Образование талька связано с двумя процессами — оталькованием мзеевиковых и оливиновых пород или замещением карбонатов магнезиальными растворами. Первый ведет к образованию листоватого или чешуйчатого талька, второй — сплошного плотного стеатита. Геохимически ход процессов можно наметить так:

Оливин	Серпентин	Метасиликат	Тальк	Сепиолит	Mg-опал
Mg_2Si	Mg_3Si_4	$MgSi$	Mg_3Si_4	Mg_4Si_3	$SiO_2 \cdot H_2O$

Этот ряд отвечает повышению содержания кремния и играет и хронологически и пространственно огромную роль в ряде процессов изменения или перегруппировки ультраосновных пород.

Поиски талька надо вести в рассланцованных зонах основных, богатых Mg пород, поиски стеатита, может быть, в контактных зонах гранитов с филлитами, хотя последний тип не очень ясен.

Аналогами с кристаллохимической, минералогической и технической стороны являются: для талька — пирофиллит, для стеатита — агальматолит (колыб-таш). Для пирофиллита внешние признаки при поисках те же, что и для талька, для агальматолита — связь с гранит- и кварцпорфирами.

Главнейшая литература

П. М. Татарinov. Курс нерудных месторождений. 1934, I, 224—251.

ТОПАЗ

Минерал, имеющий скромное применение как самоцвет, но весьма интересный как оптическое или техническое сырье. Генетически преимущественно связан с кислыми дериватами гранитной магмы, в меньшей степени — с пневматолитами и особенно — с пегматитами чистой линии геофаз D — E и изредка даже F — G (в кварцевых дериватах последних). Практическое значение имеет лишь парагенезис геофаз D — E, где он встречается вместе с темным дымчатым кварцем и ортоклазом в пустотах пегматитовых жил.

Частично возможно использование топаза как абразивного материала; в этом случае могут найти применение отбросы при добыче касситерита из некоторых обогащенных топазом грейзенов или гранитов.

ФЛЮОРИТ

См. поиски фтора, стр. 680.

Особое применение имеют чистые, прозрачные, бесцветные разности для оптических приборов — обычно в жилах среди чистых известняков с небольшим содержанием каолинита, барита, редко свинцового блеска. Для декоративных целей имеют значение зонарно окрашенные разности, которые наблюдаются обычно в рудных жилах (иногда метасоматического происхождения).

ЯШМЫ

Понятие яшмы — собирательное. В своей основе яшма состоит из очень мелкого агрегата зернышек кварца с небольшим количеством халцедона в цементе или в пустотах. Поэтому мы имеем весьма многообразные типы яшм, связанные с окварцеванием различных образований:

1. Кварцевые и радиоляритовые осадки морских бассейнов средних глубин, нередко переслаивающиеся с марганцовыми рудами (тоже богатыми SiO_2) и с образованиями диабазовых подводных извержений и их туфами.

2. Контакты диабазовых покровов с глинистыми или иными отложениями, с их окварцеванием в постмагматическую фазу.

3. Окварцованные кварцпорфиры в их поверхностных изменениях, проникнутые постмагматическими кремневыми растворами.

4. Окремненные породы разного типа — карбонаты, глины и т. д. с ясными процессами метасоматоза и замещения через SiO_2 в горячем состоянии (силекситы, роговики, окремненные породы).

Глава VIII

ГЕОХИМИК В ПОЛЕ ¹

ВВЕДЕНИЕ

Настоящая глава состоит из двух частей. В первой излагается ряд практических советов для геохимика, работающего над поисками полезных ископаемых и геохимическим изучением какого-либо района. Во второй дается краткое перечисление основных методов геохимической работы в той последовательности, какую он должен применять при своей полевой работе. В основе и того и другого лежит положение, которое хорошо усвоено исследователями последнего времени: научная полевая работа в общем складывается из трех частей — из подготовительной стадии, проведения самого исследования и вывоза и обработки материалов. В то время как полярные исследователи, как, например, Р. Амундсен, главное внимание обращали на первую часть, а известный исследователь Китая, Рихтгофен, на последнюю, — Н. М. Пржевальский и П. К. Козлов в своих работах особое внимание уделяли второй части, т. е. правильной и продуманной организации самой экспедиции и полевой работы.

Нет никакого сомнения, что все три части являются одинаково важными и каждая из них требует к себе внимания и продуманного отношения. Еще де Соссюр говорил, что «хорошо путешествует тот, кто много знает и много размышляет», а Рихтгофен совершенно справедливо прибавлял, что среди всех инструментов, которые должны быть в распоряжении исследователя, самым острым и самым важным является его глаз, от внимания которого не должны ускользать самые ничтожные явления, ибо в них нередко залог особо крупных и важных выводов.

СНАРЯЖЕНИЕ

Вопрос о продуманном снаряжении в полевой работе представляется особо важным для геохимика, так как требует, помимо обычного геологического вооружения, еще ряда дополнительных приборов для физических и химических исследований. При этом необходимо считаться прежде всего с теми методами передвижения, которые имеются в данном районе, и поэтому в план самой экспедиции должен включаться весьма серьезный анализ веса и габарита самого снаряжения. Если опасным является недостаток в хорошем оснащении экспедиции, то большим минусом, с другой стороны, в ряде случаев является его избыток, затрудняющий передвиже-

¹ Кроме больших руководств К. И. Богдановича, Рихтгофена, Кейльгака, Неймайера и др. см. популярное изложение в книге А. Е. Ферсмана: Краткое руководство к собиранию минералов. Пг., 1920, стр. 1—30. Лучшей практической книгой является «Полевая геология» В. А. Обручева в двух томах (1932). Из иностранных руководств укажем популярную книгу: P. Zodac. How to collect minerals. New York, 1934, 1—80.

ние экспедиции и создающий такие трудности, которые замедляют передвижение или даже исключают посещение некоторых трудно доступных районов¹.

Общее снаряжение исследователя должно прежде всего состоять из молотков разных типов. Для пород осадочных и мягких необходимо, чтобы молоток совмещал в себе свойства молотка и легкой кирки; его палка должна быть примерно длиной в 40 см, причем должна быть насажена так, чтобы в руках был ее узкий конец, а более широкий препятствовал при ударе соскочить молотку. В районах твердых горных пород необходимо иметь молоток более тяжелый (в 1—2 кг) с рукояткой длиной примерно 70 см. На рукоятке должны быть нанесены сантиметры, чтобы иметь всегда под рукой точные масштабы для измерения. Кроме того, при больших работах надо иметь, с одной стороны, тяжелую кувалду до 5 кг весом, а с другой — небольшой молоточек легкого веса с короткой рукояткой в 20—30 см для отбивания мелких кусков или же для придания образцам определенной формы. Кроме молотка, необходимо иметь набор зубил различной формы и величины. Из другого снаряжения перечислим: увеличительное стекло (лупу не выше 8-кратной), горный компас, рулетку, перочинный ножик, записную книжку с карандашом, специально заготовленные и перенумерованные этикетки величиной 6×4 см, большое количество оберточной бумаги, некоторое количество маленьких стеклянных банок для сбора ценных и нежных образцов и кристаллов, плотных и прочных коробочек различной величины; для сыпучих и землистых тел важно иметь набор парусиновых мешочков с проставленными на них номерами.

Кроме указанного снаряжения, необходимо иметь легкую фотоаппаратную камеру (лучше всего ФЭД), барометр анероид и набор цветных карандашей для зарисовки геологических и геохимических схем.

При работах более стационарного характера это элементарное снаряжение должно быть дополнено: во-первых, простым прибором для измерения в поле радиоактивности пород и в особенности — радиоактивности вод; во-вторых, прибором для люминесцентного анализа и специальным полевым набором необходимых приспособлений для элементарных работ с паяльной трубкой. Всегда полезно иметь с собой небольшие скляночки с кислотами разной крепости, хороший древесный уголь, платиновую проволоку, соду и буру.

Очень серьезным вопросом является укладка и распределение самого оборудования. Часть его должна укладываться в крепкие, не пропускающие влаги мешки, приспособленные для ношения на спине (рюкзаки); другая часть должна укладываться в ящики, приспособленные для тех методов передвижения, которые намечаются в данном районе, и здесь должен быть проявлен максимум внимания и опыта, чтобы не сделать грубых ошибок и не затруднить транспорт.

УКЛАДКА СОБРАННЫХ МАТЕРИАЛОВ²

Вопрос об укладке и транспорте собранных минералогических материалов представляет очень серьезную задачу, на которую нужно обратить самое большое внимание.

Тщательная упаковка и завертывание каждого образца в отдельную бумагу с прибавлением этикетки представляет необходимейшее условие

¹ Детальное и очень полезное описание снаряжения см.: В. А. Обручев. Полевая геология. 1932, I, 9—55.

² См. ценные практические указания у В. А. Обручева. Там же, стр. 73—75.

хорошего сбора. Надо принять за правило никогда не заворачивать в бумагу вместе несколько образцов, как бы малы они ни были, а всегда их перекладывать бумагой. Сколько раз из-за небрежности в упаковке погибали прекрасно собранные материалы, особенно образцы мягких минералов. Поэтому при упаковке нужно различать нежные и мягкие образцы от твердых и упаковывать их отдельно. Каждый образец должен заворачиваться в 2—3 листа бумаги, но ни в коем случае не следует эти листы заранее складывать вместе. Этикетка к каждому образцу, сложенная вдвое, кладется не непосредственно на штуф, а после первого слоя бумаги; при этом необходимо иметь в виду, что этикетки надишсываются простым, но ни в коем случае не черпильным карандашом. В случае хрупких и нежных щеток кристаллов их следует покрывать сначала тонкой папиросной бумагой и тампоном из ваты и только потом уже заворачивать в большие листы бумаги.

Укладка материалов, собранных экспедицией, проходит через ряд этапов, к которым нужно относиться весьма внимательно. Первый этап — каждодневный сбор и переноска к лагерю. Практически мной за 50 лет сбора минералов принят был такой метод. В каком-либо месте ведется сбор геохимического и минералогического материала, все образцы, найденные соответственной группой работников, сносятся в какое-нибудь место (около привала) в гораздо большем количестве, чем это нужно. Затем по окончании работы (вечером) весь собранный материал разбирается, формируется, отбираются лучшие типичные образцы и временно осторожно укладываются в наплечные мешки. В постоянном лагере образцы складываются в надежное и сухое место и в конце определенного периода работ рассматриваются вновь, заворачиваются в бумагу для дальнейшей укладки в плотные и крепкие ящики весом не более 50 кг каждый. Укладка в большие ящики вообще не рекомендуется, так как камни при этом подвергаются перетиранию, а очень тяжелые ящики при транспорте, перегрузках и пр. могут испытать повреждения. Дальнейшая отправка материалов должна вестись непосредственно самой экспедицией. Оставление образцов на попечение кого-либо из местных жителей обычно приводит к роковым последствиям, и коллекции или попадают с опозданием или вовсе не попадают в руки исследователя.

По получении в Институте материалов необходимо тщательно разобрать привезенные ящики и обязательно разместить образцы вместе с этикетками в соответственные коробки, так как путаница в этикетках может привести к непоправимому вреду и нередко к неверным и опасным выводам.

При сборе, однако, возникает всегда первый вопрос: в каком виде и сколько брать? Надо сказать, что на него ответить довольно трудно, и хороший сбор минералогического материала дается лишь долгим опытом и большим знанием природы. Необходимо, несомненно, наличие некоторого художественного чутья, чтобы взятый образец по своему соотношению форм и красок оттенял именно тот минерал, для которого он взят. Таким образом, некоторым образцам нельзя придавать одну определенную форму, в то время как для других, наоборот, желательны определенные размеры и формы, примерно 9×12 или 6×9 см.

СБОР МАТЕРИАЛОВ ПРИ ГЕОХИМИЧЕСКИХ ПОИСКАХ

Геохимические поиски и сама геохимическая методика исследования требуют специального сбора материала. Поскольку камеральные работы геохимиков связаны со специальными минералогическими, химическими, спектроскопическими и рентгеновскими исследованиями, сбор материала

представляет очень ответственную задачу: от качества и продуманности сбора в значительной степени зависит успех геохимического анализа.

Что же требуется от такого сбора?

1. Прежде всего необходимо достаточное количество материала не только для оптических исследований, но и для химических определений, причем детальным химическим анализам предшествует в иных случаях обогащение с отделением аксессуарных минералов. Поэтому необходимы десятки килограммов образцов наиболее характерных пород и минеральных ассоциаций.

2. Для минералогических исследований, кроме того, необходим сбор отдельных минералов как для того, чтобы выяснить порядок последовательности выделения минералов, так и для отбора хорошего чистого материала важнейших минералов для анализов.

3. Необходим сбор материала не только для лабораторных исследований, но и для сохранения типичных музейных образцов. Эта задача важна не только для целей чисто демонстрационного характера; большие типичные образцы позволяют проводить сравнение этих минералов с образцами других месторождений.

Сравнительный метод анализа есть один из методов исследований натуралиста. Исследователь геохимик не должен делать ошибок старой минералогической школы, он должен обращать серьезное внимание на все мелкие проявления каких-либо химических элементов; даже пыточные корочки, продукты выветривания, должны собираться им так же тщательно, как красивые шпуды с хорошими кристаллами.

Вообще, как руководящее правило, надо рекомендовать всем исследователям брать как можно больше материала. Лучше потом в институте выбросить все лишнее, чем не собрать полного материала по всему комплексу минералов и химических элементов изучаемого района. При сборе образцов никогда не надо убаюкивать себя мыслью, что вернешься в другой раз на это же место и соберешь дополнительно новый материал. Такие надежды далеко не всегда оправдываются, и часто сбор остается неполным, случайным и малоценным.

ЗАПИСЬ НАБЛЮДЕНИЙ

Вопрос о записи наблюдений в полевой работе представляется очень важным и серьезным. Еще Рихтгофен совершенно справедливо говорил, что путешественник и исследователь должны носить карандаш на веревочке вокруг шеи, ибо, по его мнению, чем легче доставать карандаш, тем чаще будешь записывать. Записи должны вестись двумя путями. Прежде всего, на каждой этикетке, приложенной к данному образцу, желательно ставить не только точное указание места и даты сбора, но и некоторые данные о тех условиях, в которых образец взят. Чем точнее указание места находки, тем легче в дальнейшем использовать собранный материал. Однако главная запись ведется в полевой записной книжке, и безукоризненное заполнение последней должно быть предметом постоянной заботы исследователя; успех многих исследований зависит от того, насколько тщательно, продуманно и полно ведутся полевые журналы. Запись наблюдений должна вестись прежде всего на месте работ, охватывая для каждого данного места все наблюдения и приходящие при этом в голову мысли. В конце дня должна даваться сводка всего материала, причем должны вестись дневники того, что сделано за это время. Очень важно нанесение от руки в записную книжку схематических карточек мест, в которых про-

исходила работа и где взяты отдельные образцы. Полнота и точность записей в записной книжке служат вообще лучшим показателем работы, и одной из грубейших ошибок полевых исследователей является надежда на свою память. Внесение дополнительных данных по памяти в полевую книжку или в этикетки — метод очень опасный, который нередко ведет к обесцениванию сборов и к неверным выводам.

Необходимо подчеркнуть, что есть большие трудности в ведении хорошего полевого журнала. Он обычно может составляться лишь вечером, по окончании тяжелого полевого дня, когда исследователь уже устал и стремится к отдыху. Нередко необходимо напряжение воли, чтобы все же заставить себя посвятить хотя бы 15 минут записи полевых дневных наблюдений. Нередко — это было и в моей практике — начинаешь вследствие переутомления запускать журнал. Тогда лучше сделать дневку и посвятить несколько часов спокойному деловому его исправлению.

Полевые журналы должны храниться особенно тщательно, их нельзя никому отдавать ни во время работы, ни после нее, так как они являются основным документом, который следует всегда носить при себе вместе с другими важнейшими документами экспедиции.

После возвращения в исследовательский институт и разбора коллекций наступает второй момент подведения итогов полевой работы. Я придаю ему очень большое значение и полевой отчет ставлю во многих отношениях выше окончательного, ибо он обычно объективно подытоживает непосредственные полевые наблюдения и этим самым приобретает ценность, не всегда присущую детально проработанному окончательному отчету, на который влияли и прочитанная литература и мнения других исследователей, и целый ряд посторонних обстоятельств. Отчет, написанный под первым впечатлением самой поездки, нередко является гораздо более правильным и более глубоким с точки зрения постановки самих проблем, чем более поздняя надуманная и обработанная сводка.

МЕТОДЫ И ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ РАБОТЫ¹

При отъезде в поле на геохимике лежит задача провести ряд подготовительных работ помимо подготовки того снаряжения, о котором было сказано выше. Эти подготовительные работы должны заключаться в следующем.

Прежде всего необходимо ознакомление с имеющейся литературой по данному району и по данному вопросу. Если задачей поисковой работы являются поиски определенного химического элемента, то необходимо детальное ознакомление со свойствами его и его соединений. Во всех случаях исследователю, помимо изучения существующей литературы, надо знакомиться детально в музее как с образцами, типичными для данного района, так и с теми минералами, которые характеризуют элементы — объекты поисков. Особенно важно своевременно озаботиться получением детальных топографических и геологических карт или их копий для того, чтобы во время экскурсии начертить цветным карандашом ее путь и места нахождения наиболее интересных минералов.

До отправки в экспедицию надо обязательно детально ознакомиться со всеми методами полевых исследований и точно знать не только как пользоваться теми приборами, которые геохимик берет с собой, но и как их исправлять.

¹ В. А. Обручев. Полевая геология. 1932, I, 55—79.

Второй этап работы начинается по прибытии исследователя на место. Работа должна начинаться с ознакомления с тем, что известно о данном районе в местных ученых обществах, музеях, библиотеках, школах. Необходимо среди местного населения собирать сведения о всех тех местах, где добывают руду, где имеются естественные обнажения¹. Если где-либо идет постройка дома или настилается мостовая, нужно расспросить, откуда привозится материал, выяснить, где проводится новая дорога, строятся мосты или железнодорожные линии. В колхозах и совхозах надо расспросить, где роются колодцы, где берут глину для печей, известку или краску для домов. Местное население нередко знает о том, что в данном районе раньше работали изыскательские партии, у многих старых знатоков края сохранились воспоминания о руде в том или ином районе². Конечно, наибольший материал для предварительного знакомства с минералогией и геохимией района дают не столько естественные обнажения, сколько искусственные выработки, именно отвалы при рудниках и разработках, которые дают минералогу и геохимику незаменимый и притом нередко совершенно свежий материал. В рудных месторождениях накапливаются громадные количества тех спутников, которые сопровождают руду, и поэтому в отвалах копей нередко можно собрать интересный материал, в течение многих дней следуя за новыми добычами и разбирая минералы на свежем воздухе в только что отломанных образцах. Отвалы и штабели добытой руды и камня в общем дают минералогу или геохимику гораздо более ценный материал, чем самые подземные выработки, где в забоях трудно вести точные наблюдения. В открытых разработках и рудниках очень полезно беседовать с рабочими, расспрашивать их о встречающихся образцах, обращать их внимание на интересные вещи, просить их откладывать все, что бросится им в глаза. Можно и нужно заинтересовать местное население, которое полезно посвящать в свои работы, рассказывая о тех полезных ископаемых, которые имеются и которые разыскиваются. Создание определенной общественной обстановки, сочувствие и содействие местного населения является одним из важнейших факторов успеха в поисковой работе. Местное население начинает заинтересовываться, даже ребята приносят с реки образцы галек и валунов, и надо сказать, что нередко самые крупные открытия новых месторождений делаются местным населением и местными любителями.

В каждом данном обнажении, каменоломне, разработке и руднике нужно стараться собрать образцы всех минеральных тел, которые здесь встречаются, обращая внимание как на крупные их скопления, так и на ничтожные следы, указывающие на наличие тех или иных геохимических процессов.

Сбор материалов, конечно, должен сопровождаться наблюдениями над залеганием минералов в породе, над их соотношением, возрастом и т. д. Первичное ознакомление с районом дает возможность исследователю подойти к его геохимическому исследованию. Этим задачам чисто научно-исследовательского характера посвящено последующее изложение.

Геолог и петрограф начинают свою работу в поле с изучения общей геологической обстановки, тектоники, взаимоотношений горных пород;

¹ В ряде случаев очень важным является анализ географических названий, которые нередко указывают на существование в данной местности рудников или добычи: например, в Средней Азии слово «кан» говорит о руднике, «гумыш» — о серебре, «калба» — об олове или бронзе, и т. д. См. статью Л. А. М и к л ю т и н о й. Значение географической карты для поисков руд. «Разведка недр». 1938, № 12, 2 — 9.

² В ряде районов очень важно выяснить наличие древних выработок, старых отвалов руды и шлаков, остатков плавильных печей и т. д.

для этой цели обычно ему необходимо сначала широко охватить целую территорию и потом уже приступить к детальному изучению данного конкретного участка. Работа геохимика протекает обычно иначе; он по существу своей работы должен начать с конкретного материала, т. е. с самого месторождения. На фоне знания общей геологической схемы района он должен начать свои исследования со штабелей добытой руды и отвалов боковой породы. Этим намечается довольно резко различие в методах подхода со стороны геологов и геохимиков, о чем можно легко судить во время экспедиций или экспедиций.

Прибыв на какое-либо месторождение, геолог идет немедленно в штольню или шахту для осмотра забоев, а также в первую очередь наблюдает выходы отдельных пород, естественные обнажения и т. д.

Геохимик и минералог направляются прежде всего к штабелям руды и отвалам. В самый забой они должны идти только тогда, когда их глаз на свету научится различать отдельные минералы, ибо определение минеральных видов при искусственном освещении забоя представляет очень трудную задачу и достигается лишь большим и долгим опытом. Только после хорошего изучения минералов в штабелях и отвалах геохимик должен перейти к исследованию более общих генетических и геохимических задач, для чего он переносит свою работу как на изучение естественных обнажений, так и на детальное исследование самих забоев и имеющихся для них зарисовок. Отсюда становится совершенно понятным, почему минералог и геохимик при приходе на рудник направляются обычно даже не к штабелям руды, а к отвалам боковой породы. Я лично нередко наблюдал не только удивление, но и прямое неудовольствие местного технического и инженерного персонала, когда я сразу по приезду шел не на рудник, а направлялся к отвалам. Мы не должны забывать, что разгадка самых сложных проблем месторождения и понимание его генезиса дается лишь путем детального изучения всех наблюдаемых минеральных комплексов, их соотношения между собой, их связи с боковыми породами и т. д.

Таким образом намечается следующая последовательность работы геохимика при первом сборе научных материалов: детальный осмотр отвалов, потом штабелей; далее — забоев в открытых разработках, обнажений, и лишь после всего этого — осмотр подземных выработок и изучение соотношений минералов в свежих подземных забоях.

Как мы уже говорили выше, сбор материалов должен сопровождаться со стороны геохимика постоянным анализом всех минералогических и геохимических соотношений, а потому необходимо, чтобы он заострил свой глаз на детальном сопоставлении всех наблюдений. Я вспоминаю, что намеченная Михеевым и мною теория связи пегматитовых процессов с образованием изумрудов на Изумрудных Копях долгое время не встречала сочувствия, пока несколько ничтожных кристаллов колумбита не подтвердили, что мы имеем дело с типичными гранитными пегматитами.

Продумывая все наблюдения, геохимик должен мысленно устанавливать соотношения между отдельными минералами, воссоздавать те условия, при которых они образовались, подвергать на основании своего опыта сравнительному анализу и таким образом постепенно приходить к той или иной рабочей гипотезе о генезисе данного месторождения. Такая гипотеза совершенно необходима для дальнейшей работы поисковой и разведочного характера, но нужно не забывать, что рабочая гипотеза не должна заслонять самих фактов. Если факты идут вразрез с гипотезой, то надо ее отбрасывать. Самая глубокая самокритика и самоанализ необходимы при этой работе, и успех поисковых и разведочных работ заключается именно в умении из маленьких, еле заметных фактов построить такие

выводы, которые помогут связать все явления между собой и подсказать те, которые еще неизвестны. Всякая рабочая гипотеза хороша только постольку, поскольку она намечает новые пути. Я сознательно подчеркиваю этот вопрос, ибо очень часто полевые работники не хотят отказаться от своей первой рабочей гипотезы даже тогда, когда новые факты начинают решительно ей противоречить.

Вместе с тем необходимо подчеркнуть еще одну сторону, которая, к сожалению, в работах последнего времени не всегда проводится достаточно резко в жизнь. Исследователь должен четко различать самый факт и его наблюдения, с одной стороны, теоретические и общие выводы — с другой. При составлении как полевых, так и окончательных отчетов исследователь должен резко разделять эти две части так, чтобы каждый мог видеть, что является фактическим материалом наблюдений и где начинаются логические и теоретические построения автора. Необходимо предостеречь молодых исследователей от отодвигания на задний план конкретного фактического материала в увлечении заключительными выводами, которые в таком случае оказываются висящими в воздухе. Вот почему приходится с особой настойчивостью подчеркивать необходимость точного и тонкого наблюдения самих природных явлений. Исследователь в поле должен записывать все те мелочи, которые бросаются ему в глаза при наблюдении природных явлений. Он должен зарисовывать все взаимоотношения, должен превратить свою полевую записную книжку в постоянный дневник его собственных мыслей и наблюдений, и только этим путем он сможет подойти к правильным выводам и решениям. При этом приходится довольно резко различать характер работ и записей в первый год посещения какого-либо месторождения или района и в годы последующие. При первом посещении необходимо особенно следить за накоплением чисто фактического материала; при втором обычно возникает уже необходимость проверки созданной рабочей гипотезы; наконец, при третьем выявляются уже проблемы общего характера и обычно третий год приносит новые открытия и подсказывает направление точных методов поисков. Сближение этих сроков возможно и зависит от опыта исследователя и от того, насколько до него данное месторождение или район были изучены с геологической и минералогической точек зрения.

Значительное ускорение в постановку окончательной проблемы вносится организационно во время полевых работ предварительным определением встречающихся минералов и горных пород. Переносные геохимические лаборатории, возможность вовремя работ отдавать некоторые образцы для количественных анализов в ближайшие лаборатории в значительной степени облегчают ход полевых исследований и позволяют значительно скорее подойти к окончательным выводам. Это же относится к применению в полевой работе возможно большего количества тех специальных методов, которым посвящены главы III и IV и совокупность которых позволяет нередко решать безошибочно на месте нужные задачи.

Ведение записей и геохимическая и минералогическая документация представляют на основании сказанного очень серьезную задачу, причем я рекомендую пользоваться для этой цели прекрасной книгой В. А. Оbrucheva: Полевая геология. 1932, II, 183—207.

Краткий указатель литературы

Помимо частной литературы, приведенной в тексте, мною дается ниже список главнейших справочных изданий по минералогии, геохимии и поисково-разведочному делу. Звездочкой слева отмечены наиболее полные, полезные и важные издания.

Общая литература

- * Спутник геохимика и минералога. Ломоносовский инст. Акад. Наук СССР, 1937, 1—415 (очень полезное справочное издание).
- А. К. Болдырев и др. Курс минералогии. ОНТИ, 1936, 1—1016.
- В. И. Вернадский. Опыт описательной минералогии, I—II. Изд. Акад. Наук СССР, 1908—1922.
- * В. И. Вернадский. Очерки геохимии. ОНТИ, 1934, 1—580.
- В. И. Вернадский. История минералов земной коры. 1923—1925, I; 1927—1934, II.
- В. И. Вернадский и С. М. Курбатов. Земные силикаты, алюмосиликаты и их аналоги. ОНТИ, 1936, 1—378.
- * Э. Дапа. Описательная минералогия. ОНТИ, 1937, 1—470.
- Э. Каген и В. Уоттон. Минералогия редких металлов (руководство для проспекторов). ОНТИ, 1933, 1—253.
- Н. И. Кокшаров. Materialien zur Mineralogie Russlands. [Материалы к минералогии России.] I—XI, СПб., 1853—1891.
- * П. Ниггли. Генетическая классификация магматических рудных месторождений. Геолразведиздат, 1933, 1—92.
- В. А. Обручев. Рудные месторождения. Часть описательная, 1935, 596.
- Г. Ремис. Учебник неорганической химии. ОНТИ, 1933, I, II.
- П. М. Татаринов и др. Курс нерудных месторождений. 1934, I, 1—600; 1935, II, 1—335.
- А. Е. Ферсман. Драгоценные и цветные камни России. Изд. Акад. Наук СССР, 1920, I, 1—420; 1925, II, 1—386.
- А. Е. Ферсман. Геохимия России. Изд. Хим.-теор. лит., 1922, 1—214.
- * А. Е. Ферсман. Пегматиты. I (издание 2-е). Изд. Акад. Наук СССР, 1932, 1—665.
- А. Е. Ферсман. Занимательная минералогия (изд. 5-е). Л., Детиздат, 1937 (популярное издание).
- А. Е. Ферсман. Цвета минералов. Изд. Акад. Наук СССР, 1936, 1—156.
- А. Е. Ферсман. Геохимия. 1933, I, 1—328; 1934, II, 1—354; 1937, III, 1—503; 1939, IV, 1—450.
- F. Angel u. Scharitzer. Grundriss der Mineralparagenesen. Wien, 1932.
- G. Berg. Vorkommen und Geochemie der mineralischen Rohstoffe. Leipzig, 1929.
- Перевод: Г. Берг. Геохимия месторождений полезных ископаемых. М., 1933, 1—352.
- E. S. Dana. The system of mineralogy. New York, 1892.
- E. S. Dana. Textbook of mineralogy. New York, 1932.
- R. Ladoo. Non-metallic minerals. New York, 1925.
- W. Lindgren. Mineral deposits. 3 ed. New York, 1928.
- P. Niggli. Lehrbuch der Mineralogie. 2-te Auflage, 1926, 1—697.
- P. Niggli. Ore deposits magmatic origin. London, 1929 (перевод с немецкого издания 1925 г.).
- I. Spurr a. F. Wormser. Marketing of metals and minerals. New York, 1925.

Специальная литература

- * Материалы к методологии поисков и разведок полезных ископаемых. Геол. изд., 1932, 1—554.
- * Методы и организации комплексной геологической съемки. Гос. н.-т. геол.-разв. изд., 1933, 161 (очень полезная книга, особенно стр. 88—125).
- Методы исследования и опробования жидких полезных ископаемых. 1933, 1—384.
- Принципы оценки месторождений полезных ископаемых в СССР, I. Изд. ЦНИГРИ, 1934 (с рядом статей), 1—124.
- А. С. Амеландов. К вопросу о поисках и разведках керамических пегматитов. Материалы к методике поисков и разведок полезных ископ., ОНТИ, 1933.
- Б. Н. Артемьев. Опробование и техническая документация пегматитовых и пневматолитических рудных месторождений. Геолгиз, 1931.
- А. Д. Архангельский. Где и как искать новые нефтеносные области в СССР. Нефт. хоз., 1929, XIV, № 6, 791—796.
- * Н. В. Барышев, В. И. Красников и Б. С. Левоник. Методика поисков и разведок. Подсчет запасов. ОНТИ, Главн. ред. горно-топл. и геол.-разв. лит., М., 1937, 250.
- Н. В. Барышев, Б. И. Воздвиженский, Г. Г. Гудалин. Разведка металлических ископаемых. ОНТИ, 1938, 348.

- А. Г. Бетехтин. К вопросу об изучении рудных месторождений. Изв. Акад. Наук СССР, серия геол., 1939, № 2, 101—108.
- * И. С. Васильев и др. Курс методики разведочного дела. ОНТИ, 1933, 1—544.
- В. Н. Вебер. Методы геологической съемки. (Полевая геология). М.—Л., Главн. ред. горно-топл. и геол.-разв. лит., 1937, 240. Для нас интересны стр. 36—50 (подготовка к полевой работе).
- В. С. Домарев. Поиски и разведки полезных ископаемых. 1931.
- Н. А. Дюкалов. Мировая торговля драгоценными и полудрагоценными камнями. 1932.
- К. Краг. Поиски нефти. 1923, 1—345.
- * С. С. Кузнецов. Поиски полезных ископаемых. Л., 1935, 1—112 (особенно стр. 53—70).
- С. В. Кумпан. Основы классификации и подсчета запасов в осадочных месторождениях. М., Изд. Акад. Наук СССР, Технич. отд., 1937.
- Л. П. Левитский. Внимание историческим и археологическим указаниям при разведках. Разв. недр, 1939, № 3.
- Е. В. Милановский. Геологические карты, их чтение и построение. Геолразведиздат, 1933, 131.
- Д. В. Никитин. К вопросу о методах геолого-поисковых и геолого-разведочных работ в областях с россыпными месторождениями полезных ископаемых. ЦНИГРИ, 1932, 1—10.
- ** В. А. Обручев. Полевая геология. Гос. горн. научно-техн. изд. 1932, I, 1—304; 1932, II, 1—320 (особенно стр. 153—207).
- Р. Пиль. Поиски и разведка рудных месторождений. 1931, 1—150.
- К. Рейборн и Г. Мильнер. Поиски и разведка аллювиальных месторождений. ОНТИ, 1933, 1—393.
- С. И. Таубер. Материалы по методике разведки и подсчета запасов полезных ископаемых. Каменные строительные материалы. М.—Л., ОНТИ, Глав. ред. геол.-разв. и геодезич. лит., 1936, 55 (ГГУ НКТП СССР, Центр. Комиссия по запасам полезных ископаемых).
- * Н. И. Трушков. Экспертиза рудных месторождений. Л., I, 1934; II, 1935 (с хорошим списком литературы).
- I. W. Anderson. The prospectors handbook. London, 1935, 1—198.
- M. W. von Bornewitz. Handbook for prospectors. 1935, N.-Y., 1—373.
- G. Moreau. Étude industrielle des gîtes métallifères. Paris, 1925 (недурное руководство для поисков).
- Имеется литографированная сводка литературы по вопросам методики полевой геологической работы. Издание Центр. геол. библиотеки (Ленинград), 1936.
- А. А. Яковлев. На разведку недр. Центр. бюро краеведения, М., 1936, 1—191. См. также популярные книги: И. Н. Гладцын. Разведки полезных ископаемых. Изд. «Молодая гвардия», 1931; М. В. Самойло. Шлихи. Изд. «Сов. Азия», 1933.

ОБЪЯСНЕНИЕ СПЕЦИАЛЬНЫХ ГЕОХИМИЧЕСКИХ ТЕРМИНОВ

Ниже приводится краткое объяснение некоторых важнейших геохимических и минералогических терминов, употребляемых в настоящей работе.

В качестве дальнейших справочников можем рекомендовать:

Ф. Ю. Левинсон-Лессинг, Петрографический словарь. 1937, изд. 2-е.
В. И. Вернадский. Очерки геохимии. 1934.

А. Е. Ферсман. Геохимия. 1934, II, 102—104.

А. Е. Ферсман. Геохимия. 1939, IV. Специальный научный словарь геохимических терминов.

А. Е. Ферсман. Занимательная минералогия. 1937, 227—234.

Автопневматолит — изменение пород или входящих в них минералов теми летучими веществами, которые выделяются из пород в ходе процесса их остывания.

Апайитовые породы — щелочные образования, характеризующиеся тем, что в них сумма щелочей превышает количество глинозема, благодаря чему щелочи связываются с железом, образуя особые минералы, и получается последовательность кристаллизации, обратная нормальному гравитному порядку.

Аллотропизм — окраска минерала, зависящая от посторонних примесей (изоморфных замещений, рассеянных атомов или механических включений).

Амфотерный оксид или гидрат — соединение, обладающее способностью, в зависимости от условий, давать соли как с основаниями, так и с ангидридами кислот.

Анион — ион, заряженный отрицательно.

Анион комплексный — см. комплексный анион.

Атлантический тип магм — комплекс горных пород и связанных с ними образований, характеризующийся обилием летучих веществ, преобладанием щелочей над кальцием и магнием и повышенным содержанием минералов группы

вефелина. Обычно связан с дислокациями дизъюнктивного характера (сбросами); особенно типичен для побережья Атлантического океана.

Атомный объем — частное от деления атомного веса на плотность в твердом состоянии (следовательно, различен для разных полиморфных модификаций); дает, примерно, представление о пространстве, занимаемом атомом в решетке.

Биогенез — процессы рассеяния или концентрации химических элементов под влиянием процессов жизни.

Биогеохимия — отрасль геохимии, занимающаяся изучением химического состава живых организмов и участия живого вещества и продуктов его разложения в процессах миграции, распределения, рассеяния и накопления химических элементов в земной коре.

Биолиты — породы, образовавшиеся в основном или из органических остатков или при посредстве биохимических реакций.

Валентность — число отнятых (у катионов) или прибавленных (к анионам) электронов, обуславливающих число энергетических связей в решетке и, следовательно, число одновалентных ионов обратного знака, необходимых для ее нейтрализации.

Вак — см. Эк.

Галогенез — процесс осаждения солей из озер или мелких водных бассейнов.

Геофера — оболочка Земли, характеризующаяся определенными термодинамическими условиями, определенным химическим составом и специфическим агрегатным состоянием вещества.

Геотипы — геологические процессы, которые в определенной причинной зависимости вызывают ряд столь же определенных геохимических миграций.

Геофаза (вместо старого термина «геохимическая фаза») — определенный отрезок времени в длительном геохимическом процессе, характеризующийся более или менее определенным комплексом минералов и отвечающих им элементов.

Геохимическая диаграмма — графическое изображение геологического распределения элементов или мпериалов по хронологическим этапам и геофазам длительного геохимического процесса.

Геохимические звезды — участки менделеевской таблицы с указанием геохимических связей элементов в природных решетках.

Геохимические зоны, пояса, провинции, уэлы, шиты, эпохи — см. под соответственным термином.

Геохимия — наука, изучающая поведение химических элементов (атомов, ионов, электронов) в земной коре, их миграцию, сочетание, рассеяние и концентрацию в разных геосферах и их частях.

Геоциклы, геохимические циклы — совокупность геотипов, связанных с определенными геологическими и геохимическими причинами.

Гидротермалиты — образования, связанные с горячими или теплыми водными растворами ниже критической точки воды (ниже 400°).

Гипергенез — поверхностные изменения пород и минералов в коре выветривания и биосфере.

Градиент геохимический — расстояние (выраженное в метрах) от магматического очага до места отложения определенной геофазы геохимического центра.

Группы менделеевской таблицы — совокупность вертикальных клеток таблицы, характеризующихся более или менее определенной валентностью элементов, сходством внутренней структуры атомов и близостью их химических свойств.

Десиликация — геохимические процессы, протекающие на границе гранитных расплавов с основными кристаллическими (реже карбонатными) породами. В результате — потеря остаточным расплавом кремнезема, щелочей и ряда летучих веществ и образование на границах особых мпгматических или контактных зон.

Деформация ионов — см. поляризация ионов.

Диогенез — химическое, геологическое и физическое преобразование осадков на дне морей и океанов как результат их взаимодействия с растворами океанической воды.

Диагонали менделеевской таблицы — проходящие слева сверху направо вниз диагонали, которые соединяют ионы хотя и разных величин валентности, но близких объемов (радиусов).

Диаграмма геохимическая — см. Геохимическая диаграмма.

Диполь — электростатическая система зарядов в решетке, в которых центры тяжести (+) и (—) не совпадают. Такие

системы вызывают взаимное влияние ионов (поляризация), несимметричность полей, поглощение видимых лучей, окраску решетки и т. д.

Дисперсные (рассеянные) элементы — элементы, по свойствам своим не обладающие способностью к концентрации в условиях земной коры. Обычно это элементы нечетные, малых валентностей, малых взвзв и шаровой структуры.

Дифференциация, дифференциат — разделение химических элементов при геохимических процессах (охлаждении, испарении, химическом взаимодействии) с пространственным разобщением отдельных групп элементов в виде самостоятельных дифференциатов (горных пород, пегматитов, летучих дериватов и т. д.).

Звезда геохимическая — см. Геохимические звезды.

Земная кора — наружные слои Земли, условно принимаемые (по Ф. Кларку) в 15—16 км мощностью.

Зона цементации (или зона сульфидного обогащения) — область взаимодействия глубинных минералов и элементов с элементами зоны выветривания или биосферы.

Зоны геохимические и широтные — климатические зоны со всей совокупностью вызванных ими специфических особенностей в миграции элементов почвенного покрова и биосферы. Следовательно, в основном связаны с географическими поясами.

Идиохроматизм — окраска минералов, связанная по существу с химическим составом и характером кристаллической решетки данного соединения.

Изомииии — линии, соединяющие на плане или в геологическом разрезе точки одинаковых величин каких-либо измеряемых явлений (например, абсолютных высот, содержания каких-либо минералов или элементов, величины радиоактивности пород и т. д.).

Изоморфные смеси — продукты частичного замещения ионов в кристаллической решетке ионами близких размеров, одинакового знака и координационного числа. В случае разных валентностей — гетеровалентный изоморфизм; см. полярный изоморфизм.

Индикаторы химические — примеси каких-либо элементов, легко определяемые химически или физически, вследствие чего они могут служить удобными или чувствительными показателями какой-либо реакции, распределения элементов в системе и т. д.

Ионный потенциал — отношение валентности к радиусу иона (что практически очень близко к $\frac{1}{r}$, $\frac{1}{\text{вэка}}$). Эта величина, как и взк, определяет ряд химических и физических свойств решеток.

Ионы типа благородных газов — ионы шаровой формы, по своей конфигурации отвечающие устойчивому строению

благородных газов. Например, калий⁺¹, кальций⁺², ванадий⁺⁵, кислород⁻² и т. д.

Ионы типа купро — ионы, по своей конфигурации отвечающие строению атомов никеля, палладия или платины. Содержат в наружной оболочке 18 электронов. Обладают довольно сильной активной поляризацией.

Ионы типа промежуточного — ионы типа побочных групп с незаполненной внутренней оболочкой электронов (асимметричны). По большей части парамагнитны; дают обычно окрашенные соединения и потому нередко носят характер хромофоров.

Катагенез — химическое и минералогическое преобразование осадков под влиянием взаимодействия петрографически и геохимически различных осадочных пород (вне явлений метаморфизма или диагенеза).

Катион — ион, заряженный положительно.

Кислородный потенциал — см. Окислительно-восстановительный потенциал.

Кларки весовые или атомные — процент содержания данного элемента в определенной геохимической системе (например, в литосфере в целом, в Кавказском хребте, в атмосфере и т. д.).

Кларк концентрации или коэффициент концентрации — множитель, определяющий отношение среднего кларка данной геохимической системы или данного месторождения к среднему кларку всей земной коры. Кларки конц. положительные — больше единицы; кларки конц. отрицательные — меньше единицы.

Комплексный анион — соединение под влиянием поляризации сильного катиона с анионами (особенно с кислородом или серой) с образованием общего устойчивого иона, играющего в решетке роль простого иона.

Концентрация водородных ионов — обозначаемая обычно буквами pH — отрицательный логарифм величин концентрации водородных ионов, определяющий кислотность или щелочность растворов солей; выражается величинами от 1 до 14 (от самых кислых до сильно щелочных); нейтральное состояние отвечает примерно 7,5.

Концентры геохимические — расположение геохимических образований концентрическими зонами вокруг охлаждающегося очага магмы. Можно различать первичные и вторичные концентры.

Координационное число — число ионов (атомов) какого-либо знака, находящихся на почти одинаковом расстоянии и в одинаковых геометрических условиях по отношению к иону другого знака. Обычно координационные числа для нормальных решеток 6, 4, 3, для металлов — 8, 12.

Кора выветривания — геосфера земной коры, связанная в своем строении

и химизме с воздействием кислорода, углекислоты, воды и частично живого вещества.

Корреляция геохимическая — одновременное накопление, миграция или рассеяние каких-либо элементов (независимо от причин этой закономерности).

Кристаллохимия — наука, изучающая соотношения между составом, кристаллической формой и свойствами кристаллической решетки.

Купрометрия — методы систематического изучения какого-либо района или определенного месторождения с точки зрения количественного распространения меди.

Литофилия — преимущественное сродство атомов к кислороду (по сравнению с серой).

Люминесценция — свечение минералов под влиянием ультрафиолетовых, катодных или рентгеновских лучей, в основном связанное с примесями, с нарушением структуры, реже вызванное специфическими чертами самой решетки.

Магма — расплавы глубин, состоящие из сочетания труднолетучих компонентов (в виде ионов и комплексных анионов, особенно кремния, алюминия, железа и др.) и легколетучих веществ (ионов хлора, бора, серы и т. д.).

Мезокристаллизация — продукт (минерал, элемент) среднего участка кристаллизации расплава, флюида или раствора. До него — процесс протокристаллизации, после него — кристаллизация (пегматитовая).

Меланократовый (противоположность лейкократовому) — состоящий преимущественно из окрашенных соединений с сильными хромофорами.

Миаролы — газовые пустоты в гранитных породах или пегматитах, заполненные (полностью или частично) продуктами кристаллизации позднейших геофаз. Аналогичные жеодам — секрциям в основных породах и эффузиях.

Миграция геохимическая — перемещение химических элементов в земной коре, ведущее обычно к их рассеянию или концентрации.

Окислительно-восстановительный потенциал — гН (редокс), в геохимии суммарный эффект соотношений кислородного потенциала между всеми участвующими в данной системе ионами.

Ореолы рассеяния — область геохимического рассеяния какого-либо элемента вокруг точек его концентрации. Возможны первичные ореолы рассеяния, но чаще всего наблюдаются вторичные, связанные с процессами гипергенеза.

Палеогеография — наука, изучающая изменения материков и водных бассейнов в разные геологические эпохи; основывается на изучении палеонтологических данных, общей геологической

истории и петрографических и геохимических свойств осадков.

Параген — условная величина, характерная для каждого иона или их сочетаний, определяющая относительное время его выпадения в кристаллических решетках в условиях геохимических процессов земной коры.

Парагенезис — совместное нахождение минералов (или элементов) в определенной геохимической системе, связанной с определенным геохимическим процессом.

Пегматиты — сочетания минералов остаточных (телокристаллизация) магматических расплавов, богатых летучими соединениями и накопивших значительные массы редких металлов.

Петрографические провинции — области, в которых магматические породы объединены общностью химического состава и могут рассматриваться как дериваты единой общей магмы.

Пневматолиты — продукты кристаллизации летучих компонентов, выделившихся из остаточной магмы в связи с обогащением пегматитового остатка.

Поля менделеевской таблицы (блоки) — совокупность соседних элементов таблиц, объединенных сходством главнейших свойств самих атомов или их ионов.

Поляризация ионов — взаимное изменение шаровой (симметрической) структуры ионов, в результате вызывающее образование диполей, повышение летучести, понижение твердости, температуры плавления и т. д. Активная поляризация характерна для катионов малых объемов (например, бериллия, кремния), см. поляризуемость.

Поляризуемость ионов — способность к деформации (поляризации) под влиянием иона другого знака. Особенно характерна для анионов больших объемов (например, иода, теллура).

Полярный изоморфизм — пазирательная способность к изоморфным или к эндокриптным замещениям, но с энергетическим выигрышем, что ведет к возможности замещения узлов в кристаллической решетке ионами даже в из насыщенных растворах.

Постмагматические образования — этапы и геофаз, следующие после главной кристаллизации самого расплава; часто обособлены от него как пространственно, так и хронологически.

Посяа геохимические — области тектонического нарушения, окаймляющие более устойчивые шты и представляющие районы интенсивной геохимической миграции.

Проиници ге химические — области земной поверхности, геохимически однородные и характеризующиеся определенными ассоциациями химических элементов.

Протокристаллизация минералов и элементов — наиболее ранние продукты кристаллизации расплава, флюида или раствора. Обычно применяются к первым выделениям магмы (протокристаллизаты, протопороды, протозлементы и т. д.).

Радиус иона — радиус поля иона, представляющего ионизацию как несжимающийся шар, соприкасающийся с другими шарами в решетках. Зависит в первую очередь от валентности, координационного числа, температуры и степени поляризации.

Редокс — см. окислительно-восстановительный потенциал.

Решетка атомная — в узлах расположены нейтральные атомы.

Решетка ионная — в узлах расположены ионы, простые или комплексные.

Решетка кристаллическая — закономерное и электрически нейтральное расположение ионов или атомов, обусловленное геометрической структурой максимальной плотности и минимальной энергии.

Решетка слоистая — состоит из макроионов или отдельных ионных групп, расположенных послойно, приче отдельные слои из макроионов находятся друг от друга на больших расстояниях и иногда связаны какими-либо промежуточными катионами.

Реjuvenация (омоложение) — повторное наложение более старых геофаз на более молодые, что связано с пульсацией растворов и колебаниями в ходе тектонических и геохимических процессов.

Сингенез — одновременное образование минералов в осадочных породах во время самого процесса образования осадка в водном бассейне (далее во времени следуют диагенез и катагенез).

Система геохимическая — совокупность химических элементов, связанных с определенным типом геохимических процессов.

Станнометрия — методика систематического изучения какого-либо района или определенного месторождения с точки зрения распространения в нем олова.

Супергенез — неправильный американский термин для обозначения явлений гипергенеза.

Телескопирование — сближение и наложение геофаз с приближением геохимического градиента к нулю, что типично для процессов, связанных с быстрым охлаждением растворов или расплавов. Особенно наблюдается в районах тихоокеанских процессов с высоко расположенными (близко к поверхности) магматическими очагами.

Тел кристаллизация — конечные продукты кристаллизации расплавов флюидов или растворов; по отношению

к магме приближается с понятием пегматитов.

Типоморфные свойства — характерные свойства структуры, цвета, облика минерала, зависящие от условий (геофазы) его образования.

Тихоокеанский тип магм — комплекс горных пород и связанных с ними образований, относительно бедный летучими компонентами, с преобладанием кальция над щелочами, обилием кремнезема и полевых шпатов. Особенно связан с областями складчатости.

Узлы геохимические — наложение нескольких тектонических и климатических типов или циклов и вызванные ими особенности геохимической концентрации элементов.

Халькофилы — атомы, обнаруживающие большее, чем к кислороду, сродство к сере.

Хроматические символы — условные коэффициенты, позволяющие путем простых арифметических действий по символам входящих в кристалл ионов определять вероятные цвета природных химических соединений.

Хромофоры — ионы, обладающие свойством при соединении с ионами другого знака в кристаллической решетке поглощать часть световой энергии и

вызывать полосы поглощения световых лучей в видимой части спектра.

Хроноксены («враждебные времени») — мало устойчивые минералы, не сохраняющиеся во времени и известные лишь в пределах данной геологической или геохимической обстановки.

Щиты геохимические — более устойчивые древние платформы, отвечающие по своим геохимическим комплексам образованиям глубинных зон.

Эк — пай энергии, выделяемый ионом при образовании кристаллической решетки из рассеянных в бесконечности ионов, по расчету на один моль в больших калориях при абсолютном нуле. Сумма экзв входящих в соединение ионов дает общую энергию решетки (U). Вэк равен эку, деленному на валентность, и отвечает тому же паю энергии по расчету на единицу связи (валентности).

Энергохроматизм — окраска природных соединений, вызванная воздействием излучений (радия, космических лучей и т. д.).

Эпохи геохимические — периоды специфического накопления или отдельных элементов, или целых ассоциаций элементов, как в породах осадочных, так и кристаллических (магматических).

УКАЗАТЕЛЬ ЭЛЕМЕНТОВ, МИНЕРАЛОВ И ГОРНЫХ ПОРОД

- Аваптюрин 728
 Авгит 521, 728
 Агальматолит 615, 723, 728, 737
 Агат 494, 721, 722, 727, 729
 Адүляр 503, 555, 578, 623, 641, 681, 716, 726
 Азот 452, 460, 525, 667, 676, 680
 Азурит 480
 Аквамари 505, 604, 605, 678, 728
 Аксинит 595, 607, 726
 Актиний 473, 474
 Актинолит 480, 723
 Алабамий? (№ 85) 473, 474
 Алебастр 647, 728
 Александрит 605, 728 (см. также Хризоберилл)
 Алмаз 447, 477, 478, 517, 577, 594, 662, 679, 722, 729
 Алунит 587, 603, 615, 618, 619, 639, 645, 654, 684, 685, 729, 730, 731
 Альбит 513, 514, 546, 549, 555, 578, 599, 623, 641, 667, 676, 677, 702, 726, 732
 Альбитофир 696, 730
 Альмандин 497, 502, 727, 728
 Алюминий 447, 452, 460, 512, 524, 561, 605, 625, 654, 656, 657, 658, 684, 685, 686, 689, 692, 697, 730
 Аляскит 595
 Амазонит 480, 503, 700, 728, 732
 Амблигонит 607, 677
 Аметист 480, 722, 728
 Амфиболит 663, 732
 Ангидрит 451, 572, 644, 655, 656, 683, 724
 Андалузит 479, 480, 502, 603, 605, 606, 614, 662, 721—723, 728
 Андрадит 497, 504, 727
 Антигорит 723
 Антимонит 708, 709, 716
 Апатит 447, 480, 505, 508, 510, 514, 531, 555, 585, 596, 597—599, 606, 635, 680, 686, 687, 690, 712, 721
 Арагонит 639, 640, 673, 688, 730
 Аргон 452, 473, 475 516, 518
 Арсенопирит 641, 698, 706, 713, 716
 Асбест 594, 684, 723, 728
 Асболан 695
 Асфальт 479, 606, 643, 647, 667, 691
 Аурипигмент 639, 698
 Базальт 452, 462, 591, 617, 640, 721, 725, 729, 731, 732
 Барий 524, 525, 569, 640, 654, 711
 Барит 509, 627, 641, 643, 644, 654—656, 681, 695, 697, 700, 704, 711, 715, 718, 721, 729, 737
 Березит 603, 731
 Берилл 478, 480, 503—506, 508, 510, 514, 517, 534, 546 549, 603, 607, 610, 614, 627, 633, 662, 677, 678, 710, 728, 732
 Бериллий 447, 452, 460, 519, 569, 604, 605, 676
 Бпотит 504, 507, 513, 514, 521, 534, 546, 549, 605, 606, 611, 627, 645, 702, 732, 733
 Бирюза 480, 728
 Битумы 572, 573, 583, 584, 624, 643, 644, 647, 667, 668, 691, 696, 700, 720
 Блелкые руды 698, 705, 716
 Боксит 446, 477, 488, 589, 618 45, 646, 656, 684, 685, 686, 688, 692, 697, 731
 Бор 452, 460, 508, 525, 619, 620, 650, 651, 670, 678, 679, 689, 696
 Бром 447, 452, 462, 525, 527, 571, 577, 620, 651, 654, 661, 667, 679, 689, 699, 700, 710
 Бронзит 723
 Брусит 477, 723, 728
 Бурый железняк (лимонит) 479, 581, 672, 718
 Ванадий 447, 452, 460, 483, 525, 569, 572, 657, 670, 691, 718
 Везувиян 479, 480, 723, 728
 Вивипант 664, 669, 673
 Виргиний? (№ 87) 650
 Висмут 452, 464, 472, 560, 604, 605, 619, 709, 718, 719
 Висмут самородный 718
 Висмутовый блеск 662
 Витерит 711
 Вода 517, 582, 595, 646, 658, 664, 665, 666, 667, 668, 672, 720
 Водород 452, 460, 516, 518, 593, 627
 Волластонит 595, 721
 Вольфрам 447, 452, 462, 472, 503, 507, 527, 560, 569, 578, 601, 636, 637, 696, 712, 713

- Вольфрамит 479, 506, 531, 577, 604, 607, 633, 635, 638, 662, 676, 678, 702, 703, 707, 708, 713
 Воробьевит 479, 505, 605, 610, 677, 710
 Вульфенит 478

 Габбро 521, 535, 591, 595, 599, 601, 613, 615, 659, 687, 728, 732
 Габбронорит 594, 728
 Гагат 729
 Гадолинит 606
 Гажа 663, 664
 Гайдингерит 452, 517, 524, 572, 650, 665, 682, 683
 Галенит 705
 Галит (каменная соль) 452, 517, 524, 572, 665, 682, 683
 Галлий 447, 452, 462, 468, 473, 516, 657, 697
 Галмей 512, 644, 705
 Галлуазит 603, 658, 659, 728, 729, 731
 Гафний 452, 462, 475, 605, 712
 Геденбергит 613
 Гелий 447, 452, 525, 569, 605, 675, 676, 682
 Гематит 478, 479, 495, 555, 577, 607, 728
 Германий 452, 462, 697, 698
 Гидрогалит 524
 Гипс 444, 453, 511, 517, 527, 572, 612, 624, 644, 645, 647, 651, 652, 656, 665, 667, 668, 672, 683, 688, 700, 724, 730
 Глауконит 642, 687, 694, 721, 724, 731
 Глина 446, 447, 495, 546, 569, 583, 612, 614, 639, 645—647, 650, 666, 667, 694, 723, 725, 730, 738
 Гнейс 616, 657, 711, 722, 727, 728, 734
 Горный хрусталь (см. также Кварц) 447, 503, 549, 624, 641, 642, 686, 721, 722, 725, 728
 Гранат 501, 595, 605, 606, 662, 692, 696, 707, 714, 723, 727, 729
 Гранит 501, 512, 521, 531, 564, 578, 584, 601, 605, 608, 612—614, 622, 623, 634, 637, 640, 646, 650, 657, 663, 676—678, 681, 684, 687, 689, 695, 696, 700, 703, 704, 706, 709—714, 718, 719, 722, 723, 727, 730—735, 737
 Гранит щелочной 601, 602, 613
 Гранитпорфир 603, 618, 722, 729
 Гранодиорит 595, 601, 633, 634, 694—696, 704, 709, 713, 714
 Графит 479, 594, 596, 597, 605, 606, 618, 679, 731
 Грейзен 603, 635, 706, 707, 708, 731, 737
 Гриннокит 478, 492, 697, 705
 Гроссуляр 478, 497, 501, 615, 618, 727

 Данбурит 678
 Даволит 477, 618, 678
 Демантоид 501, 727, 729
 Диабаз 615, 617, 622, 659, 695, 714, 723, 725, 737
 Диаллаг 723
 Диаспор 615, 722
 Диатомит 664, 673
 Дизаналит 599, 703
 Диксит 711

 Диопсид 723, 727
 Диоптаз 728
 Диорит 521, 535, 595, 601, 622, 634, 694
 Дистен (кианит) 606, 684, 728
 Долломит 487, 527, 612, 624, 644, 683, 684, 719, 723, 724, 731
 Дунит 487, 518, 535, 591, 622, 691, 721, 723, 729
 Дюмортьерит 603, 721, 722, 723, 729

 Железо 452, 460, 472, 483, 508, 512, 525, 537, 561, 569, 586, 589, 595, 600, 602—604, 610, 613, 615—618, 625, 649, 652—654, 657—660, 663—665, 669, 672, 673, 680, 685—687, 689, 692—697, 701—704, 706, 725, 729
 Жильбертит (дамурит) 505, 507, 508, 603, 607, 633

 Змеевик (серпентин) 508, 552, 584, 684, 721, 723, 727, 728, 736
 Золото 452, 453, 462, 472, 478, 495, 503, 525, 589, 595, 603, 604, 605, 618, 619, 636, 641, 656, 662, 696, 697, 699, 704, 707, 709, 712—718

 Известняк 511, 527, 556, 595, 624, 642, 643, 656, 665, 667, 688, 689, 690, 692, 694, 708, 712, 731
 Изумруд 480, 605, 614, 677, 678, 728
 Ийолит 508
 Ильменит 478, 597, 598, 599, 602, 606, 646, 662, 670
 Ильменорутит 546, 597
 Индий 447, 452, 462, 697, 705
 Иод 447, 452, 462, 527, 569, 651, 654, 661, 679, 689, 699, 700, 709, 710
 Иридий 452, 495, 662
 Иттрий 452, 462, 543, 605, 610, 701, 711, 712
 Иттросиликаты 606

 Кадмий 452, 462, 472, 697, 698, 705
 Каламин 477, 644, 717
 Калий 452, 460, 525, 527, 561, 569, 571, 577, 582, 605, 615, 653, 688, 689, 699, 710
 Кальций 452, 460, 525, 561, 572, 599, 603, 615, 624, 644, 654, 656, 661, 663, 664, 667, 678, 683, 688, 689, 691, 695, 700
 Кальцит (исландский шпат) 480, 510, 517, 555, 617, 643, 658, 659, 663, 679, 681, 687, 698, 708, 716, 717, 719, 729
 Канкринит 502, 728
 Каолин 602, 645, 646, 670, 684, 685
 Каолинит 509, 607, 627, 698, 709, 717, 737
 Карналлит 649, 710
 Карнеол 729
 Карнотит 720
 Касситерит (оловянный камень) 479, 495, 506, 577, 578, 604, 607, 633, 635, 703, 706, 707, 708, 718
 Катаплект 597
 Кварц 453, 477, 499—502, 504, 508, 510, 512, 520, 521, 534, 546, 555, 565, 577, 586, 601, 602, 604, 605, 607, 608, 610, 611, 615, 617, 623, 627, 633, 640, 643,

- 645, 657, 658, 670, 676, 678, 681, 686, 687, 703, 704, 708, 710, 711, 714—718, 732—735, 737
 Кварцит 603, 615, 723, 728
 Кварццорфр 737
 Квасцы 587, 647, 654, 668, 688, 729, 730
 Кермезит 716
 Киноварь 479, 495, 639, 662, 709, 716
 Кир 667
 Кислород 452, 460, 481, 525, 627, 646, 649, 661, 685, 693, 724
 Кнопит 598, 703
 Кобальт 447, 452, 460, 472, 502, 561, 569, 589, 595, 617, 618, 654, 655, 694, 695, 698, 705, 718, 719
 Колумбит 606, 610, 662, 702
 Колчедан 560, 569, 612, 674, 688, 696, 709, 711
 Конгломерат 711, 715
 Кордиерит 480, 605, 606, 728
 Корнелин 605
 Корунд 447, 517, 603, 605, 606, 614, 615, 684, 722, 723, 728—731
 Кремль 659, 688, 728
 Креппий 452, 462, 519, 592, 594, 598, 608, 686
 Криолит 514, 600, 602, 607, 610, 681
 Криолитопит 610
 Криптон 452, 516, 518
 Ксенон 452, 516, 518
 Ксенотим 606, 662, 701, 727
 Лабрадор 521, 646, 690, 728, 732
 Лазурит 728
 Лампадит 695
 Латерит 656, 657, 685
 Лед 672, 674
 Лейцит 477, 494, 689
 Лепидолит 453, 480, 505, 506, 507, 508, 514, 605, 607, 610, 676, 677, 700, 710, 711, 728
 Лепидомелан 479, 507
 Лимбургит 508
 Липарит 612, 618
 Листвинит 728
 Литий 452, 453, 460, 506, 507, 519, 526, 569, 601, 604, 605, 610, 611, 615, 637, 640, 676, 677, 686, 700, 702, 710, 732
 Ловчоррит 598, 712
 Лопарит 479, 598, 703, 712
 Лунный камень 728, 732
 Луяврит 599
 Людвигит 479
 Магнезит 594, 617, 624, 644, 645, 658, 684, 723
 Магнетит 478, 479, 500, 502, 513, 521, 546, 555, 577, 606, 614, 615, 617, 618, 662, 690, 691, 694, 695, 702, 712, 719, 723, 727
 Магний 452, 460, 561, 572, 577, 601, 603, 624, 644, 650, 654, 658, 659, 664, 667, 678, 683, 684, 689, 695, 699, 700
 Мазурий 452, 462, 473, 519
 Малакон 546, 712
 Малахит 480, 728, 731
 Марганец 447, 452, 460, 483, 561, 589, 625, 654, 655, 657, 663, 672, 673, 685, 686, 692, 693, 695, 697, 706, 737
 Марказит 645, 670
 Марматит 706
 Медь 452, 462, 480, 502, 525, 527, 553, 559, 569, 572, 589, 595, 603, 617, 618, 636, 671, 674, 694, 695, 696, 703, 708, 715, 730
 Мезоторий 569, 600, 667
 Меланит 727
 Мелафир 720
 Мергель 612, 643, 667, 684, 724
 Метан 517
 Микроклин 503, 513, 610, 707
 Мирабилит 522, 682, 683
 Молибден 447, 452, 462, 543, 601, 603, 605, 613, 703, 704, 718
 Молибденит 553, 597, 603, 606, 633, 634, 703, 704
 Монацит 514, 517, 549, 569, 606, 610, 634, 653, 662, 676, 701, 702, 711, 727, 734
 Монтмориллонит 647, 659
 Мрамор 642, 687, 689, 728
 Мусковит 479, 502, 505, 507, 525, 546, 549, 555, 578, 605, 606, 609, 627, 633, 703, 708, 727, 732, 733
 Мышьак 452, 462, 472, 503, 509, 518, 525, 560, 561, 596, 602, 619, 620, 627, 639, 640, 670, 698, 704, 709, 717
 Наждак 730
 Накрит 550, 711
 Натрий 452, 460, 472, 525, 561, 572, 585, 615, 624, 647, 650, 672, 680, 682, 683, 688, 689, 700, 705
 Натрояррозит 699
 Нашатырь 621, 680
 Немалит 618
 Неон 452, 518, 682
 Нефелин 447, 494, 502, 596, 597, 598—660, 602, 686, 687, 689, 697, 702, 703, 721, 728, 732
 Нефелиновый сиенит 599, 602, 617, 681, 686, 687, 690, 700, 701, 702, 712, 732
 Нефрит 728
 Нефть 478, 479, 528, 569, 572, 573, 576, 582, 583, 586, 624, 647, 667—669, 679, 688, 699, 710
 Никель 447, 452, 460, 502, 531, 569, 589, 595, 617, 618, 637, 655, 657—662, 674, 691, 694, 695, 696, 698, 718
 Ниобий 452, 462, 543, 599, 600, 605, 610, 676, 702, 703, 706, 712, 718
 Ниобо-танталаты 611, 641, 702, 706
 Нитронит 614, 657—659
 Норит 591, 622, 691, 695
 Обсидиан 728
 Озокерит 478, 479, 667
 Окаменелое дерево 728, 729
 Оливин 453, 517, 552, 662, 684, 723, 729, 736
 Оливинит 736
 Олигоклаз 521
 Олово 447, 452, 453, 462, 507, 508, 558, 560, 569, 577, 601, 603, 609, 636, 638, 676, 697, 718

- Оникс 639, 728
 Опал 618, 619, 658, 659, 728, 729, 737
 Орашжит 597
 Орпит 513, 606, 610, 712, 734
 Ортоклаз 501, 521, 549, 737
 Осмий 452, 592, 662
 Осмиридий 662
 Основные породы 614, 684, 714
 Офиокальцит 726
 Охра 583, 645, 655, 659, 709, 711, 731
 Палладий 452, 519, 569, 595, 618, 714
 Пегматит 572, 641, 717, 728, 737
 Пентландит 552, 714
 Перидотит 591, 695, 723
 Периклаз 477, 594
 Перовскит 479, 599, 690
 Песчаник 641, 691, 696, 711, 715, 720, 726
 Петалит 677
 Пирит 478, 581, 615, 641, 645, 670, 696, 709, 714, 715, 730
 Пироксеп 480, 502, 599, 606, 684, 690, 691, 714
 Пироксенит 518, 535, 591, 659, 690, 695, 723, 729
 Пирон 479, 501, 727, 729
 Пирофиллит 615, 721, 737
 Пирротин 581, 589, 635, 696, 714
 Плаггиоклаз 513, 606, 723
 Платина 452, 495, 518, 589, 592, 595, 662, 663, 714, 723
 Плюмазит 722
 Полевой шпат 514, 534, 546, 565, 596, 597, 598, 603, 605, 608, 610, 611, 641, 646, 689, 690, 708, 726, 731—735
 Поллуцит (поллукс) 506, 610, 710
 Полоний 452, 473, 474
 Порфир 615, 703
 Порфирит 723, 725
 Протактиний 452, 473, 474
 Радий 452, 473, 474, 576, 600, 605, 639, 640, 667, 676, 719, 720
 Радон 473, 474, 639
 Ратовкит 641
 Реальгар 624, 698, 709, 716
 Редкие земли 452, 462, 479, 537, 598, 600, 605, 610, 611, 641, 701, 711, 712
 Рений 452, 473, 474, 516, 537, 704
 Роговая обманка 480, 503, 555, 595, 728
 Роговик 688, 692
 Родий 452, 473, 474, 516, 592
 Родонит 479, 692, 728
 Родохрозит 479, 692
 Ртуть 452, 462, 472, 495, 509, 525, 619, 620, 636, 639, 640, 654, 709, 716, 717
 Рубидий 452, 462, 470, 473, 475, 486, 516—519, 525, 526, 527, 569, 605, 650, 676, 677, 689, 699, 700, 710
 Рубин 479
 Рутений 452, 474, 518, 592
 Рутил 478, 479, 555, 577, 615, 690, 722, 728
 Самарскит 610
 Сапонит 723
 Сапропель 664, 668, 669, 673
 Сапфир 482
 Свинец 447, 452, 464, 509, 525, 572, 602, 610, 627, 654, 681, 691, 697, 698, 700, 703, 705, 706, 708, 709, 717, 718
 Селадонит 617, 696, 722
 Селен 452, 462, 472, 518, 519, 592, 618, 619, 627, 656, 698, 699, 709
 Селенит 647, 724, 728
 Селитра 517, 524, 673, 680
 Сепиолит 658, 659
 Сера 447, 452, 460, 473, 480, 486, 492, 525, 527, 561, 583, 587, 618, 619, 624, 661, 667, 672, 681, 688, 699
 Сера самородная 527, 639, 667, 688, 700, 730
 Серебро 452, 462, 473, 486, 495, 509, 516, 572, 627, 637, 654, 656, 695, 697, 698, 699, 704, 705, 709, 716, 717, 718, 719
 Серпичит 508, 603, 615, 627
 Сидерит 478, 555, 635, 644, 694
 Сильбин 649
 Силлиманит 477, 502, 606
 Скандий 452, 460, 470, 473, 605, 670, 689, 711
 Скаполит 477, 687
 Скарн 615, 696, 703, 704, 713, 714
 Сланец 614, 616, 641, 657, 666, 692, 696, 727, 728, 734
 Слюда 507, 508, 556, 569, 603, 610, 611, 616, 641, 661, 720, 732, 733, 734, 735, 736
 Смитсонит 644, 697, 705
 Сода 646, 682, 683, 689
 Содалит 597, 728
 Спессартин 479, 497, 502, 546, 727
 Сподумен 605, 607, 610, 677
 Ставролит 727, 728
 Стеатит 728, 736, 737
 Стронцианит 700
 Стронций 452, 462, 516, 525, 569, 572, 640, 700, 711
 Сурьма 447, 452, 462, 472, 518, 525, 527, 558, 569, 636, 639, 699, 704, 706, 708, 709, 716, 717
 Сфалерит 478, 697, 698, 705, 706
 Сфен (титавит) 510, 555, 598, 599, 606, 690, 726
 Сферокобалтин 479, 644
 Сферосидерит 670
 Таллий 447, 452, 464, 516, 620, 639, 640, 717
 Тальк 453, 480, 508, 594, 604, 617, 661, 684, 723, 729, 736, 737
 Тантал 447, 452, 462, 604, 605, 610, 702, 703, 706, 712
 Танталит 606
 Теллур 447, 452, 462, 473, 474, 518, 619, 656, 699, 709
 Тенардит 683
 Тешенит 508
 Титан 452, 460, 561, 569, 581, 595, 597, 599, 600, 610, 657, 690, 701, 703, 718
 Титаномагнетит 502, 595, 596, 598, 599, 687, 690, 702

- Титаноиобаты 606, 616, 701
 Титаносиликаты 597, 598
 Топаз 452, 503, 504, 508, 546, 603—605, 607, 615, 627, 633, 662, 677, 708, 721, 726, 728, 729, 732, 737
 Торий 452, 464, 472—474, 525, 576, 596, 600, 610, 702, 711, 712, 718, 719
 Торит 596, 597, 734
 Тортвейтит 479, 689
 Торф 479, 585, 669, 720
 Трапп 615, 617, 618, 725, 729
 Трахит 618, 729
 Трепел 688
 Турмалин 479, 480, 504, 505, 513, 514, 546, 555, 578, 605, 606, 610, 611, 615, 633, 634, 636, 662, 676, 678, 708, 716, 728
 Туф 612, 615, 619, 639, 664, 665, 688, 692, 725
 Тюжмунит 478
 Уваровит 480, 727, 729
 Углерод 452, 460, 472, 486, 516, 525, 593, 597, 627, 679
 Уголь 479, 525, 569, 583, 624, 645, 646, 669, 670, 681, 685, 698, 730
 Уран 452, 464, 472, 483, 487, 525, 537, 576, 587, 600, 604, 605, 610, 657, 676, 701, 702, 703, 719, 720
 Ураницит (урановая смолка) 479, 495, 606, 610, 676, 719
 Ураноиобаты 606, 719
 Фенакит 477, 479, 504, 505, 546, 605, 607, 677, 678, 728
 Филлит 737
 Флогопит 505, 507, 605, 732
 Флюорит 480, 505, 509, 517, 531, 550, 555, 598, 602, 607, 641, 678, 680, 681, 687, 698, 728, 737
 Фойяит 599
 Фосфор 447, 452, 460, 516, 527, 561, 595, 627, 663, 673, 686
 Фосфорит 686—688, 725
 Фтор 452, 453, 460, 472, 526, 527, 571, 595, 602, 605, 615, 619, 640, 680, 681
 Халькопирит 513, 695, 696, 714, 730
 Халедон 617, 635, 657—659, 700, 711, 717, 724, 727, 729, 737
 Хлор 452, 460, 525, 569, 572, 592, 595, 614, 619, 654, 661, 688, 689, 699
 Хлорит 505, 508, 555, 595, 659
 Хризоберилл (см. также александрит) 605, 607, 662, 678
 Хром 452, 460, 474, 483, 516, 572, 589, 691
 Хромит 478, 479, 501, 594, 691, 694, 723
 Целестин 446, 480, 572, 643, 644, 656, 673, 688, 700
 Цезий 452, 462, 506, 507, 519, 525, 526, 569, 605, 610, 611, 650, 676, 677, 689, 700, 710, 717
 Цеолиты 477, 495, 514, 607, 611, 696, 722, 729
 Церий 468, 711, 712
 Церуссит 717
 Цинк 447, 452, 462, 472, 512, 595, 610, 619, 627, 654, 657, 696, 697, 705, 706, 715, 717
 Циннвальдит 506—508, 627, 633, 676, 677
 Циркон 479, 480, 495, 500, 520, 597, 598, 599, 605, 606, 610, 653, 701, 702, 712, 719, 727—729
 Цирконий 452, 462, 596, 600, 657, 701
 Цирконосиликаты 598, 599
 Цирконфавас 599, 701
 Циртолит 712
 Шеелит 478, 479, 569, 577, 607, 633, 634, 641, 662, 703, 704, 707, 713, 714, 716
 Шерл 504, 534, 606, 611, 633, 635, 637, 707, 726, 732
 Шерломит 501, 727
 Шпинель 492, 594, 662, 727, 728, 731
 Эвдиалит 479, 596, 598, 599, 701, 702, 728
 Эвклаз 605, 662
 Эгирин 480, 502, 597, 599, 687, 690, 691
 Эпидот 555, 607, 614, 728
 Юкспорит 597
 Янтарь 478, 479, 662, 670, 729
 Ярозит 694
 Яшма 686, 692, 728, 737

СПИСОК ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ НАЗВАНИЙ ОСНОВНЫХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ИЗДАНИЙ

Вестн. Русск. геогр. об-ва	Вестник Русского географического общества. СПб.
Геогр. вестн.	Геологический вестник. Петроград
Горн. журн.	Горный журнал. СПб., Л., М.
Ежегодн. геол. мин. России	Ежегодник по геологии и минералогии России. Новая Александрия
Журн. Русск. физ.-хим. об-ва	Журнал Русского физико-химического об-ва. СПб., Пг., Л.
Зап. Акад. Наук	Записки Академии Наук. СПб.
Зап. Русск. геогр. об-ва	Записки Русского географического общества. СПб.
Зап. Горн. ин-та	Записки Горного института. СПб.
Зап. Мин. об-ва	Записки Минералогического общества, СПб., Л.
Изв. Акад. Наук	Известия Академии Наук. СПб., Пг., Л.—М.
Изв. Геол. ком.	Известия Геологического комитета. СПб., Л.
Изв. геогр. об-ва	Известия Географического общества. Л.
Изв. Горн. отд. ВСНХ	Известия Горного отд. ВСНХ. Москва
Изв. Русск. геогр. об-ва	Известия Русского географического общества. СПб. См. Изв. Геогр. об-ва. Л.
Материалы КЕПС	Материалы Комиссии по изучению естественно- производительных сил России. Пг.
Материалы общ. и прикл. геол.	Материалы по общей и прикладной геологии. Пг.
Нефт. хоз.	Нефтяное хозяйство. Л., М.
Разв. недр.	Разведка недр. М.
Сов. геол.	Советская геология. М.
Труды Ботан. ин-та	Труды Ботанического института Академии Наук СССР, М.
Труды Вост.-Сиб. геол. треста	Труды Восточно-Сибирского геологического треста. Иркутск
Труды ГГРУ	Труды Главного геолого-разведочного управления ВСНХ СССР. М.
Труды Геол. ком.	Труды Геологического комитета. СПб., Л.
Труды Геол. мин. муз.	Труды Геологического и минералогического музея Академии Наук. Пг.
Труды Геол. муз.	Труды Геологического музея Академии Наук. СПб., Л.
Труды Казанск. об-ва есте- ствоиспыт.	Труды Казанского общества естествоиспытателей. Казань
Труды Об-ва естествоиспыт. Казанск. ун-та.	Труды Общества естествоиспытателей при Казан- ском университете
Труды Сейсмол. ин-та	Труды Сейсмологического института Академии Наук СССР. М.
Труды СПб. об-ва естество- испыт.	Труды СПб. об-ва естествоиспытателей. СПб.
Труды СОПС	Труды Совета по изучению производительных сил Академии Наук СССР. М.
Учен. зап. Казанск. ун-та	Ученые записки Казанского университета. Казань.
Abhandl. prakt. Geol.	Abhandlungen zur praktischen Geologie und Bergwis- senschaftslehre. Halle (Saale)

Am. J. Sci.	American Journal of Sciences. New Haven
Am. Min.	American Mineralogist. Lancaster, Pa
Ann. min.	Annales des mines. Paris
Arch. Naturkunde Liv.-Est.-u. Kurl.	Archiv für die Naturkunde Liv.-Est.- und Kurlands. Dorpat
Atti Reale Accad. Sci. Ist. Bologna	Atti Reale d. Accademia delle Scienze dell'Istituto di Bologna
Beitr. Geophys.	Beiträge zur Geophysik. Zeitschrift für physikalische Erdkunde (Gerlands) Stuttgart, Leipzig
Ber. Dtsch. chem. Ges.	Berichte der Deutschen chemischen Gesellschaft. Berlin
Ber. naturforsch. Ges. Freib.	Berichte der naturforschenden Gesellschaft. Freiburg in Bresgau
Bull. Acad. Sci	Bulletin de l'Académie des Sciences de St.-Pétersbourg
Bull. Com. géol. Finl.	Bulletin de la Commission géologique de Finlande. Helsingfors.
Bull. Geol. Soc. Am.	Bulletin of the Geological Society of America. Rochester
Bull. Soc. géol. France	Bulletin de la Société géologique de France. Paris
Bull. Soc. min. France	Bulletin de la Société minéralogique de France. Paris
Bull. Soc. nat. Moscou	Bulletin de la Société des naturalistes de Moscou
Bull. U. S. Geol. Survey	Bulletin of the United States Geological Survey. Economic Geology. Washington
C. R. Acad. Sci. Belg.	Comptes rendus de l'Académie des sciences, des lettres et des beaux-arts de Belgique. Bruxelles
C. R. Acad. Sci. Paris	Comptes Rendus de l'Académie des Sciences. Paris
C. R. Soc. géol. France	Comptes Rendus de la Société géologique de France. Paris
Econ. Geol.	Economic Geology. Lancaster, Pa
Eng. a. Min. World	Engineering and Mining World. Chicago
Field Mus. Nat. Hist.	Field Museum of Natural History. Geological Series. Chicago
Forstchr. Min.	Fortschritte der Mineralogie. Jena
Gaz. chim. Ital.	Gazzetta chimica Italiana. Roma
Geogr. J.	Geographical Journal. London
Geol. Fören.	Geologiska Föreningens i Stockholm. Förhandlingar. Stockholm
Ind. a. Eng. Chem.	Industrial and Engineering Chemistry. Easton, Pa
J. Am. Chem. Soc.	Journal of the American Chemical Society. Easton, Pa
Jb. Nassausch. Ver. Naturk.	Jahrbuch des Nassauischen Vereins für Naturkunde. Wiesbaden
J. Frankl. Inst.	Journal of the Franklin Institute. Philadelphia
J. Geol.	Journal of Geology. Chicago
Krsbl. Naturf. Ver.	Korrespondenzblatt des Naturforschervereins zu Riga
Meddel. Grönland	Meddelelser om Grönland. Kopenhagen
Mém. Acad. Sci	Mémoires de l'Académie des Sciences de St.-Pétersbourg
Mém. Soc. géol. Nord.	Mémoires de la Société géologique du Nord. Lille
Min. Mag.	Mineralogical Magazine. London
Monogr. U. S. Geol. Survey	Monographs of the United States Geological Survey. Washington
Nachr. wiss. Ges. Göttingen	Nachrichten der wissenschaftlichen Gesellschaft zu Göttingen
Naturwissensch.	Naturwissenschaften. Berlin-Göttingen
N. Jb. Min., Geol. u Paläont.	Neues Jahrbuch für Mineralogie, Geologie und Paläontologie. Stuttgart. До 1833 г. — Jahrbuch für Mineralogie usw.
Phil. Mag.	Philosophical Magazine. London
Rev. gén. sci.	Revue générale des sciences pures et appliquées. Paris
Sb. Naturf. Ges. Univ. Dorpat	Sitzungsberichte der Naturforschergesellschaft der Universität zu Dorpat. Dorpat

Sb. Wien. Akad.	Sitzungsberichte der Wiener Akademie (mathem.—naturw. Klasse). Wien
Scbr. Min. Ges. SPb.	Schriften der russischen mineralogischen Gesellschaft z. St. Petersburg
Tscherm. Min. Petr. Mitt.	Mineralogische und petrographische Mitteilungen herausg. von G. Tschermak. Wien
Verhandl. min Ges. SPb.	Verhandlungen der russischen mineralogischen Gesellschaft zu St. Petersburg
Vidensk. Skrift.	Videnskabselskabets Skrifter. Kristiania
Zbl. Min., Geol. u. Paläont.	Zentralblatt für Mineralogie, Geologie und Paläontologie. Stuttgart
Zs. anorg. Chem.	Zeitschrift für anorganische Chemie. Berlin
Zs. Dtsch. geol. Ges.	Zeitschr. der Deutschen geologischen Gesellschaft. Berlin
Zs. Kryst. u. Min.	Zeitschrift für Krystallographie und Mineralogie. Leipzig
Zs. prakt. Geol.	Zeitschrift für praktische Geologie. Berlin

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
РЕГИОНАЛЬНАЯ ГЕОХИМИЯ	
Геохимия России (выпуск 1)	9
Введение	9
Часть общая	11
Глава I. Типы топоминералогических исследований	11
Глава II. Новые задачи топоминералогических исследований	15
Глава III. Происхождение и образование минералов	20
Основные положения генетической минералогии	20
Определение генетического типа	22
Связь генетического типа с зонами земной коры	23
Последовательность генетических типов (циклы) и их хронология	26
Энергетика геохимических процессов	28
Физико-химический анализ генетических типов	30
Поля равновесия минеральных тел	32
Глава IV. Генетические типы	32
Образования огненно-жидких магм	33
Гидротермальные выделения в пустотах изверженных пород	33
Жильные образования	34
Пневматолиты	35
Контакты	36
Регионально-метаморфические образования	36
Водные осадки, синхроничные и диагенетические (минералы спонгелита и диагенеза)	37
Процессы катагенеза	37
Процессы поверхностного разрушения (гипергенез)	38
Генетические типы в осадочных породах	39
Глава V. Генетические циклы	40
Главнейшая литература по генезису минералов	48
Глава VI. Распространение и роль химических элементов	49
Количественное распространение элементов	49
Законы распределения элементов в земной коре	56
Общие закономерности распределения элементов в земной коре	61
Связь определенных ассоциаций с участками земной коры	64
Главнейшая литература	65
Глава VII Геохимия отдельных областей	67
Часть специальная. Описание отдельных геохимических областей России	
Введение	71
Область первая. Восточная часть Фенноскандинавского щита	74
Границы	74
Геология	75
Орография и месторождения	77

А. Архейский щит	78
Породы	78
Минералы	80
Элементы	82
Общая геохимическая характеристика	86
Генетические типы	86
Генетические циклы	88
Заключение	95
Б. Щелочные массивы	96
Геология	96
Породы	96
Минералы	97
Элементы	98
Генетические циклы	100
Заключение	102
Главнейшая литература	103
<i>Область вторая. Кембросилур и девон северо-запада России</i>	104
Границы	104
Геология	105
Орография и месторождения	106
Минералы	107
Элементы	108
Генетические типы	114
Генетические циклы	115
Общее заключение	122
Главнейшая литература	123
<i>Область третья. Московский каменноугольный бассейн</i>	124
Границы района	124
Геология всей области	125
А. Палеозойские отложения	125
Геология	125
Минералы каменноугольных отложений	126
Генетические типы палеозойской свиты Центральной России	127
Элементы палеозойских отложений	128
Б. Мезозойские и четвертичные отложения	134
Геология	134
Минералы мезозойских и более молодых отложений	134
Генетические типы	135
Элементы	136
Генетические циклы центрального района	139
А. Палеозой	139
Девон и переходные слои	139
Угленосный ярус	140
Продуктосовые и московские известняки	143
Катагенез московских известняков	145
Гжельские слои	148
Б. Генетический цикл мезозойских отложений и ледникового покрова	148
Общее заключение	150
Главнейшая литература	151
<i>Область четвертая. Пермские море и суша</i>	152
Границы	152
Геология	153
Орография и месторождения	155
Минералы	156
Элементы	157
Генетические типы	169
Генетические циклы	170
I. Западная часть пермского моря и суши	170
II. Восточная часть пермского моря — Приуралье	177
Заключение	179
Главнейшая литература	180
<i>Приложения:</i>	
Геохимические таблицы I—VII	184
Указатель химических элементов	202

Указатель минералов и горных пород	203
Указатель главнейших геологических и геохимических терминов . .	206
Указатель географических названий	208
Геохимические проблемы Союза. Очерк первый. Основные черты геохимии Союза	211
Введение	211
I. Общие соотношения	211
II. Определяющие факторы	212
III. Влияние отдельных факторов на геохимию	215
IV. Геолого-геохимическая характеристика СССР	220
V. Узловые точки пересечения или наложения геохимических систем .	233
VI. Геохимия и промышленные центры	235
Заключение, выводы, пожелания	235
Литература	238
Геохимические проблемы Сибири	239

ХИМИЯ КОСМОСА

Химические элементы Земли и космоса	245
Введение	245
I. Химический состав земной коры	247
II. Законы распространения элементов в земной коре	261
III. Законы распределения элементов на разных глубинах	266
IV. Химический состав центрального ядра Земли	272
V. Химический состав метеоритов	273
VI. Причины распределения химических элементов в земной коре . .	279
VII. Связь распределения химических элементов с периодической систе- мой и строением атома.	285
VIII. Химия космоса. Наша солнечная система: Луна, планеты, кометы.	297
IX. Химия Солнца	300
X. Химия туманностей и звезд.	304
XI. Перераспределение химических элементов в космосе.	311
XII. Основные проблемы космической химии	319
Заключение	332
Строение и состав Земли как космического тела	334
I. Введение	334
II. Кларковские числа	337
III. Зональность Земли	340
IV. Средний состав Земли в целом	350
V. Сравнение Земли с метеоритами	353
VI. Сравнение Земли с другими космическими телами	355
VII. Общие законы химии мироздания	360
VIII. Заключение. Химические законы истории Земли	362

О ЗАКОНАХ ГЕОХИМИИ

Законы эволюции в химии земной коры	367
Введение	367
Физико-химические циклы земной коры	368
Из наблюдений в природе	370
Эволюция магматического процесса	371
Заключение	374
Периодический закон Менделеева в свете современной науки	377
Введение	377
Исторические пути	380
Эволюция содержания	382
Эволюция формы	385
Новые проблемы	388
Новые области науки	391
Общий анализ	396

ПРИКЛАДНАЯ ГЕОХИМИЯ

Институт им. М. В. Ломоносова и задачи его учреждения	403
Введение	03
I. Современные проблемы геохимии, кристаллохимии и минералогии	04
II. Организация отдельных учреждений	417
Геохимический институт	417
Кристаллографический институт	423
Минералогический институт	425
Музеи	428
Общие и вспомогательные учреждения Ломоносовского института	436
III. Роль Ломоносовского института в социалистическом строительстве Союза	440
Геохимические и минералогические методы поисков полезных ископаемых	443
От автора	443
Введение. Роль и значение поисков полезных ископаемых в СССР	444
Общие понятия	444
Основные задачи поисков в СССР	447
Общая характеристика поисковых работ в СССР	449
Глава I. Основы геохимии	450
1. Задачи современной геохимии	450
2. Ход геохимических процессов и законы геоэнергетики	454
Эки и вэки	456
3. Основные факторы геохимических процессов	466
Температура (466). Давление (467). Концентрация водородных ионов—рН (467).	
Окислительно-восстановительный потенциал—гН (471)	471
4. Концентрация и рассеяние элементов	471
Глава II. Поисковые признаки (геохимические и минералогические)	475
Введение	475
1. Цвет	475
Идиохроматические бесцветные минералы	477
Идиохроматические металлические окраски	478
Идиохроматические неметаллические окраски	478
Соединения желтого цвета. Соединения бурого цвета	478
Соединения красного цвета. Соединения черного цвета	479
Соединения зеленого цвета. Соединения синего или голубого цвета	
Соединения фиолетового цвета	
Анализ хромофоров	480
Бесцветные хромофоры. Желтые хромофоры. Бурые хромофоры. Красные хромофоры. Черные хромофоры. Зеленые хромофоры. Синие и голубые хромофоры. Фиолетовые хромофоры. Металлические хромофоры	
Отдельные элементы как хромофоры	483
Шкалы цвета	483
Несколько практических советов для пользования цветом при поисках в полевой работе	485
2. Твердость и прочность минералов	488
3. Удельный вес, атомный и молекулярный объемы	493
Удельный вес	493
Атомный объем (АУ)	496
Молекулярный объем (МУ)	497
4. Типоморфные свойства минералов. Зависимость свойств минералов от генезиса	498
Обзор типоморфных минералов	498
Кварц. Магнетит. Циркон. Гранаты. Нефелин. Пироксены и роговые обманки. Ортоклаз и микроклин. Амазонский камень. Топаз. Турмалин (шерл). Берилл. Слюды. Апатит. Флюорит (плавиковый шпат). Каолиниты (кристаллические). Кальцит	
Свойства полезных ископаемых в зависимости от типа их генезиса	510
5. Ассоциация и парагенезис минералов и химических элементов (последовательность выпадения, геохимические уровни)	512
6. Связь парагенезиса минералов и элементов с петрографией, тектоникой, литогенезом и палеогеографией. Геохимические системы, провинции и пояса	517

Связь с петрографией	517
Связь с тектоникой	522
Связь с литогенезом и палеогеографией	522
Установление геохимических систем	523
7. Периодические минералы, минералы-хроноксены	524
Геохимические эпохи	527
Глава III. Общая геохимическая методика	529
1. Введение	529
2. Общие задачи геохимических исследований в поле	530
3. Определение генезиса месторождения	532
4. Применение менделеевской таблицы	534
Таблица Менделеева, ее формы и отдельные направления	534
Практическое использование менделеевской таблицы	541
5. Геохимические диаграммы	544
Введение	544
Обычная форма геохимической диаграммы	548
Диаграммы в форме кривых	549
Практическое использование диаграмм	549
Особый тип диаграмм Г. П. Барсанова	551
Пример практического построения диаграммы	554
6. Геохимическое картирование	556
7. Анализ отдельных элементов и определение кларков	559
Пример работ в Средней Азии	560
8. Географо- и техно-экономический анализ	562
9. Топогеохимическое и топоминералогическое описание	564
Приложение I. Анализ месторождений на глубину	567
Приложение II. Изучение геохимических комплексов	568
Глава IV. Специальные методы поисков	570
1. Введение	570
2. Методы геохимической корреляции	571
3. Методы изучения рассеяния	573
А. Ореолы вторичного рассеяния	574
I. Солевые ореолы рассеяния. II. Механические ореолы рассеяния.	
III. Газовые ореолы рассеяния. Примеры изучения ореолов вто-	
ричного рассеяния	579
Б. Ореолы первичного рассеяния (ареалы распространения)	580
В. Комбинированные районы первичного и вторичного рассеяния	580
Приложение. Изучение природных эманаций дисперсных систем, рас-	
творов и рассолов	580
4. Особые методы поисков	581
Поиски на основе изучения процессов окисления	581
Поиски по термическому эффекту. Поиски по химизму вторичных	
процессов	582
Поиски солей на основе их вторичной миграции	582
Применение редокса гН (окислительно-восстановительного потенциала)	
Применение определений pH	583
Биохимические (ботанические) методы	584
5. Методы визуальной аэрофотосъемки	586
6. Геофизические методы поисков	587
Глава V. Поиски минералов и полезных ископаемых в областях определен-	590
ных генетических типов	590
Введение	590
А. Поиски в породах магматических и их дериватах	591
1. Поиски в области ультраосновных пород и серпентинитов (прото-	
кристаллизации)	591
Общее введение. Химические элементы протокристаллизации. Пол-	
ные свойства ископаемых протокристаллизации. Поисковые указания	
2. Поиски в районе габбро-норитовых пород	594
3. Поиски в районах диоритов и гранодиоритов	595
4. Поиски в районах нефелинщепчатых магм и их пегматитов	596
Введение. Полезные ископаемые и элементы. Практические указания	
5. Поиски в районах гранитных магм	600

Приложение. Грейзены, березиты, вторичные кварциты	603
6. Поиски в гранитных пегматитах	604
Введение	604
Поиски и разведка пегматитовых месторождений. Комплексная эксплуатация минералов гранитных пегматитов. Значение геохимических диаграмм пегматитов для разрешения ряда промышленных проблем	
Б. Поиски в метаморфических породах	611
7. Поиски в районах контактов магматических пород	611
Гранит и карбонаты. Гранит и ультраосновные (основные) породы. Гранит и глинистые породы или сланцы. Гранит и кислые эффузивы (порфиры, туфы и т. д.). Габброидные породы и карбонаты. Общий вывод	
8. Поиски в районах гнейсов и кристаллических сланцев	616
В. Поиски в эффузивных породах и образованиях	617
9. Поиски в областях базальтовых или диабазовых покровов	617
10. Поиски в кислых эффузивных породах (гранитпорфирах, кварцпорфирах, трахитах, липаритах и т. д.)	618
11. Поиски в районах действующих вулканов	619
12. Поиски в районах угольных пожаров	621
Г. Поиски в тектонически нарушенных районах	621
13. Поиски в районах тектонических движений и дислокаций	621
14. Поиски в районах пликтивных дислокаций и шаржажей	623
15. Поиски в районах изостатических колебаний (перемещения береговых липий)	624
Д. Поиски в термальных источниках	625
16. Поиски в областях рудных жил	625
Введение. Элементы рудных жил. Геохимический анализ последовательности кристаллизации. Геохимические концентры халькофилов. Геохимический градиент. Практические выводы из геохимических схем	
17. Поиски в областях горячих минеральных источников	639
Приложение I	640
Приложение II	640
18. Поиски в области распространения термальных кварцевых жил	640
Е. Поиски в осадочных породах	641
19. Поиски в областях песчаников и кварцитов	641
20. Поиски в области известняков (мраморов, мела) и мергелей	642
21. Поиски в областях доломитов и доломитовых мергелей	644
22. Поиски в глинах и близких к ним породах	645
Глины обыкновенные, отбельные и огнеупорные. Каолины	
23. Поиски в областях гипсов и ангидритов	647
24. Поиски в районах осадков солей (эвапоратов)	648
25. Поиски в областях современных соляных озер	651
26. Поиски в областях пустынных районов	652
27. Поиски в железных шляхах рудных жил	653
28. Поиски в зонах цементации рудных жил	655
29. Поиски в карстовых областях и пещерах	656
30. Поиски в районах древней коры выветривания	657
31. Поиски в песках, россыпях и шлихах	660
32. Поиски в области пресных озер и их отложений	663
33. Поиски в районах холодных источников (ключей)	664
Приложение. Поиски вод	664
34. Поиски в районах нефтяных месторождений	667
Приложение.	667
35. Поиски в области болот и торфяников	669
36. Поиски в месторождениях угля (бурого и каменного)	669
37. Поиски в приполярных районах	670
38. Поиски среди ледниковых валунов	674

Глава VI. Поиски отдельных химических элементов (в порядке менделеевской таблицы)	674
2. Гелий	675
3. Литий	676
4. Бериллий	677

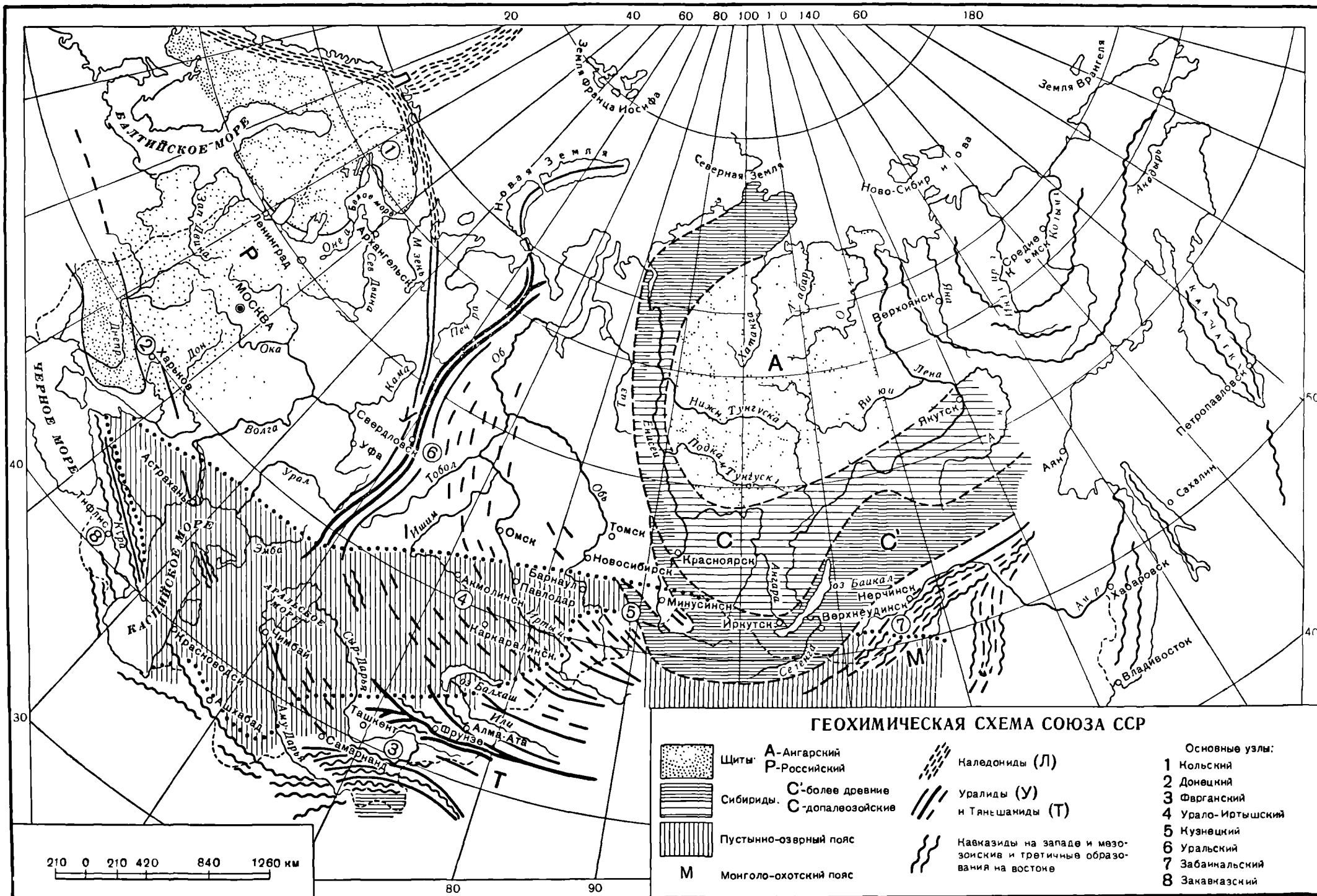
5. Бор	678
6. Углерод	679
7. Азот	680
9. Фтор	680
10. благородные газы	882
11. Натрий	682
12. Магний	683
13. Алюминий	684
14. Кремний	686
15. Фосфор	686
16. Сера	688
17. Хлор	688
19. Калий	689
20. Кальций	689
21. Скандий	689
22. Титан	690
23. Ванадий	691
24. Хром	691
25. Марганец	692
26. Железо	693
27. Кобальт	694
28. Никель	695
29. Медь	696
30. Цинк	696
31. Галлий	697
32. Германий	698
33. Мышьяк	698
34. Селен	698
35. Бром	699
37. Рубидий	699
38. Стронций	700
39. Иттрий	701
40. Цирконий	701
41. Ниобий и (73) тантал	702
42. Молибден	703
47. Серебро	704
48. Кадмий	705
49. Индий	705
50. Олово	706
51. Сурьма	708
52. Теллур	709
53. Иод	709
55. Цезий	710
56. Барий	711
57—71. Редкие земли	711
72. Гафний	712
73. Тантал	712
74. Вольфрам	712
78 (76, 77, 44, 45, 46). Платиновые металлы	714
79. Золото	714
80. Ртуть	716
81. Таллий	717
82. Свинец	717
83. Висмут	718
90. Торий	718
92. Уран и (88) радий	719
Глава VII. Поиски отдельных полезных минералов (главнейших)	720
Агат	721
Алмаз	722
Андалузит, джунгтерит	722
Асбест (кризотилловый)	723
Гипс и ангидрит	724
Глаукофант	724
Глины обелгивающие (сукновальные глины, фуллеровы земли, бентониты, асканит, палычкин, гумбрин, кил и др.)	725
Горный хрусталь	725
Гранаты	727

Драгоценные, декоративные и технические камни	728
Исландский шпат	729
Квасцы (алунит)	729
Колчедан железный (пирит)	730
Корунд и наждак	730
Краски минеральные	731
Полевой шпат	731
Слюды (мусковит)	732
Положительные признаки	735
Отрицательные признаки	736
Серпентиниты и оливиниты	736
Тальк (стеатит)	736
Топаз	737
Флюорит	737
Яшмы	737
<i>Глава VIII. Геохимик в поле</i>	<i>738</i>
Введение	738
Снаряжение	738
Укладка собранных материалов	739
Сбор материалов при геохимических поисках	740
Запись наблюдений	741
Методы и последовательность работы	742
Краткий указатель литературы	745
Объяснение специальных геохимических терминов	748
Указатель элементов, минералов и горных пород	753
Список принятых сокращений названий основных периодических изданий	758

Печатается по постановлению
Редакционно-издательского совета
Академии Наук СССР

Редактор издательства Н. Р. Кун. Технический редактор Е. Н. Симкина. Корректор Н. Н. Певцова
РИСО АН СССР № 5255. Т-07210. Издат. № 3864. Тип. заказ № 1175. Подп. к печ. 29/VIII 1953 г.
Формат бум. 70×108¹/₁₆. Бум. л. 24+3 вклейки. Печ. л. 65,76+3 вкл. Уч.-издат. 65,4+0,3 вкл.
Тираж 3500. Цена по прейскуранту 1952 г. 48 руб.

2-я тип. Издательства Академии Наук СССР, Москва, Шубинский пер., д. 10



ГЕОХИМИЧЕСКАЯ СХЕМА СОЮЗА ССР

	Щиты	А-Ангарский		Наледониды (Л)
	Сибириды	Р-Российский		Уралы (У)
	Пустынно-озёрный пояс	С'-более древние		и Тяньшаниды (Т)
	М	С-допалеозойский		Кавказиды на западе и мезозойских и третичных образований на востоке

Основные узлы:

- 1 Нольский
- 2 Донецкий
- 3 Ферганский
- 4 Урало-Иртышский
- 5 Кузнецкий
- 6 Уральский
- 7 Забайкальский
- 8 Закавказский

