



К. И. ЛУКАШЕВ

АТОМЫ И НАША ПЛАНЕТА



К. И. ЛУКАШЕВ

АТОМЫ И НАША ПЛАНЕТА

**ИЗДАТЕЛЬСТВО
«ЗНАНИЕ»**

Москва 1965

Эта книга посвящена геохимии — молодой науке, которая родилась в XX веке на стыке химии и геологии. Геохимия изучает законы, управляющие странствиями и накоплением атомов различных элементов в недрах Земли и на ее поверхности. Автор, известный советский ученый, вице-президент Академии наук БССР К. И. Лукашев, в доступной форме рассказывает о достижениях геохимии и о том, какую помощь она оказывает в практической деятельности человека.

К ЧИТАТЕЛЮ

Автор всегда пользуется предисловием, чтобы рассказать в двух словах о содержании своей книги, привлечь внимание к рассмотренным в ней проблемам еще до того, как читатель в нее углубится. Какие же вопросы мы затронем в предлагаемой книге, в чем их научный и практический интерес?

Геохимия, которой будет посвящена наша книга, — это наука о химии Земли, о многообразных химических процессах, которые протекают в ее недрах и на поверхности. В результате этих процессов «кирпичики мироздания» — атомы элементов — образуют миллионы и сотни миллионов разнообразных минеральных и органических соединений. Значит, прежде всего мы и расскажем об участии элементов Земли в химических реакциях, о том, как эти элементы сочетаются в минералах, породах и месторождениях, в почвах, растительных и животных организмах.

Геохимия изучает закономерности поведения атомов (элементов) в земной коре, объясняет, какие факторы вызывают перемещения их в Земле, почему в одних случаях определенные элементы накапливаются и образуют крупные месторождения полезных ископаемых, в других — рассеиваются в земной коре и находятся в ней в малых и ультрамалых количествах.

Установив законы распространения химических элементов, их концентрации и рассеяния в земной коре, можно решить одну из важнейших задач геологической науки — разумно, на научной основе вести поиски полезных ископаемых, чтобы как можно полнее использовать минеральные богатства нашей планеты.

Изучение истории Земли, ее взаимосвязи с другими мирами Вселенной, условий и времени образования ее горных пород привлекает исключительно большое внимание всех специалистов в области наук о Земле. Геохимия помогает определять абсолютный возраст горных пород и реконструировать условия их обра-

зования и дальнейшей эволюции. Таким образом, она вносит крупный вклад в расшифровку многовековых процессов образования Земли, ее догеологического и геологического прошлого. Изучая существовавшие в древности условия осадкообразования, геохимия позволяет восстанавливать былые биосферы с характерными для них минеральными и органическими соединениями. Это дает возможность выделять территории земной коры со специфическими условиями миграции элементов и их сочетаний.

Одна из характерных особенностей хозяйственной деятельности человека — изменение химического состава окружающей его природы. Люди создают новые сочетания элементов в литосфере, атмосфере, гидросфере, биосфере. Изучение геохимических закономерностей этих изменений помогает решать многие вопросы географии, биологии, медицины, целенаправленно использовать природные богатства. В частности, данные геохимии находят исключительно важное применение в сельскохозяйственном производстве для повышения плодородия почв, урожайности культур и продуктивности животноводства, для борьбы с заболеваниями животных и растений, вызываемыми избытком или недостатком тех или иных элементов в почвах, природных водах, пище. Все эти вопросы также будут рассмотрены в нашей книге.

Благодаря открытиям физики и химии, достижениям геофизики, геохимии и других наук человек в настоящее время располагает обширными сведениями о геофизических и геохимических особенностях нашей планеты и космоса, о рождении и перемещении атомов и изотопов, о распределении их в земном и космическом веществе. Миграция атомов в мировом пространстве, их энергия и многообразные превращения в природе представляют собой, очевидно, одну из самых могучих движущих сил развития Вселенной, ее эволюции во времени и пространстве.

Геохимия вместе с физическими и химическими науками дает человечеству новые знания о закономерностях распределения элементов, атомов и их изотопов во Вселенной и вносит крупный вклад в материалистическое миропонимание, в решение практических вопросов изучения Земли и космоса.

Опираясь на законы сочетания атомов в кристаллах и минералах, человек создает новую, синтетическую химию — химию полимеров, разнообразных искусственных камней, сплавов, красок, новых материалов. С помощью редких и редчайших элементов он конструирует совершенные аппараты и приборы. Он разрабатывает новые химические установки для использования всех видов энергии, таящейся в каждом минерале, элементе, атоме и элементарной частице. И в решении этих вопросов геохимия также играет большую роль. Она изучает кристаллохимическое строение и структуру природного вещества, устанавливает в нем геохимическое сочетание атомов и ионов, открывая пути направ-

ленного синтеза искусственных кристаллов и минералов, разнообразных твердых тел с заранее рассчитанными свойствами.

Выдающийся геохимик, талантливый популяризатор науки академик А. Е. Ферсман писал, что задача геохимии — «подчинить себе весь атом, подчинить его своей воле, воле торжествующего человека, превращающего все грозные и вредные силы природы в полезные. Мы хотим всю природу, всю менделеевскую таблицу элементов положить к ногам трудящегося человечества... Вот смысл и задача нашей геохимической работы...»

СЛАГАЕМЫЕ НОВОЙ НАУКИ



Рождение геохимии

Термин «геохимия» (то есть химия Земли) впервые был предложен швейцарским ученым Х. Ф. Шёнбейном в 1838 году. Он писал, что прежде чем вести речь о настоящей геологической науке, необходимо создать геохимию, которая должна изучать химическую природу масс, составляющих земной шар.

Зарождение геохимии было подготовлено работами многих выдающихся ученых — философов, физиков, химиков, геологов и минералогов. В основу этой науки легли и атомистические представления мыслителей древности, и сочинения алхимиков, познавших многие свойства элементов, и особенно физические и химические идеи нового времени, когда исследователи глубоко проникли в тайны атома.

В России геохимические проблемы были близки еще М. В. Ломоносову. Одним из первых он заложил фундамент нового представления о минерале как о продукте химической жизни земной коры.

Виднейшую роль в становлении и развитии геохимической науки сыграли советские ученые. Академик В. И. Вернадский впервые дал определение геохимии как науки об истории атомов на Земле. Ему принадлежат выдающиеся обобщения, превратившие геохимию в подлинно современную, передовую науку; он сформулировал ее основные задачи, принципы и методы. Дальнейшую разработку геохимических идей получили в трудах замечательного советского ученого академика А. Е. Ферсмана. Крупный вклад в разработку геохимических проблем внесли также наш выдающийся биогеохимик академик А. П. Виноградов, геохимики академик Б. Б. Полюнов, член-корреспондент АН СССР А. А. Сауков и другие советские ученые.

Из зарубежных ученых, принимавших большое участие в развитии новой науки, назовем американского исследователя Ф. Кларка, впервые подсчитавшего среднее содержание элементов в земной коре, и норвежца В. М. Гольдшмидта, изучавшего

кристаллохимию атомов и ионов, их поведение и распределение в расплавах, а также редкие элементы земной коры.

В настоящее время геохимические идеи развивают за рубежом американский ученый Б. Мейсон, финские исследователи К. Ранкама и Т. Сахама и другие.

Изучение химических элементов, атомов и элементарных частиц, их строения и свойств, законов, которыми управляется их поведение в природе, создание научной картины материального мира — одна из самых захватывающих проблем современной науки.

Понять геохимические закономерности распределения элементов помогают современная атомная и ядерная физика, физическая химия и химическая физика. В последние годы свой вклад в геохимию вносит и космонавтика. Исследования, выполняемые с помощью спутников, позволяют геохимикам изучать химический состав Вселенной.

Без преувеличения можно сказать, что современная геохимия представляет собой синтез научных достижений двадцатого века. Она знаменует новый подход к изучению химических элементов и интерпретации сложных явлений химической и биологической жизни земной коры — подход, основанный на исследованиях миграций атомов и законов их сочетания.

Геохимия — синтез наук

Современная геохимия — это не только важнейшая лограничная область геологических и физико-химических знаний, но и комплексная наука, состоящая из отдельных важных отраслей и направлений.

Общая геохимия изучает физические и химические свойства атомов и элементов, вытекающие из периодического закона Менделеева, и устанавливает закономерности миграции, распределения и сочетания атомов и элементов в Земле и геосферах на основе достижений атомной физики, физической химии, кристаллофизики и геотермодинамики. Общая геохимия разрабатывает теорию геохимических процессов, протекающих в различных условиях земной коры, и формулирует основные закономерности этих процессов. Важнейшая ее задача — изучение качественного состава земной коры в связи со свойствами атомов и исследование количественного распределения химических элементов в различных зонах Земли, геохимических системах и циклах.

Литогеохимия изучает химический состав горных пород земной коры, выявляет закономерности распределения и сочетания химических элементов, связанные с проявлением геохимических циклов породообразования в различных геологических, тектонических, физико-географических и других условиях. Эта отрасль геохимии исследует отдельные участки земной коры, где содер-

жание тех или иных химических элементов повышено по сравнению со средним их содержанием в земной коре — так называемые геохимические провинции и месторождения полезных ископаемых, образовавшиеся в результате действия разнообразных глубинных и поверхностных процессов.

Гидрогеохимия изучает природные воды и закономерности сочетания и распределения в них химических элементов. Важный раздел гидрогеохимии — исследование эволюции химического состава воды в океанических и морских бассейнах в связи с общим геологическим развитием материков и океанов. Гидрогеохимия разрабатывает методы поисков полезных ископаемых, основанные на изучении распределения химических элементов в природных водах.

Газогеохимия изучает газовый состав и режим земной коры и биосферы, выясняет геологические и химические условия образования газов и закономерности их миграции и накопления в толщах земной коры. Газогеохимия устанавливает связи выходов газов на поверхность с геологическими и тектоническими процессами породообразования, а также с химическим составом газовых компонентов, и разрабатывает методы поисков и разведок газовых месторождений и газоносных толщ.

Биогеохимия изучает роль живого вещества, то есть совокупности живых организмов, в миграции и биологическом круговороте химических элементов, устанавливает распространение в биосфере макро- и микроэлементов; выясняет условия гумусообразования в почвах и роль микроэлементов в жизни и развитии организмов.

Почвенная и ландшафтная геохимия изучает закономерности, взаимосвязь и сопряжение химических элементов в различных компонентах ландшафтов; устанавливает геохимические типы и разновидности ландшафтов, разрабатывает ландшафтно-геохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых. Важнейшая задача ландшафтной геохимии — разработка способов геохимической мелиорации ландшафтов с целью повышения их продуктивности.

Радиогеохимия изучает радиоактивные и изотопные свойства атомов и элементов земной коры, роль радиоактивных процессов в энергетическом балансе Земли, распределение в земной коре радиоактивных элементов, разрабатывает методы определения абсолютного возраста пород.

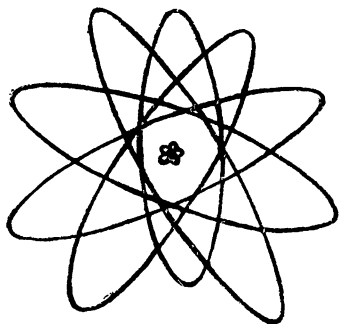
Аналитическая геохимия занимается разработкой наиболее эффективных методов лабораторного и полевого геохимического изучения вещественного состава земной коры, которые используются при поисках и разведке полезных ископаемых. Эта отрасль геохимии вооружает науку специальными видами анализов: спектральными, полуколичественными, химическими, физико-химическими, биогеохимическими, изотопными и радиоактивными. Аналитическая геохимия разрабатывает и совер-

шенствует методы определения содержания микро- и ультрамикрорезультатов и их следов в минералах, породах, почвах, природных водах и организмах.

Палеогеохимия помогает восстанавливать древние физико-географические условия и геохимические процессы породообразования в отдельных областях земной коры.

Как мы видим, все отрасли геохимии не только имеют чисто теоретическое значение, не только дают возможность познать химию Земли, но и в той или иной степени способствуют практическому использованию природных богатств в хозяйственной деятельности человека.

Недаром академик А. Е. Ферсман подчеркивал, что из законов геохимии рождаются новая география, новые пути экономики, новые узлы промышленности, новые источники и богатства техники и культуры.



ЗАКОНЫ АТОМОВ — ЗАКОНЫ ГЕОХИМИИ

Распределение элементов в земной коре

Люди уже давно обратили внимание на то, что одних химических элементов в земной коре много, их можно обнаружить в составе почти каждой горной породы, тогда как другие попадают далеко не так часто, в гораздо меньших количествах. При этом такие редко встречающиеся элементы не образуют самостоятельных минералов, а чаще всего присутствуют в горных породах в рассеянном или растворенном состоянии.

В результате обширных исследований ученых разных стран было вычислено содержание химических элементов в различных породах, а также в метеоритах, почвах и органическом веществе. В 1889 году американский геохимик Ф. У. Кларк впервые установил средний химический состав земной коры (впоследствии вычисления среднего содержания элементов производили советские геохимики В. И. Вернадский, А. Е. Ферсман, А. П. Виноградов, за рубежом — И. Фохт и другие ученые).

Сейчас среднее содержание того или иного элемента в земной коре в весовых или атомных процентах — важная и часто применяемая в геохимии величина. По предложению академика А. Е. Ферсмана, она получила название кларка данного элемента.

Метод кларков ныне общепризнан и играет большую роль не только в геохимической науке, но и в поисках месторождений полезных ископаемых. Он позволяет устанавливать качественное и количественное соотношение элементов в минералах и породах различного происхождения и делать выводы о распространенности их в отдельных районах Земли.

Существует закономерная связь между величиной среднего кларка элемента и тем, насколько часто встречаются его месторождения. Практически доказана связь промышленных концентраций, то есть месторождений, пригодных для промышленного использования, с повышенными кларками для железа, ти-

тана, хрома, кобальта, платины, вольфрама, олова и некоторых других элементов.

Наиболее распространен в земной коре кислород, составляющий 47,2 процента от ее веса. За ним идут кремний — 27,6, алюминий — 8,8, железо — 5,1, кальций — 3,6 процента.

Таким образом, из всех химических элементов на долю этих пяти приходится свыше 92 процентов веса земной коры. Если же к упомянутым элементам прибавить еще три — натрий (2,6 процента), калий (2,6 процента) и магний (2,1 процента), то эти восемь элементов составят более 99 процентов земной коры. Все остальные образуют менее одного процента земной коры. Значительная часть их рассеяна в горных породах, и лишь небольшая доля собрана в той или иной концентрации в рудных телах и месторождениях. Из них видное место занимают водород, углерод, фосфор, сера, хлор, фтор, титан, марганец и хром.

Эти элементы составляют десятые и сотые доли процента от веса земной коры. Тем не менее они играют исключительно важную роль в образовании горных пород, месторождении полезных ископаемых и в жизненных процессах, протекающих в биосфере.

Сочетаясь в разных пропорциях, перечисленные элементы формируют все внешние оболочки Земли, обуславливают жизнь на нашей планете.

В морской воде 96,54 процента веса образуют кислород и водород, 2,95 процента — хлор и натрий. Остальное количество приходится на долю нескольких десятков других химических элементов, в том числе магния, серы, кальция, калия и брома.

В атмосфере 98,66 весовых процента составляют азот и кислород, 1,286 процента — аргон, 0,04 процента — углекислый газ; кроме этого, в состав воздуха входят в небольших количествах другие газы — такие, как гелий, криптон и ксенон.

В среднем химическом составе живого вещества на долю кислорода, углерода и водорода приходится 98,5 процента веса. Остальные полтора процента — это прочие элементы, принимающие участие в жизнедеятельности организмов, в первую очередь азот, сера, фосфор, калий, кальций и железо. Исследования последнего времени показали, что важнейшую роль в процессах жизни играют также йод, марганец, цинк, медь и многие другие элементы.

Из семидесяти химических элементов, встречающихся в земной коре в свободном состоянии, сорок принадлежит к редким, рассеянным. Это литий, бериллий, скандий, галлий, рубидий, ниобий, индий, иттрий, германий, тантал, теллур, гафний, рений, таллий, цезий, радий, актиний, протактиний, редкоземельные элементы (лантаноиды) и другие. Они характеризуются низкими кларками и не дают высоких концентраций в горных породах. Многие из них не имеют самостоятельных минералов.

Редкие, рассеянные элементы извлекают попутно с другими рудными элементами из отходов производства цветных металлов.

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	I	II	III	IV	V	IV	VII	O		
1	$0,15$ 1 H															2 He		
2	$6,5 \cdot 10^{-3}$ 3 Li	$6 \cdot 10^{-4}$ 4 Be	$3 \cdot 10^{-4}$ 5 B									$0,1$ 6 C	$0,01$ 7 N	$47,2$ 8 O	$0,027$ 9 F	10 Ne		
3	$2,64$ 11 Na	$2 \cdot 10$ 12 Mg	$8,80$ 13 Al									$27,6$ 14 Si	$0,08$ 15 P	$0,05$ 16 S	$0,045$ 17 Cl	18 Ar		
4	$2,60$ 19 K	$3,6$ 20 Ca	$6 \cdot 10^{-4}$ 21 Sc	$0,6$ 22 Ti	$0,015$ 23 V	$0,02$ 24 Cr	$0,09$ 25 Mn	$5,10$ 26 Fe	$7 \cdot 10^{-3}$ 27 Co	$0,008$ 28 Ni	$0,005$ 29 Cu	$1,5 \cdot 10^{-3}$ 30 Zn	$5 \cdot 10^{-4}$ 31 Ga	$6 \cdot 10^{-5}$ 32 Ge	$1,6 \cdot 10^{-5}$ 33 As	36 Kr		
5	$0,03$ 37 Rb	$0,04$ 38 Sr	$0,0028$ 39 Y	$0,02$ 40 Zr	$0,001$ 41 Nb	$3 \cdot 10^{-4}$ 42 Mo	$4,3$ 43 Tc	$5 \cdot 10^{-7}$ 44 Ru	$1 \cdot 10^{-7}$ 45 Rh	$1 \cdot 10^{-6}$ 46 Pd	$1 \cdot 10^{-5}$ 47 Ag	$5 \cdot 10^{-5}$ 48 Cd	$4 \cdot 10^{-5}$ 49 In	$1 \cdot 10^{-4}$ 50 Sn	$1 \cdot 10^{-4}$ 51 Sb	$3 \cdot 10^{-5}$ 52 Te	54 Xe	
6	$7 \cdot 10^{-4}$ 55 Cs	$0,05$ 56 Ba	$18 \cdot 10^{-3}$ 57 La	$3,2 \cdot 10^{-4}$ 58 Hf	$2 \cdot 10^{-4}$ 59 Ta	$1 \cdot 10^{-4}$ 60 W	$1 \cdot 10^{-7}$ 61 Re	$5 \cdot 10^{-6}$ 62 Os	$1 \cdot 10^{-7}$ 63 Ir	$5 \cdot 10^{-7}$ 64 Pt	$5 \cdot 10^{-7}$ 65 Au	$7 \cdot 10^{-6}$ 66 Hg	$3 \cdot 10^{-4}$ 67 Tl	$16 \cdot 10^{-3}$ 68 Pb	$2 \cdot 10^{-5}$ 69 Bi	$2 \cdot 10^{-14}$ 70 Po	$7 \cdot 10^{-16}$ 71 At	86 Rn
7	87 Fr	$1 \cdot 10^{-10}$ 88 Ra	$6 \cdot 10^{-14}$ 89 Ac	$8 \cdot 10^{-4}$ 90 Th	$1 \cdot 10^{-10}$ 91 Pa	$3 \cdot 10^{-4}$ 92 U												

$4,6 \cdot 10^{-3}$ 58	$7 \cdot 10^{-4}$ 59	$2,5 \cdot 10^{-3}$ 60	$7 \cdot 10^{-4}$ 61	$12 \cdot 10^{-4}$ 62	$1 \cdot 10^{-3}$ 63	$1 \cdot 10^{-3}$ 64	$1,5 \cdot 10^{-4}$ 65	$4,5 \cdot 10^{-4}$ 66	$1,3 \cdot 10^{-4}$ 67	$4 \cdot 10^{-4}$ 68	$8 \cdot 10^{-5}$ 69	$3 \cdot 10^{-4}$ 70	$1 \cdot 10^{-4}$ 71	Lu
Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tu	Yb	Lu	

Цифры в каждой клетке (вверху) показывают среднее содержание элемента в литосфере в весовых процентах — кларк данного элемента (по А. П. Виноградову).

Например, рений получают из молибденовых руд, индий и кадмий — из цинковой обманки (сфалеритов), гафний — из циркониевых руд, радий — из урановых. Кстати, цинковая обманка, содержащая лишь 0,1 процента индия, ценится больше как индиевая, а не как цинковая руда.

Важным источником получения редких элементов являются также некоторые горные породы (каменный уголь, каменные соли), в которых эти элементы находятся в рассеянном состоянии.

Содержание большинства химических элементов в главных типах горных пород колеблется в значительных пределах. При этом наблюдается следующая основная тенденция: содержание многих групп элементов связано с содержанием в породе двуокиси кремния — кварца, одного из наиболее распространенных минералов земной коры. Например, в так называемых ультраосновных породах, содержащих менее 45 процентов кварца, в 1000 раз меньше калия, чем в кислых породах, где кварца более 65 процентов. Содержание хрома, кобальта, никеля, меди изменяется от ультраосновных пород к кислым в 100 раз; лития, рубидия, цезия, германия, стронция, бария, бора — в 10 раз; в несколько раз изменяется содержание свинца, марганца, молибдена, вольфрама, индия и других элементов.

Изверженные магматические породы отличаются высоким содержанием железа, кальция, магния и несколько меньшим — серы, калия, натрия. В осадочных породах, по сравнению с изверженными, высоко содержание углерода, серы, хлора, бора, мышьяка и других элементов. Среди концентраций элементов осадочного происхождения важное практическое значение имеют россыпи, содержащие золото, платину, редкие земли.

Сейчас в общих чертах выяснены закономерности концентрации химических элементов в отдельных типах осадочных пород и коры выветривания. В грубообломочных породах концентрируются химически устойчивые минералы, содержащие титан, углерод, золото, платину, цирконий, бериллий, торий и другие ценные элементы. Это такие минералы, как ильменит, рутил, алмаз, самородное золото, платиновые металлы, циркон, монацит. В породах, являющихся продуктом сложных химических процессов выветривания, — глинах, бокситах, латеритах — концентрируется основная масса алюминия, галлия, магния, калия, рубидия, цезия, скандия, бериллия. В продуктах окисления железных, марганцевых, полиметаллических сульфидных руд обнаруживаются мышьяк, германий, селен, молибден, вольфрам. В карбонатных осадках, состоящих из углекислых солей, концентрируются такие элементы, как кальций, магний, стронций, барий, редкоземельные металлы. Наконец, в продуктах испарения и осаждения хлоридно-сульфатных солей концентрируются хлор, бром, йод, сера, бор и многие редкие земли.

Ключ к поведению атомов

Почему же одни химические элементы встречаются, как мы видели, совместно, целыми семействами, образуя крупные концентрации в месторождениях, а другие, наоборот, рассеиваются в горных породах, воде и воздухе? Почему азот, кислород, благородные газы составляют основу атмосферы, тогда как хлор, бром, йод, соединенные с натрием, калием, магнием, кальцием, накапливаются главным образом в океанах, морях, озерах и соляных залежах? Почему в природе многие металлы сопровождают друг друга, например, медь, цинк, свинец и олово; свинец, висмут, ртуть и мышьяк; железо, хром, титан, кобальт и никель? Какие законы заставляют те или иные элементы концентрироваться в одних условиях и рассеиваться в других? Что определяет их поведение в природе?

Ответ на все эти вопросы дает изучение химических свойств элементов. А эти свойства определяет знаменитый периодический закон Д. И. Менделеева, открытый великим русским ученым в 1869 году и воплощенный в периодической системе элементов.

Последующее развитие химии и физики обогатило периодическую систему новыми элементами и новыми данными об их свойствах. Было установлено, что атомы одного и того же элемента не одинаковы, а существуют изотопные разновидности элементов с различными атомными весами. Ядра атомов изотопов содержат одинаковое число протонов, но различное число нейтронов. Сейчас известно, что подавляющее большинство химических элементов — это смесь изотопов, из которых наиболее распространенные имеют в ядре четное число протонов и нейтронов. Оказалось, что и физико-химические свойства элементов могут изменяться в зависимости от изотопного состава.

По современным данным, атом состоит из ядра и электронных оболочек. Заряд атомного ядра, то есть количество в нем протонов, и число электронов в его электронных оболочках определяют природу химического элемента, его место в периодической системе, характеризуют всю совокупность свойств элемента.

Атомное ядро построено из протонов и нейтронов. Оно окружено электронами, сочетающимися в определенные группы — электронные оболочки. Электроны одной и той же оболочки находятся примерно на одинаковом расстоянии от ядра. В различных электронных оболочках может быть разное максимальное число электронов. В первой из них может быть один электрон, как у водорода, или два, как у гелия. Начиная с гелия, во всех элементах первая оболочка полностью замкнута, заполнена, и далее увеличение количества электронов происходит путем строительства второй оболочки. Элемент № 3 — литий — имеет в ней один электрон, а максимальное число электронов во второй обо-

лочке, наблюдающееся у неона, равно 8. В третьей электронной оболочке может быть уже 18 электронов, в четвертой — 32.

Внутри каждой электронной оболочки можно различать подгруппы электронов, отличающиеся друг от друга по своим свойствам и включающие в себе по 2, 6, 10 и 14 электронов.

Эти данные, полученные чисто теоретически на основе современной квантовой теории, полностью соответствуют периодической таблице Менделеева.

Заполнение электронных оболочек в первых трех периодах таблицы идет нормально, то есть постепенно полностью заполняются внешние оболочки. В четвертом и пятом периодах сначала идет достройка электронами предыдущих, а затем уже создание внешних оболочек. В шестом периоде заполняется даже не предыдущая, а третья (если считать от внешней) электронная оболочка, что определяет исключительную геохимическую близость расположенных здесь редкоземельных элементов. В седьмом периоде заполнение еще больше осложняется.

От размещения электронов в оболочке зависит поведение элементов и атомов в химических реакциях и их активность.

Те элементы, у которых наружные электронные оболочки построены одинаково, то есть содержат одинаковое число электронов, обладают общностью или близостью химических свойств. При полном заполнении оболочки (например, у неона) атом не стремится ни захватывать, ни отдавать электроны, поэтому он инертен. Другое дело, когда внешняя электронная оболочка не заполнена (например, у фтора) или, наоборот, в ней присутствуют «лишние» электроны (у натрия). В этих случаях атомы стремятся приобрести недостающий или отдать лишний электрон, превращаясь в отрицательно или положительно заряженные ионы.

Мерой прочности связи электронов наружной оболочки с ядром является так называемый ионизационный потенциал, то есть минимальная энергия, необходимая для того, чтобы оторвать электрон от атома. Чем меньше этот потенциал, тем легче атом теряет наиболее слабо связанные электроны. Наибольшими потенциалами ионизации характеризуются благородные газы, обладающие устойчивым строением наружных электронных оболочек. Наименьшие потенциалы ионизации свойственны атомам щелочных металлов и других элементов, у которых электронные оболочки удалены от ядра и электроны слабо с ним связаны. Среди щелочных металлов наименьшим ионизационным потенциалом обладает самый тяжелый из них — цезий.

С радиусом атомов и ионизационным потенциалом теснейшим образом связаны металлические свойства элементов. Периодичность таблицы Менделеева проявляется в том, что в каждой группе эти свойства усиливаются сверху вниз. С уменьшением атомных радиусов и возрастанием ионизационных потенциалов

в конце каждого периода наблюдается переход от металлических к неметаллическим свойствам.

Следует отметить, что в настоящее время в геохимической характеристике элементов используется большой комплекс данных, в частности размеры и заряды атомов и ионов, радиусы и их соотношения, типы кристаллической связи и др.

Геохимики установили, например, что существует определенная закономерность между валентностью (зарядом) и радиусом ионов. Радиусы ионов уменьшаются с увеличением валентности, с увеличением же порядкового номера элементов радиусы ионов увеличиваются. У ионов одного и того же элемента размеры уменьшаются при увеличении заряда (например, для $\text{Fe}^{++} = 0,83\text{\AA}$; для $\text{Fe}^{+++} = 0,67\text{\AA}$; для $\text{Ti}^{+++} = 0,69\text{\AA}$; для $\text{Ti}^{++++} = 0,64\text{\AA}$). Установлено также, что ионы разной валентности одного и того же вещества имеют совершенно различные свойства (например, двухвалентное и трехвалентное железо).

У атомов, внешние оболочки которых содержат одинаковое число электронов, с увеличением порядкового номера падает окислительная способность и, наоборот, растет восстановительная.

Из других геохимических закономерностей, зависящих от свойств атомов и элементов, можно назвать образование кристаллохимических связей и энергию кристаллической решетки.

В кристаллохимии выделяются ионные, ковалентные, металлические и вандерваальсовские связи. Ионные связи обусловлены электростатическим притяжением противоположно заряженных ионов, например ионов натрия и хлора в кристаллической структуре поваренной соли NaCl . Ковалентные связи наблюдаются в молекулах газов, а также в большинстве органических соединений, и создаются за счет совместного участия одной или нескольких пар тесно сближенных электронов в образовании устойчивых наружных электронных оболочек соседних ядер. Металлические связи характерны для металлов, некоторых сульфидов, арсенидов и других соединений и образуются за счет притяжения между положительно заряженными остовами атомов и всеми свободными «избыточными» электронами. Наконец, вандерваальсовские — остаточные связи, более слабые, чем все перечисленные, существуют в молекулярных структурах между молекулами. Существование различных типов связей имеет важное значение для объяснения многих геохимических закономерностей.

От заряда и радиуса ионов зависит энергия кристаллической решетки, которая измеряется работой, потребной для разрыва кристаллической структуры вещества на отдельные ионы. С энергией кристаллической решетки связаны растворимость, летучесть, твердость и другие свойства, характеризующие устойчивость химических соединений. Изучение энергии кристаллической решетки привело А. Е. Ферсмана к созданию геоэнергети-

ческой теории, объясняющей многие процессы образования минералов, их кристаллизацию из растворов при понижении температуры, их распределение в породах и образование определенных ассоциаций и семейств элементов.

Именно строением атомов обусловлены закономерности миграции и распределения элементов в горных породах, гидросфере, атмосфере и организмах, закономерности образования определенных химических соединений и сочетаний элементов в минералах и породах. Периодический закон Д. И. Менделеева является поэтому основным законом геохимии.

Атомы-родственники и семейства элементов

Мы видим, что изучение периодической таблицы Д. И. Менделеева позволяет дать ответ на вопрос о свойствах того или иного элемента, объяснить его поведение в химических реакциях.

В каждой клетке таблицы не просто обозначен определенный элемент, но и охарактеризовано его отношение к другим элементам. Таблица указывает на «родственные» связи между отдельными элементами и их группами, на сходство и различие их свойств.

Вот, к примеру, первый столбец таблицы, где сверху вниз помещены литий, натрий, калий, рубидий, цезий, франций. Это — щелочные металлы, широко распространенные в природе (за исключением искусственно полученного франция). Все они в химическом отношении похожи друг на друга — обладают относительно большой подвижностью (особенно литий и натрий), способны мигрировать в растворенном виде на значительные расстояния, участвуют в накоплении огромных толщ природных солей.

Или же возьмем четвертый столбец таблицы, который открывают углерод и кремний. Эти два элемента также очень близки по своим химическим свойствам. Оба они образуют однопольные окислы — угольную кислоту (CO_2) и кремнезем (SiO_2). Эти окислы широко распространены на Земле: первый — в атмосфере, второй — в земной коре. Как углерод, так и кремний способны образовывать молекулы, состоящие из длинных цепей, — полимеры. Из органических полимеров с углеродной основой состоит вся живая природа, кремнийорганические соединения получают все большее применение в технике.

Такие же особенности присущи и другим столбцам периодической системы. Все они отражают общие химические свойства элементов и лежат в основе их геохимических классификаций.

Простейшая геохимическая классификация — разделение элементов на петрогенные и металлогенные. Первые из них (натрий, калий, магний, кальций, алюминий, кислород, азот, углерод, сера) образуют главную часть земной коры, массивы горных пород, месторождения нерудных ископаемых. Вторые

(золото, серебро, медь, хром, марганец) слагают основные массы рудных, металлических месторождений.

Геохимики установили, что петрогенные элементы встречаются в природе чаще всего в виде силикатов, карбонатов, сульфатов, фосфатов и редко образуют соединения с серой, мышьяком и сурьмой. Наоборот, металлические элементы встречаются главным образом в соединениях с серой, мышьяком, сурьмой. Они сравнительно редко образуют окислы (исключение составляют железо, марганец, хром и олово). Большинство металлов если и попадает в виде окислов, сульфатов, карбонатов и силикатов, то лишь как вторичные минералы, образовавшиеся в результате изменения первичных минералов на поверхности Земли.

Металлические элементы часто встречаются в земной коре в самородном состоянии (например, золото, серебро, платина, медь, висмут, иридий, палладий). Из петрогенных элементов в самородном состоянии могут находиться только углерод и сера.

Металлические элементы накапливаются в месторождениях преимущественно в ходе эндогенных процессов, то есть кристаллизации магматического расплава и его взаимодействия с окружающими породами. Наоборот, петрогенные элементы входят в состав солей, гипса, бокситов, известняков, образующихся в ходе экзогенных процессов, то есть взаимодействия первичных эндогенных минералов и пород с атмосферой, гидросферой или живым веществом Земли.

Все эти особенности обуславливают специфические черты концентрации элементов в литосфере, образование различных минералов, горных пород и месторождений полезных ископаемых.

Существуют и другие геохимические классификации элементов, согласно которым группы и семейства элементов выделяют, например, по признаку их участия в химических процессах земной коры. Это группа благородных газов — гелий, ксенон, криптон, аргон, радон; благородные металлы — золото, серебро, семейство платины; рассеянные элементы — литий, галлий, рубидий, цезий, индий; радиоактивные элементы — уран, торий, радий, актиний; редкоземельные элементы — лантаноиды и т. д.

По характеру соединений, в которые преимущественно входят те или иные элементы, они разделяются на **литофильные**, дающие соединения с кислородом (окислы, силикаты), **халькофильные**, соединяющиеся с серой (в сульфидах, сульфосолях), и **сидерофильные**, дающие соединения с железом. Распределение их в земной коре и в породах в значительной степени зависит от этих свойств.

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	I	II	III	IV	V	VI	VII	0		
1	¹ H															² He		
2	³ Li	⁴ Be	⁵ B									⁶ C	⁷ N	⁸ O	⁹ F	¹⁰ Ne		
3	¹¹ Na	¹² Mg	¹³ Al									¹⁴ Si	¹⁵ P	¹⁶ S	¹⁷ Cl	¹⁸ Ar		
4	¹⁹ K	²⁰ Ca	²¹ Sc	²² Ti	²³ V	²⁴ Cr	²⁵ Mn	²⁶ Fe	²⁷ Co	²⁸ Ni	²⁹ Cu	³⁰ Zn	³¹ Ga	³² Ge	³³ As	³⁴ Se	³⁵ Br	³⁶ Kr
5	³⁷ Rb	³⁸ Sr	³⁹ Y	⁴⁰ Zr	⁴¹ Nb	⁴² Mo	⁴³ Tc	⁴⁴ Ru	⁴⁵ Rh	⁴⁶ Pd	⁴⁷ Ag	⁴⁸ Cd	⁴⁹ In	⁵⁰ Sn	⁵¹ Sb	⁵² Te	⁵³ I	⁵⁴ Xe
6	⁵⁵ Cs	⁵⁶ Ba	⁵⁷⁻⁷¹ TR	⁷² Hf	⁷³ Ta	⁷⁴ W	⁷⁵ Re	⁷⁶ Os	⁷⁷ Ir	⁷⁸ Pt	⁷⁹ Au	⁸⁰ Hg	⁸¹ Tl	⁸² Pb	⁸³ Bi	⁸⁴ Po	⁸⁵ At	⁸⁶ Rn
7	⁸⁷ Fr	⁸⁸ Ra	⁸⁹ Ac	⁹⁰ Th	⁹¹ Pa	⁹² U												



Миграционная способность элементов в ландшафте: А — элементы, мигрирующие в воздушной среде; В — элементы, мигрирующие в водной среде; 1 — очень подвижные; 2 — подвижные; 3 — слабоподвижные; 4 — подвижные и слабоподвижные в окислительной среде и инертные в резко восстановительной среде; 5 — подвижные и слабоподвижные в восстановительной среде и инертные в окислительной среде; 6 — малоподвижные и инертные в большинстве ландшафтов; 7 — не охарактеризованные элементы.

Геохимические провинции

Области земной коры с повышенным содержанием одного или нескольких химических элементов, а также их сочетаний получили название геохимических провинций. Именно с геохимическими провинциями связаны месторождения полезных ископаемых, то есть скопления химических элементов в количествах, пригодных для их извлечения.

Проблема геохимических провинций и имеющихся в них месторождений полезных ископаемых интересует науку с самых различных точек зрения. Много неясного, например, существует еще в вопросе о происхождении так называемых металогеенных провинций, связанных с магматическими очагами и минерализацией. Мы не располагаем пока данными о том, как изменяются кларки элементов при воздействии на осадочные породы высоких температур и давлений. Мы еще не знаем, как протекали процессы миграций и дифференциации химических элементов в связи с изменением климатических и биологических условий в ходе развития Земли.

Литосфера, гидросфера и атмосфера под воздействием различных динамических, геохимических и биологических процессов претерпевают определенные изменения. В результате существенно изменились и, вероятно, изменяются в настоящее время соотношения важнейших химических компонентов, особенно кислорода и азота, главных порообразующих элементов осадочных пород, катионов и анионов природной воды. Все это, безусловно, играет важную роль в образовании геохимических провинций и влияет на состав отложений отдельных геохимических систем. Так, в докембрийское время произошло накопление мощных толщ железистых осадочных пород, в девонское — соленосных отложений, в течение карбона, перми и третичного времени — угольных, в меловой период — меловых отложений и так далее. Установлено, что количество карбонатных осадков, отлагавшихся в ту или иную эпоху, прямо пропорционально интенсивности вулканической деятельности и площади распространения внутриматериковых морей.

Геохимические провинции и месторождения в большинстве случаев скрыты для непосредственного наблюдения и обнаруживаются в земной коре либо на основе косвенных признаков, либо с помощью бурения и геофизических методов разведки. В этом отношении важное теоретическое и практическое значение имеет изучение так называемых геохимических ореолов, рассеяния, то есть повышенного содержания элементов вокруг месторождений, в окружающих их породах, а также почвах и растениях. Так, залежи нефти нередко сопровождаются газовыми или водными ореолами рассеяния, месторождениям солей и некоторых цветных металлов сопутствуют скопления их подвижных соединений. Для каждого ореола рассеяния характерно законо-

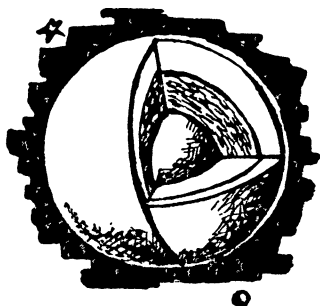
мерное геохимическое сочетание элементов, в числе которых выделяются элементы главные и сопутствующие (подчиненные).

Велика роль и так называемых минералов-индикаторов, указывающих на физико-химические условия минералообразования. Так, с сульфидами связаны полиметаллические ассоциации свинца, цинка, меди; вместе с бурыми железняками часто находятся ванадий, никель, кобальт, молибден, уран; с бокситами — титан, галлий, стронций, ниобий.

Присутствие такого минерала железа, как лимонит, например, указывает на окислительную среду, в которой происходило его образование. Наоборот, большая группа минералов устойчива только в восстановительной среде. К ним относятся, например, минералы закисных соединений железа.

На условия образования месторождений могут также указывать формы и кристаллические разновидности минералов. Так, например, одна разновидность кварца — так называемый тригональный кварц — кристаллизуется в гидротермальных жилах при температуре ниже 575 градусов, другая — гексагональный кварц — при более высоких температурах. Кальциты при температуре около 300 градусов кристаллизуются в виде тонких пластинок, при 100 градусах — в виде призмы и ромбоэдра, а при еще более низких температурах образуют сложные изометрические кристаллы.

Принцип выделения геохимических провинций и геохимической оценки ореолов рассеяния находится еще в начальной стадии разработки. Однако несомненно, что дальнейшее развитие учения о геохимических провинциях сыграет огромную роль в поисках связанных с ними месторождений полезных ископаемых.



ГЕОХИМИЯ И СТРОЕНИЕ ЗЕМЛИ

Элементы в земных оболочках

Развитие современной науки принесло нам новые знания о строении и составе Земли, ее геофизических оболочек (геосфер).

Самые внешние оболочки Земли — **атмосфера и гидросфера** — характеризуются весьма своеобразными геохимическими особенностями, которые будут рассмотрены отдельно в соответствующих главах. Здесь же мы расскажем о судьбах атомов и элементов в твердом теле Земли, также подразделяющемся на несколько геосфер.

Литосфера простирается в глубину Земли на 70 километров. В ней выделяют три главные зоны: осадочную, гранитную и базальтовую. Лучше всего изучена осадочная зона, меньше — гранитная и совсем слабо — базальтовая.

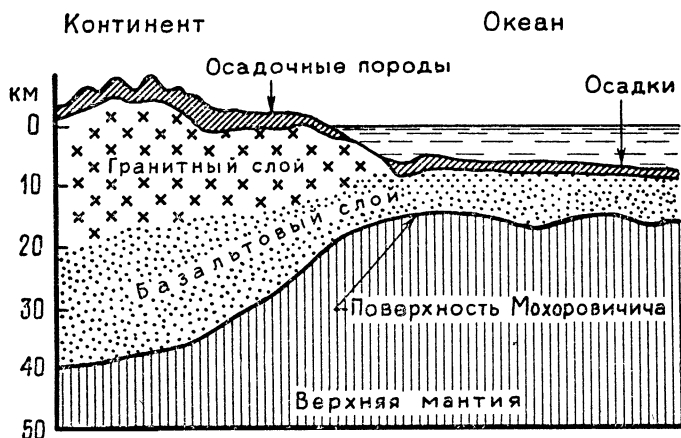
Осадочный покров составляет самую верхнюю часть земной коры и имеет мощность в среднем 1,5 километра. Он образуется за счет разрушения и переотложения минерального вещества других оболочек и, как чехлом, покрывает до 75 процентов поверхности материков.

Господствующие осадочные породы — глины, глинистые сланцы, пески, песчаники, известняки и доломиты разного геологического возраста и состава. В осадочном покрове сосредоточены все залежи угля, нефти, газа, битума, торфа, обязанные своим происхождением накоплению и изменению в недрах Земли органического вещества. Кислород, кремний, алюминий, железо, кальций, магний, натрий, калий — главные элементы, из которых построено подавляющее большинство осадочных пород. По химическому составу среди них можно выделить кремнеземные породы с явным преобладанием двуокси кремния — кварцевые пески и песчаники, кварциты, трепелы; карбонатные породы — известняки, мергель; хлоридно-сульфатные — каменная соль, гипс, ангидрит; органогенные породы, обязанные своим происхождением живым организмам и содержащие углерод и его соединения, — уголь, нефть, битумы.

Исключительно большую роль в образовании осадочного покрова играет кора выветривания и почв. Нижнюю ее границу образует так называемая кислородная поверхность, то есть предельная глубина, до которой с земной поверхности проникает кислород. Эта глубина составляет в среднем 500—800 метров.

В коре выветривания протекают процессы разрушения горных пород, образование новых минералов, миграция и перераспределение химических элементов и земного вещества. В выветривании участвует большое количество разнообразных физических, химических и биогеохимических факторов, вызывающих раздробление и разрушение горных пород и минералов, выщелачивание и перемещение химических элементов, их взаимное замещение и обмен, преобразование первичных и образование вторичных минералов и органо-минеральных коллоидных систем. В коре выветривания происходят такие важнейшие геохимические процессы, как гидролиз, растворение, окисление, восстановление, гидратация, дегидратация, обменные замещения и поглощение элементов поверхностью частиц.

А. Е. Ферсман назвал эту зону зоной гипергенеза. Мощность ее он определял в 800 метров. В этой области, имеющей огромное геохимическое значение, протекает и вся наземная органическая жизнь Земли, в том числе деятельность человека. С точки зрения геохимии, основными чертами зоны гипергенеза являются широкое распространение в ней химических равновесий, накопление органо-минеральных соединений, устойчивых при соприкосновении с водой, углекислотой и кислородом.



Строение земной коры.

А. Е. Ферсман выделял также зону катагенеза, которая занимает промежуточное положение между зоной гипергенеза и зоной метаморфизма, где осадочные породы подвергаются воздей-

[illegible]

Геохимические группы элементов в таблице Д. И. Менделеева. Поле металлов выделено двойной линией. Символы искусственно полученных элементов показаны в скобках. 1 — элементы тяжелых металлов; 2 — элементы гранитов; 3 — элементы земной коры; 4 — элементы рудных жил.

ствию высоких давлений и температур, характерных для глубинных частей земной коры. В зоне катагенеза господствуют восстановительные процессы, протекающие при недостатке свободного кислорода и частично при несколько повышенном давлении и температуре. Здесь могут идти и процессы так называемого анаэробного окисления за счет деятельности бактерий.

Ниже зоны катагенеза расположена гранитная зона, сложенная преимущественно гранитами, гнейсами и другими кислыми породами, богатыми кислородом, кремнием, алюминием, калием, натрием и кальцием. В состав их входят главным образом кварц, полевые шпаты и слюда — основные породообразующие минералы земной коры. Как показывают геофизические исследования, гранитные породы не облекают земной шар сплошным слоем. В частности, они отсутствуют под наиболее глубокими частями океанов, где на поверхность выходят непосредственно базальтовые породы. Толщина гранитного слоя под материками колеблется от 10 до 40 километров, увеличиваясь под горными массивами. Средняя плотность пород здесь — от 2,8 до 3,2.

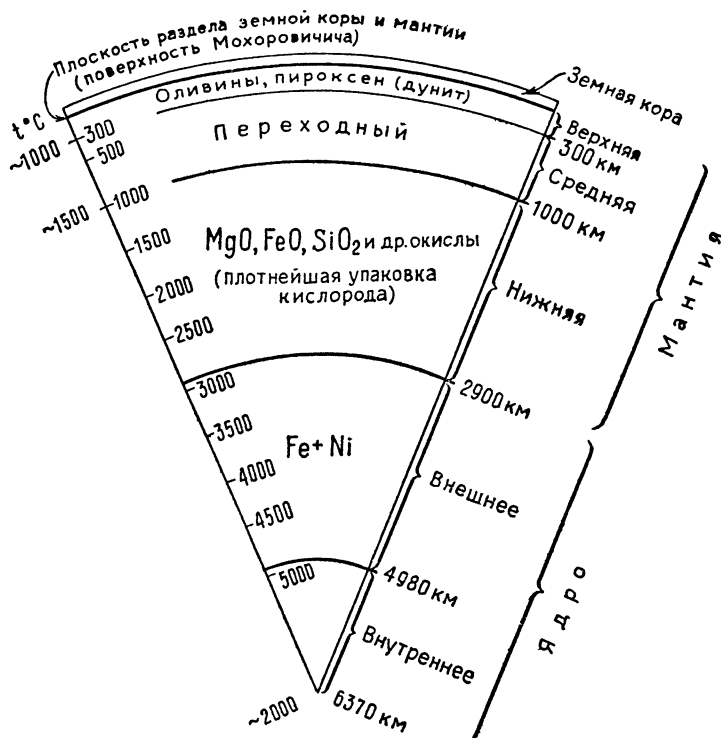
Относительно образования гранитов существуют два противоположных взгляда. Одни ученые считают, что гранитные породы возникли в результате остывания и кристаллизации магмы, другие связывают их происхождение с переплавлением и метаморфизацией осадочных пород.

Под гранитной зоной залегают более тяжелые базальтовые породы, для которых характерно низкое содержание кремнезема и значительное количество оснований — магния, железа и кальция. Преобладающими здесь являются основные и ультраосновные породы — базальты, габбро, диабазы, перидотиты, дуниты и другие — со средней плотностью 3,2—4. Мощность слоя базальтовых пород достигает 30 километров.

По распространению на Земле базальтовые породы занимают ведущее место среди магматических продуктов всех геологических периодов. Предполагают, что базальтовая зона является источником исходной, «материнской» магмы, поступающей из глубин к поверхности. Застывание и кристаллизация ее в различных термодинамических условиях сопровождаются образованием интрузивных, затвердевших на глубине пород (гранит, перидотит, габбро) или излившихся — эффузивных (андезит, базальт, липарит).

Общая мощность различных участков земной коры различна в зависимости от их структуры. В области платформ она не превышает 30—40 километров; в складчатых поясах (например, в зоне молодой альпийской складчатости) она может превышать 70—80 километров; под океанами мощность земной коры достигает всего лишь одного-двух десятков километров.

Под базальтовой зоной расположена так называемая мантия Земли, простирающаяся до глубины 2900 километров. Поверхность раздела между ними принято называть поверхностью



Строение земного шара.

Мохоровичича — в честь югославского ученого, впервые установившего существование этого раздела.

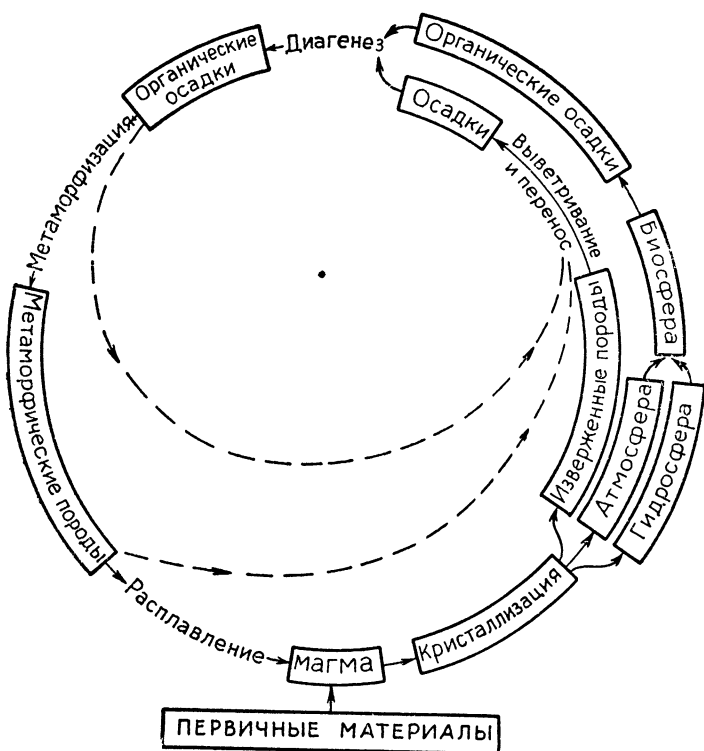
Мантия Земли представляет в геохимическом отношении исключительный интерес. Из-за высокого давления земное вещество здесь находится в состоянии, близком к стекловидному. Оно способно создавать очаги жидких расплавов магмы, с которыми связано большинство вулканических явлений на земном шаре. Здесь господствуют ультраосновные породы — перидотиты, дуниты, богатые железом и магнием и бедные кремнеземом.

В центре Земли расположена барисфера, или ядро, радиусом около 3500 километров. По данным геофизики, средняя плотность пород здесь возрастает от 3,5—5 до 8—11. Как предполагают, это объясняется тем, что по мере приближения к центру планеты, с увеличением давления и температуры все более господствующую роль играет металлизированное вещество, обогащенное железом, магнием, никелем и другими тяжелыми элементами. В центре Земли давление составляет около 3—3,5 миллиона атмосфер, а температура — 2000—5000 градусов.

Вопрос о том, в твердом или жидком состоянии находится

вещество в нижней части мантии и ядре Земли, пока не решен. Однако господствующим является мнение, что вещество здесь пребывает в вязком, пластическом состоянии. Некоторые ученые считают, что наиболее глубокая часть мантии представляет собой своеобразную рудную оболочку Земли, богатую сернистыми соединениями меди, цинка, свинца, олова, сурьмы, висмута и других элементов.

Из всех оболочек Земли наибольшее внимание человека, естественно, привлекает та, в которой мы живем и которая отличается от других геосфер своими особыми свойствами. «Это,— пишет А. Е. Ферсман,— пояс в 100 километров — пояс химической жизни, область земных химических процессов, область бурных пароксизмов, колебаний температур и давлений, область землетрясений, вулканических извержений, область разрушения в одних местах и возрождения в других, область охлаждения расплавов глубинных очагов, горячих источников, рудных жил, наконец, область жизни самого человека, с его бурными исканиями, постоянной борьбой с природой и за природу, область, населенная миллионами видов живых существ, область новых



Геохимический цикл обмена вещества в земной коре.

своеобразных и сложных сочетаний химических молекул, область жизни, борьбы, искания, область новых процессов и новых превращений».

В земной коре происходит непрерывный круговорот энергии и вещества. В ходе этого круговорота осуществляется обмен вещества между отдельными геосферами — литосферой, гидросферой, атмосферой, биосферой, протекает множество поступательных процессов и последовательных изменений вещества, приводящих к образованию различных пород и их превращению.

Различают малый и большой круговорот вещества в земной коре. В малом круговороте продукты, образующиеся при разрушении горных пород различного происхождения, переносятся, сортируются и откладываются на суше и в гидросфере, где образуют осадки. Последние в ходе так называемого диагенеза уплотняются, цементируются и образуют слоистые осадочные и метаморфические породы.

Большой круговорот вещества охватывает превращение осадков в кристаллические и контактно-метаморфические породы, образование смешанных пород, переплавление их и преобразование в массивно-кристаллические породы, которые, в ходе извержения магматических масс, могут быть вновь вынесены на поверхность Земли и участвовать в разрушении, транспортировке и переотложении материала.

В этом циклическом круговороте земного вещества важнейшую роль играют процессы миграции и перераспределения химических элементов, которые проявляются в различных формах концентрации и рассеяния атомов.

Вечные странствия атомов

Какие же геологические и геохимические силы и процессы вызывают постоянное изменение вещества в земной коре, его вечное движение и перемещение? Какова судьба отдельных элементов в их непрерывном странствовании в природе?

В. И. Вернадский и А. Е. Ферсман одними из первых обратили внимание на то, что история химических элементов в земной коре всегда связана с миграцией атомов. Как указывал В. И. Вернадский, характерная черта миграции химических элементов в земной коре — это создание систем разнообразных химических равновесий, непрерывный переход их из одного состояния в другое, обусловленный совокупностью различных факторов и процессов. А. Е. Ферсман охарактеризовал миграцию элементов как перемещение и перераспределение их в глубинах земной коры и на ее поверхности в результате непрерывно происходящих термодинамических процессов.

Миграция атомов и элементов происходит путем образования различных химических соединений, переноса их в движу-

щихся жидкостях, газах, твердых телах, при дыхании, питании, обмене веществ организмов. При этом вещество может находиться в различных формах: атомной (инертные газы, пары ртути), ионной (растворы, отчасти расплавы и коллоидные системы) или молекулярной (силикатные и сульфидные расплавы, коллоиды).

Миграции элементов и атомов в природе вызываются постоянным действием физико-химических сил, жизнедеятельностью организмов и человека. Миграционная способность химических элементов зависит от физико-географической и геохимической среды, от состава элементов и многого другого.

В объяснении проблем миграции и концентрации элементов в земной коре большое значение придается исследованию энергетики этих процессов.

Процессы миграции элементов, как указывал А. Е. Ферсман, в своей основе связаны со стремлением атомов к некоторому энергетическому равновесию и ведут к состоянию с наименьшими запасами свободной энергии.

А. Е. Ферсман называл следующие энергетические факторы, вызывающие миграцию элементов в космических масштабах:

энергию тяготения, которая служит причиной перемещения растворов, гравитационной дифференциации элементов по их атомным весам и других геохимических процессов;

энергию внутриатомную — радиоактивную, связанную с распадом ядра (излучение распадающихся элементов, изотопный обмен, синтез);

энергию лучистую (световое давление, фотохимия);

энергию электромагнитную, связанную с наружными электронами (процессы химические, электролитические, явления кристаллизации, отчасти капиллярные явления);

энергию тепловую, связанную с молекулярным и тепловым движением (диффузия, изменение агрегатного состояния вещества);

энергию кинетическую (движение космических тел, перемещение растворов);

физико-химическую энергию живого вещества, в том числе хозяйственную деятельность человека.

Следует различать две большие группы геохимических процессов, приводящие к грандиозным перемещениям атомов и элементов и образованию новых веществ в земной коре. Это, во-первых, внутренние, или эндогенные, процессы, вызываемые глубинными силами — тепловыми, гравитационными, химическими и ядерными; во-вторых, внешние (экзогенные) или поверхностные (гипергенные), которые происходят в результате взаимодействия литосферы с атмосферой, гидросферой, живыми организмами и энергией солнечного излучения.

С эндогенными процессами связаны землетрясения, горооб-

разование, вулканические явления, возникновение в земной коре разломов, опускание одних ее участков и поднятие других, изменение очертаний материков и океанов.

Весьма важны, с точки зрения геохимии, вулканические процессы, в результате которых (в зависимости от температуры, давления, состава магмы и ее взаимодействия с горными породами) рождаются те или иные ассоциации химических элементов и минералов.

При кристаллизации магмы в условиях высоких температур формируются основные и ультраосновные породы, содержащие железо, магний, хром, титан, никель, кобальт, платину, медь и другие металлы. При более низких температурах из расплава удаляются железо, магний, кальций, титан и другие элементы, и порода обогащается кремнием и алюминием. Образуются средние и кислые породы — диориты, сиениты, граниты, пегматиты, содержащие большое количество рудных элементов: бериллия, лития, рубидия, ниобия, цезия, тантала. При охлаждении паров и газов, выделяющихся из магматических расплавов и образующих горячие (гидротермальные) растворы, накапливаются медь, вольфрам, олово, молибден, золото, сурьма, ртуть.

Для геохимической деятельности вулканов характерно выделение различных газов (CO_2 , H_2S , SO_2 , SO_3), которые, попадая в биосферу, частично рассеиваются в воздухе, а частично участвуют в жизненных процессах. Предполагают, что проявления вулканизма и магматических процессов в сильной степени изменили также и первичное распределение металлов в земной коре.

В сочетании этих сложных процессов земных глубин рассеиваются и концентрируются атомы и элементы. В одних случаях образуются месторождения драгоценных металлов и радиоактивных элементов, в других — скопления кристаллов алмаза, берилла, топаза и иных самоцветных камней, в третьих — залежи полиметаллических руд меди, свинца, цинка, олова и редких элементов.

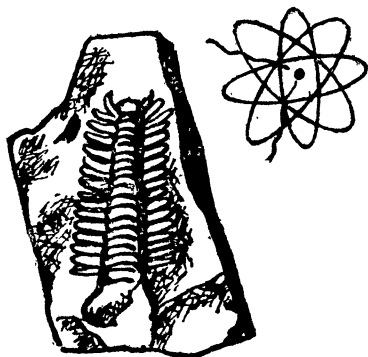
Во всей этой сложной картине отражаются четкие законы физики и химии, определяющие формирование кристаллов — гармонических построек мироздания. Кристалл и его законы определяют распространение элементов. Одни из них странствуют внутри кристалла, заменяя друг друга, другие связываются электрическими силами сказочной мощности, которым кристалл обязан своей прочностью, механической выносливостью.

Исключительно многообразны и экзогенные геохимические процессы миграции элементов, совершающиеся в наружной оболочке земной коры. Здесь миграция атомов и элементов прежде всего связана с образованием почвенного покрова, с выщелачиванием и перемещением элементов в морские бассейны, где они накапливаются в виде солей и потребляются организмами. Образуются минеральные и органо-минеральные соединения, которые наилучшим образом сохраняют равновесие и устойчивость

при соприкосновении с главными активными химическими агентами Земли — водой, углекислотой и кислородом.

Для земной поверхности характерно дисперсно-коллоидное состояние материи в виде мельчайших частиц, находящихся в водной среде. Реакции и равновесия в условиях постоянных колебаний температуры, влажности и давления весьма подвижны. Здесь ярко выражена зональность геохимических процессов, соответствующая географической зональности образования различных типов природных ландшафтов.

Хочется закончить эту главу словами А. Е. Ферсмана из его «Занимательной геохимии»: «Сейчас мы знаем, что все живет, все течет, все меняется во времени и пространстве, и среди природы самым подвижным, постоянно ищущим новых путей является атом, первозданный кирпичик, из которого строятся самые замечательные постройки мира, который вечно ищет покоя и равновесия, покорный основным законам природных процессов. Ищет — но не находит и не найдет никогда, так как в природе нет покоя, а есть только вечная материя в вечном движении...»



РОЖДЕНИЕ И СМЕРТЬ АТОМОВ

Образование изотопов и вторичных элементов

Образование химических элементов — волнующая научная проблема, решение которой приоткрывает одну из сокровенных тайн природы, помогает лучше понять прошлое нашей Галактики, Солнечной системы, Земли, выяснить механизм процессов, происходящих в звездах. Здесь скрыт ключ к созданию искусственных элементов и изотопов, к покорению энергии, заключенной в атомном ядре. Сейчас благодаря наступлению науки в глубь космоса и в глубь ядра вырисовывается общая картина рождения элементов.

Основу образования химических элементов и их изотопов составляют различные ядерные процессы и взаимодействия, из которых главные — это различные типы термоядерных процессов, радиоактивный распад урана, тория, радиоактивного калия, стронция и других элементов, а также ядерные превращения, вызываемые взаимодействием элементарных частиц и легких ядер космического излучения и радиоактивного распада с веществом метеоритов, земных горных пород, минералов.

Родина химических элементов — звезды, где в зависимости от их состояния, этапа эволюционного развития и состава происходят определенные типы ядерных процессов синтеза и распада элементов.

Когда мы говорим о рождении элементов, составляющих Землю, наша мысль обращается к событиям, происходившим 5—6 миллиардов лет назад. Тогда вещество, впоследствии ставшее земным, проходило звездную стадию своего развития. Видимо, его источником были выбросы звезды типа сверхновой, в которых содержался набор всех элементов таблицы Менделеева.

Со времени образования Земли одним из процессов, наложивших свой отпечаток на изменение ее химического состава, был радиоактивный распад.

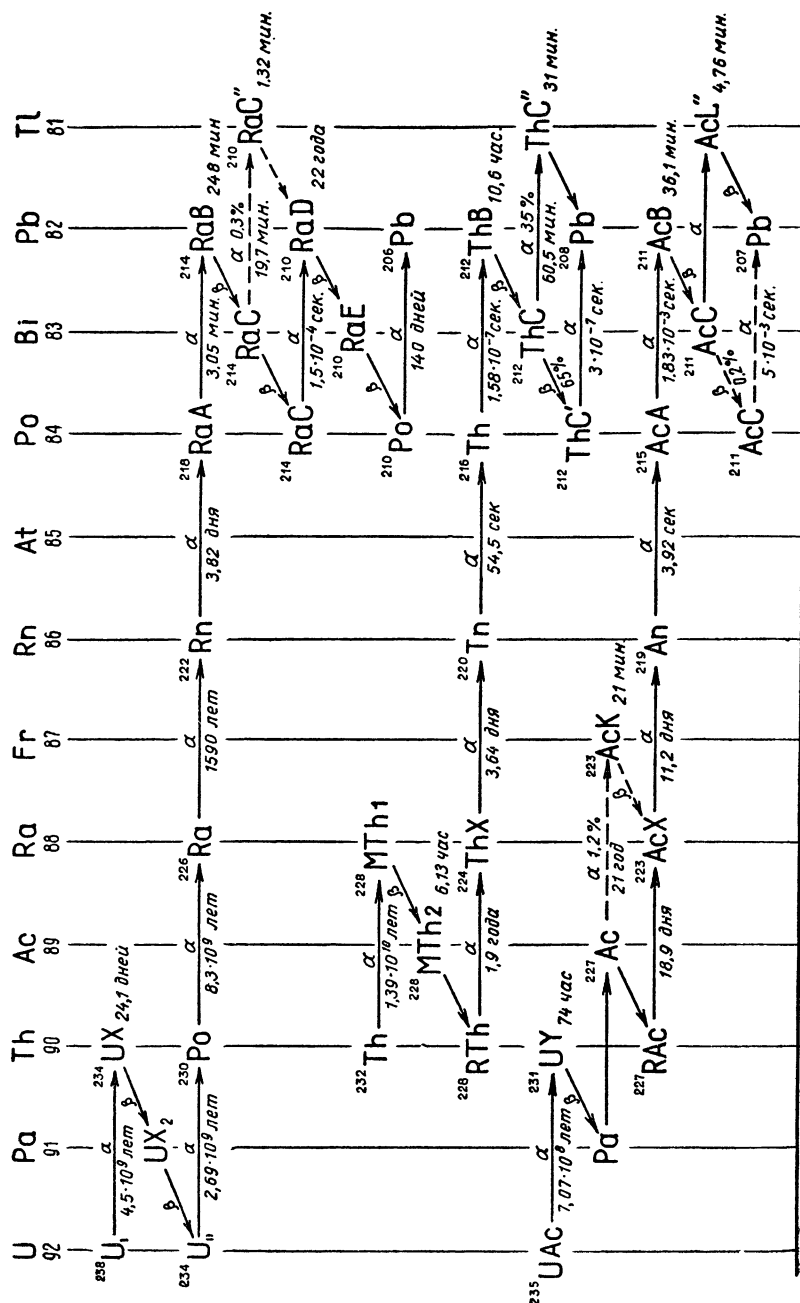
Все радиоактивные элементы и изотопы, период полураспада которых исчисляется менее чем в 150 миллионов лет, полностью распались за время существования нашей планеты. Такие долгоживущие элементы, как уран-238 с периодом полураспада 4,5 миллиарда лет, уран-235 с периодом полураспада 700 миллионов лет, торий-232 с периодом полураспада 10 миллиардов лет, сохранились в более или менее значительном количестве по сравнению с исходным.

Но ведь и сейчас существуют на Земле элементы и изотопы, продолжительность жизни которых меньше возраста планеты! Значит, они образуются, рождаются на Земле? Да, рождаются, и причины их рождения лежат в тех же процессах радиоактивного распада и ядерных взаимодействий. Рождение и смерть химических элементов и их изотопов взаимосвязаны: гибель одних ведет к рождению других. Элементы, которые создаются на Земле после ее образования, часто называют вторичными, в отличие от первичных элементов, рождение которых связано со звездным этапом развития земного вещества. К вторичным элементам относятся протактиний, радий, актиний, полоний, радон, франций, астатин, технеций, прометий и трансурановые элементы. Все они имеют незначительную продолжительность жизни. Периоды их полураспада колеблются от долей минуты (астатин-219—0,9 минуты) до нескольких миллионов лет (нептуний-237— $2,2 \cdot 10^6$ лет).

Все вторичные элементы относятся к группе рассеянных элементов. В земной коре до глубины в 20 километров количество наиболее распространенного из них — радия-226 — оценивается цифрой 45 миллионов тонн, технеция-99—1,5 килограмма, прометия-147—780 граммов, а франция-223 — около 860 миллиграммов. Количество трансурановых элементов в земной коре пока не определено. Из-за столь малых концентраций вторичные элементы не образуют самостоятельных природных соединений — минералов.

Образование протактиния, радия, актиния, полония, радона, франция, астатина связано с радиоактивным распадом урана и тория, цепь радиоактивных превращений которых приведена на рисунке (стр. 34). Бросающееся в глаза низкое содержание в земной коре, например, франция связано, с одной стороны, с очень малым периодом полураспада его изотопов и, с другой, с тем, что он образуется в наименее вероятных случаях распада исходных элементов.

Рождение в земной коре вторичных элементов технеция и прометия идет не только за счет спонтанного деления урана-238. Возможно и их образование при взаимодействии космических и земных нейтронов с изотопами молибдена и неодима, а также при распаде некоторых неустойчивых изотопов: молибдена и рутения — для технеция и неодима — для прометия. Несмотря на ничтожно малые содержания этих элементов в земной



Радиоактивные семейства элементов. Около каждого элемента показан его период полураспада

коре, ученые не теряют надежды обнаружить их в некоторых молибденовых и редкоземельных рудах и минералах.

Среди естественных вторичных трансурановых элементов из природных объектов получены пока только плутоний-239 и нептуний-237, извлеченные из богатых урановых руд. Образование указанных изотопов возможно в урановых рудах и минералах благодаря ядерным превращениям.

Интересно отметить, что вторичный элемент нептуний-237 является родоначальником нептуниевых вторичных семейства, содержащего 13 элементов. Количество их в земной коре ничтожно: содержание всех их изотопов, вместе взятых, в 10^{13} раз меньше, чем содержание урана.

Что касается остальных трансурановых элементов, то их образование на Земле из урана и тория путем присоединения нейтронов или легких ядер, маловероятно, хотя и не исключается.

Помимо рассмотренных выше вторичных элементов, на Земле рождаются многочисленные вторичные изотопы — родные братья ныне живущих первичных элементов, стабильных и радиоактивных. Список вторичных изотопов охватывает почти все элементы таблицы Менделеева. Так, при распаде изотопов урана, тория, нептуния накапливаются гелий-4, свинец-206, -207, -208, туллий-205; при распаде рубидия — стронций-97. При спонтанном делении урана-238 образуются две группы изотопов с массовыми числами 80—100 и 130—150. Под действием космических нейтронов идет образование углерода-14, бора-11 и других изотопов. Нейтроны, которые возникают в радиоактивных рудах при спонтанном делении урана и тория или при действии ядер гелия на ядра легких элементов, ведут к образованию, помимо изотопов нептуния и плутония, еще и аргона-38, хлора-36, ксенона-129 и других.

Нельзя не упомянуть вторичные элементы и изотопы, созданные человеком. Это, во-первых, искусственно синтезированные технеций и прометий, трансурановые элементы, огромная плеяда искусственных радиоактивных изотопов, поставленных на службу человечеству. Во-вторых, это изотопы, возникающие при атомных взрывах.

Разгадывая тайны природы, человек переносит процессы, рождающие вторичные элементы и изотопы, в свои лаборатории, воспроизводит их в реакторах, чтобы получать те атомы, которые давно «вымерли» или которых недостаточно в кладовых природы. Но дерзновенная мысль и труд человека идут еще дальше. Впереди — поиски и успехи на пути создания принципиально новых элементов и изотопов, каких никогда не было на Земле.

Радиоактивный распад и тепло Земли

Согласно современным представлениям, радиоактивный распад — процесс весьма сложный, проходящий в большинстве слу-

чаев через несколько последовательных стадий и связанных с образованием ряда промежуточных продуктов. При этом ядра радиоактивных изотопов испускают заряженные частицы и излучения.

Количество выделяющейся при радиоактивных процессах энергии очень велико. Подсчитано, что грамм радия выделяет в течение тысячи лет около 4 миллиардов калорий тепла, что равно теплотворности 500 тонн угля. Радиоактивные процессы играют большую роль в тепловом балансе Земли и энергетических процессах миграции атомов в земной коре.

Содержание радиоактивных элементов в главных группах пород, метеоритах и водах океанов (в весовых долях)

	Радий	Уран	Торий	Калий
Почвы	$p \cdot 10^{-13}$	$p \cdot 10^{-7}$	$p \cdot 10^{-6}$	—
Воды океанов	$1 \cdot 10^{-16}$	$3 \cdot 10^{-9}$	$2 \cdot 10^{-12}$	—
Кислые породы	$1 \cdot 10^{-12}$	$3 \cdot 10^{-6}$	$12 \cdot 10^{-6}$	0,03
Средние породы	$5 \cdot 10^{-13}$	$1,5 \cdot 10^{-6}$	$4,4 \cdot 10^{-6}$	0,011
Основные породы	$2 \cdot 10^{-13}$	$0,6 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-6}$	0,009
Ультраосновные породы	$0,1 \cdot 10^{-13}$	$0,03 \cdot 10^{-6}$	—	—
Каменные метеориты	—	$1 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$
Железные метеориты	—	$1 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-8}$	$3 \cdot 10^{-6}$

Содержание различных радиоактивных элементов в породах, метеоритах, почвах и океанической воде различно (см. табл.). Общее количество минералов урана достигает двухсот. Торий образует десятки минералов, но все они очень редки и крупных скоплений не образуют. Специально радиевых минералов в природе не обнаружено. Встречаются, однако, богатые радием глубинные воды, связанные с нефтяными месторождениями, а также породы с высокой концентрацией радия.

Наиболее богатые первичные руды радия содержат его до $2 \cdot 10^{-5}$ — $2,5 \cdot 10^{-5}$ процента.

Разные по составу породы содержат различное количество радиоактивных элементов. В кристаллических породах эти элементы частично находятся в виде акцессорных минералов, то есть минералов-примесей (ортит, монацит, циркон, сфен и другие), частично присутствуют в виде свободных атомов, не связанных с определенными минералами. Наличие радиоактивных элементов в осадочных породах сильно зависит от их происхождения. Наименьшей радиоактивностью обладают соляные отложения (кроме калиевых); гипс, каменная соль. Глины, как правило, наиболее радиоактивны.

Все подземные и поверхностные воды в той или иной степени радиоактивны в зависимости от наличия в них урана, радия, радона и других радиоактивных элементов. Меньше всего их в во-

дах рек, наиболее богаты ими подземные воды, содержание урана в которых достигает сотых долей миллиграмма на кубический метр, а радия — миллионных долей миллиграмма на кубический метр. Радиоактивные воды имеют большое лечебное значение, и изучению их в СССР уделяется большое внимание.

В процессе выветривания пород, а также благодаря многообразным биогеохимическим процессам в биосфере происходит накопление радиоактивных элементов, образование гелия, радона. Особенно много накапливается гелия в осадочных газоносных и нефтеносных породах. В газовых струях, особенно содержащих азот и метан, количество гелия иногда превышает 8 объемных процентов. Газовые струи, содержащие более одного процента гелия, служат «гелиевой рудой».

Радиоактивный распад — важный источник внутренней тепловой энергии Земли. Первым из ученых на это обратил внимание английский геолог Д. Джоли. Исходя из содержания радиоактивных элементов в различных горных породах, Джоли впервые подсчитал количество энергии, выделяемой ими в процессе радиоактивного распада. Уже тогда эта гипотеза привлекла внимание геологов к радиоактивному теплу как одному из главнейших энергетических факторов, определяющих тектоническое движение земной коры.

Вопрос о радиоактивном излучении как тепловом источнике Земли более обстоятельно разработал В. И. Вернадский. Не принимая гипотезы Канта-Лапласа об образовании Земли из огненно-жидкого вещества и поэтому отрицая наличие внутри земного шара расплавленного ядра, В. И. Вернадский относил за счет энергии радиоактивного распада всю внутреннюю энергию земного шара, вызывающую все энергетические явления, происходящие в Земле. Он считал, что в результате распада радиоактивных веществ в земной коре образуются очаги магмы, происходят тектонические и вулканические движения, миграции химических элементов и другие геохимические процессы.

В настоящее время большинство ученых признает, что основная роль в тепловом балансе земной коры принадлежит энергии, выделяемой при радиоактивных процессах. Подсчеты разных авторов дают ее величину от $4 \cdot 10^{20}$ до $22,5 \cdot 10^{20}$ калорий в год. Это превышает потерю тепла Землей за счет ее теплопроводности, составляющую $1,9 \cdot 10^{20}$ калорий в год.

Русские ученые раньше, чем кто-либо другой, оценили значение радиоактивных элементов для практической деятельности людей. Еще в 1911 году В. И. Вернадский подчеркивал: «...В вопросе о радиации ни одно государство и общество не может относиться безразлично, как, каким путем, кем и когда будут использованы и изучены находящиеся в его владениях источники лучистой энергии. Ибо владение большими запасами радия дает владельцам его силу и власть, перед которыми может побледнеть

то могущество, какое получают владельцы золота, земли, капитала».

Академик В. Г. Хлопин и его ученики создали современную физико-химическую теорию обогащения и выделения радиоактивных элементов (в частности, радия), а также современные представления об адсорбции радиоактивных элементов и образовании радиоколлоидов. Профессорам И. И. Боргману и А. П. Соколову мы обязаны исследованием радиоактивности минеральных вод и грязей, а также воздуха в ряде районов России. А. П. Соколову принадлежит разработка метода компенсационного определения радия по радону, получившего всеобщее признание и не утратившего своего значения до последнего времени. В. И. Вернадский, В. Г. Хлопин, И. Е. Старик, Э. К. Герлинг разработали радиохимические методы определения возраста Земли. И. В. Курчатов, Л. В. Мысовский, А. П. Жданов, П. И. Лукирский, Г. Н. Флеров и другие создали экспериментальные методы современной ядерной физики и изометрии, исследовали процессы самопроизвольного распада урана и тория, широко применили методы меченых атомов для изучения механизма химических реакций и решили ряд сложных проблем, связанных с получением атомной энергии в производственных масштабах.

Естественные эталоны времени

Естественный радиоактивный распад характеризуется одной важной особенностью. Его скорость, выражающаяся периодом полураспада, для каждого радиоактивного элемента строго постоянна и не меняется ни при каких физических или химических воздействиях на распадающийся элемент. Когда в начале нынешнего столетия это было установлено, П. Кюри в 1902 году впервые высказал мысль, что радиоактивный распад можно использовать как естественный эталон времени, позволяющий определять абсолютный возраст пород, слагающих Землю.

Изучение истории развития Земли и земной коры, времени и последовательности напластования горных пород, так называемой геохронологии, составляет важнейшую задачу геологической науки.

Различают относительную и абсолютную геохронологию. Относительная геохронология определяет, какие отложения более древние и какие более молодые. Для этого изучаются геологические разрезы отдельных территорий, выявляются характерные для них горные породы, условия их залегания и строения, особенности литологического состава и содержащиеся в них остатки живых организмов. Методы, используемые для определения относительного возраста горных пород и напластований, получили название стратиграфических. Каждому стратиграфиче-

скому подразделению соответствует интервал времени, в течение которого образовались те или иные горные породы, отличающиеся между собой главным образом по палеонтологическим остаткам (окаменелым морским раковинам, костям животных, отпечаткам листьев).

Абсолютная геохронология определяет истинную продолжительность отдельных периодов и эпох, а также геологический возраст Земли в целом. В решении этих вопросов большую роль играет геохимическое и радиогеохимическое изучение минералов и горных пород, радиоактивного распада элементов и изотопов.

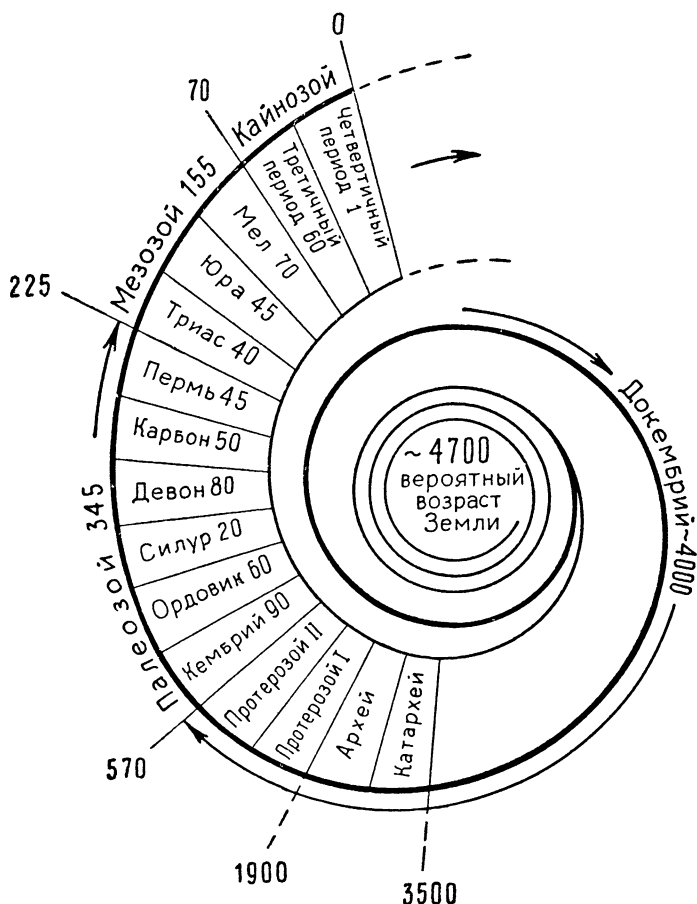
Применение радиоактивного распада к решению геохронологической проблемы означало крупный шаг вперед, ибо поставило геохронологию на прочную основу точного цифрового выражения геологического времени. В настоящее время радиоактивный распад изотопов широко используется для определения возраста минералов, горных пород, материалов. Этот метод помогает определять возраст Земли, составлять абсолютную шкалу геологического времени, изучать и расчленять наиболее древние — докембрийские — образования, особенно не содержащие остатков организмов, а также оценивать скорости процессов магнетизма, тектоники и осадконакопления.

В Советском Союзе радиоактивные методы определения абсолютного возраста пород стали разрабатываться еще в 1932 году под руководством В. И. Вернадского. Сейчас при Академии наук СССР существует специальная комиссия по изучению абсолютного возраста пород.

Для определения абсолютного возраста минералов и пород используются элементы трех основных рядов распада — уранового, актиноуранового и ториевого.

Зная период полураспада, то есть время, в течение которого количество радиоактивного вещества уменьшается вследствие распада в два раза, можно определить возраст минерала или породы. Период полураспада говорит о степени стабильности данного атомного ядра и колеблется в широких пределах, составляя для урана 4,5 миллиарда лет, для радиоактивного углерода 14 —5568 лет, для радона — 3,825 дня. Задача сводится к точному определению количества урана и тория, с одной стороны, и продуктов их распада — свинца или гелия, с другой. Возраст породы можно определять по отношению свинца к урану и торию или гелия к урану и торию. Первый метод получил название свинцового, а второй — гелиевого. В последнее время разрабатываются также и другие радиоактивные методы: аргоновый — по распаду калия; стронциевый — по распаду рубидия; ксеноновый, основанный на спонтанном делении минералов под влиянием излучения, испускаемого радиоактивными включениями.

Использование свинцового и аргонного методов дало возможность создать общую шкалу времени от наших дней до докембрия включительно, определить возраст наиболее древних



Абсолютный возраст Земли. Продолжительность периодов показана в миллионах лет.

минералов и горных пород и наметить приблизительный возраст Земли. Так, возраст наиболее древних пород из пегматитов юго-восточной Манитобы (Канада) равен почти 2 миллиардам лет, а возраст гальки из конгломератов Манитобы — 2,3 миллиарда лет; возраст Земли, по данным абсолютной геохронологии, составляет не менее 4—5 миллиардов лет.

В Советском Союзе на основе применения методов абсолютной геохронологии выяснен возраст магматических образований Украины, Карелии, Анабарского щита, пород Антарктиды и других районов. Данные абсолютного возраста совместно с геологическими наблюдениями позволили расчленить докембрий Украины и Балтийского щита. Советские геологи составили но-

вую геохронологическую шкалу абсолютного летосчисления геологических событий. По сравнению со шкалой, предложенной в 1947 году английским ученым А. Холмсом, советская геохронологическая шкала содержит ряд существенных изменений и дополнений. Раздвинуты возрастные границы геологических эр и периодов, внесены некоторые другие исправления. Особенно существенно дополнены данные о возрасте древнейших эр, которые охватывают более 5/6 всей геологической истории образования земной коры.

Абсолютный возраст осадочных пород ранее определялся по отношению к возрасту магматических образований. В последнее время получают развитие прямые методы определения абсолютного возраста осадочных пород: аргоновый, при котором используется глауконит и другие калийсодержащие первичные минералы, и калиевый, при котором используется главным образом минерал силвин. Прямое определение абсолютного возраста осадочных пород позволяет выработать более точную геохронологическую шкалу для осадочных образований, дает возможность точнее подразделить различные осадочные формации и судить о скорости процессов осадконакопления.

Успешно применяется метод распада радиоактивных веществ для определения возраста осадков моря. Так, по распаду иония в илах Тихого и Атлантического океанов установлен возраст образцов в 70, 200 и 300 тысяч лет.

Все шире внедряется метод радиоактивного углерода, по которому определяется содержание углерода-14, присутствующего в органических веществах. Этот изотоп углерода образуется в атмосфере под влиянием космических лучей, окисляется до углекислого газа, усваивается растениями при фотосинтезе, как и обычный углерод, от которого он не отличается по химическим свойствам, и входит в состав их тканей. Когда растения погибают, то поступление углерода-14 в них прекращается, и дальше его содержание постепенно уменьшается за счет радиоактивного распада. Чем меньше в остатках растений углерода-14, тем больше их возраст. Этим методом пока удалось установить возраст отложений, образовавшихся до 50 тысяч лет назад.

Использование радиоуглеродного метода помогло определить, что последнее оледенение в Северной Америке происходило не 20—30 тысяч лет назад, как считалось ранее, а 11 тысяч лет назад. Было установлено также, что таяние ледников Северной Америки и Северной Европы происходило одновременно и продолжалось около 6 тысяч лет. Привлечение данных возраста по углероду-14 позволило впервые сопоставить стратиграфические разрезы Англии и Германии.

Радиоуглеродный метод особенно важен в исследовании новейшего, четвертичного периода истории Земли. Он дает возможность составить абсолютную шкалу четвертичного времени, более подробно подразделить отложения этой системы, уточнить

время и продолжительность ледниковых и межледниковых эпох, время извержения древних вулканов, а также судить о скорости осадкоотложения и развития коры выветривания в четвертичное время. Данные радиоуглеродного метода используются при изучении развития четвертичной флоры и фауны, для определения времени появления и расселения человека, а также для выяснения связи отдельных геологических явлений с жизнью первобытного человека.

Дальнейшее совершенствование методов определения абсолютного возраста и расширение круга вопросов, решаемых с их помощью, принесет еще большие результаты в изучении истории Земли.



ГЕОХИМИЧЕСКИЙ ОБЛИК ЗЕМЛИ

Геохимические ландшафты

Понятие «ландшафтная оболочка земной коры» включает в себя наружную часть литосферы, атмосферу, гидросферу, почвенный покров и органический мир. Ландшафтная оболочка простирается вверх по поверхности Земли по крайней мере до тропопавзы — переходного слоя между тропосферой и стратосферой. Нижняя ее граница расположена в земной коре в среднем на глубине 4—5 километров, соответствующей средней мощности оболочки осадочных пород. Таким образом, в ландшафтную оболочку входят биосфера (по В. И. Вернадскому) и зона гипергенеза (по А. Е. Ферсману).

Вся сложная материальная система ландшафтной оболочки охвачена взаимными связями. В каждом конкретном случае она зависит от целого комплекса физико-географических условий — широтного и высотного положения, характера рельефа, гидро режима, динамики и тепловых и энергетических процессов, процессов выветривания, минерало- и осадкообразования, специфического комплекса живых организмов. Сочетание внутренних и внешних факторов развития ландшафта определяет его зональное единообразие и региональную специфику.

Зональность отдельных компонентов природы, например климата, растительности, была установлена давно, но эти явления не рассматривались в связи друг с другом. Учение о природных зонах в комплексе и взаимозависимости отдельных природных явлений было разработано в конце XIX века выдающимся русским ученым В. В. Докучаевым. Исследуя почвы Европейской России, В. В. Докучаев установил тесную зависимость их от климата, рельефа, грунта, растительного и животного мира, указал на зональное распределение почв, а затем распространил учение о зональности на всю природу земного шара.

Докучаев писал, что ранее изучались «главным образом отдельные тела, минералы, горные породы, растения и животные и явления, отдельные стихии — огонь (вулканизм),

вода, земля, воздух, в чем наука и достигла, можно сказать, удивительных результатов, но не их соотношения, не та генетическая, вековая и всегда закономерная связь, которая существует между силами и явлениями и между мертвой и живой природой, между растительным, животным и минеральным царствами...»

Созданное В. В. Докучаевым учение о зонах природы явилось величайшим этапом в развитии естественных наук; оно открыло путь к изучению закономерностей и структуре природных зон и областей во всей их взаимозависимости и взаимообусловленности и положило начало новому взгляду на закономерности в природных явлениях и процессах.

Развивая свои представления о распределении на земной поверхности почв в виде определенных зон, идущих более или менее (лишь с некоторыми отклонениями) параллельно земным широтам, В. В. Докучаев выделил в северном полушарии следующие естественные почвенные зоны: бореальную, или тундровую, лесную, лесостепную (переходную), степную черноземную, зону сухих степей (переходную), зону пустынь и зону тропических стран. Докучаев указал, что эти же зоны с соответствующими им ассоциациями растений и животных, очевидно, одевают и южное полушарие. Но там они должны занимать гораздо меньше места, так как рельеф и климатические условия там иные, чем в северном полушарии.

Необходимо здесь же отметить, что, рисуя схему широтной зональности, В. В. Докучаев отмечал ряд причин, которые вызывают отклонения от «идеальной» зональности. Он писал, что широтные зоны располагались бы с идеальной правильностью только в том случае, если бы поднятие отдельных участков земного шара над уровнем океанов не превышало примерно трехсот метров, а воды как пресные, так и морские распределялись бы равномерно и симметрично относительно материков по всему земному шару.

Но таких идеальных условий в природе нет. Сильная расчлененность суши, обширные и высокие горные системы, их разнообразное расположение, мощные морские течения оказывают значительное влияние на расположение широтных географических зон. Например, меридиональное направление горных хребтов в западной части Америки и в восточной части Австралии обуславливает там почти такую же меридиональную вытянутость почвенно-растительных зон.

Влияние океана на зональность ярко сказывается в Африке: в то время как на севере материка природные зоны имеют хорошо выраженный широтный характер, на юге они дробятся, часто расположены по меридиану, особенно в восточной части. Наиболее отчетливо широтная зональность представлена на обширных равнинных пространствах Евразии, Северной Америки и Северной Африки.

Зональность зависит и от высоты местности над уровнем моря. Высотная зональность обусловлена главным образом рельефом, строением атмосферы, различной удаленностью разных ее слоев от главного источника тепла — теплового излучения поверхности Земли. Изменения в структуре атмосферы с высотой выражаются в различной плотности ее, влажности и температуре. На некоторой высоте проходит снеговая линия, выше которой накапливается снег и лед. Под экватором, например, нижняя граница зоны вечного льда и снега расположена на высоте 5—6 километров, а в полярных зонах спускается до уровня моря. По высоте природные зоны располагаются примерно в том же порядке, как и по широте. Наиболее полно высотная зональность представлена в тропических и субтропических областях.

Зональность существует и в гидросфере. Воды высоких широт значительно отличаются своей температурой, органическим миром, характером геохимических процессов от вод низких широт. Для тропической зоны характерны постоянная высокая температура воды и воздуха, богатство форм органической жизни, но незначительное количественное их развитие вследствие недостатка кислорода и питательных солей. Здесь происходят активные биогеохимические процессы, вызывающие осаждение солей кальция и образование глобигериновых илов.

Умеренным зонам свойственны значительные колебания температуры воздуха и воды по сезонам, сильное развитие вертикальной циркуляции атмосферы и резко выраженные теплые течения, приносящие воду от тропиков в умеренные и холодные зоны. Органическая жизнь не очень богата формами, но обильна и обладает высокой продуктивностью благодаря большому количеству кислорода и солей.

Холодная зона характеризуется постоянной низкой температурой воды и воздуха, ледовым покровом, сковывающим море или круглый год, или большую его часть. Органическая жизнь здесь бедна.

Широкое развитие получили исследования в области изучения геохимических типов коры выветривания и геохимии ландшафтов. Известный советский геохимик академик Б. Б. Полюнов отмечал, что геохимический ландшафт — это участок земной поверхности, отличающийся определенными особенностями миграции химических элементов, обусловленными комплексом взаимосвязанных тел и явлений, участвующих в развитии ландшафта.

Каждый индивидуальный ландшафт связан воедино прочными нитями круговорота вещества, отражает в себе миграцию атомов и химических элементов, их участие в многообразных процессах органической и неорганической жизни Земли.

Существуют так называемые типоморфные элементы и ионы: H, Ca, Na, C, Mg, Cl, SO₄. Миграция их накладывает яркий отпечаток на почвы, местные воды, растительный покров и связывает все черты ландшафта между собой крепкой причинной

связью. Миграция химических элементов, качественные и количественные закономерности их распределения в ландшафте и составляют то общее, что связывает различные компоненты ландшафта.

Например, для степной зоны характерно сочетание кальция, магния, уголекислоты, образующих карбонаты, в меньшей степени — натрия, хлора, водорода, сульфатного аниона (SO_4). Для пустынной зоны, наоборот, важнейшие мигранты в ландшафтах — катионы и анионы, ведущие к образованию хлоридных, сульфатных и в меньшей степени карбонатных солей.

В природных условиях существует большое разнообразие ландшафтов, названных Б. Б. Полыновым элементарными. Для них характерны не только тип, но и разновидность почв или такие их сочетания, которые обуславливаются сочетаниями определенных элементов ландшафта. Сложные переплетения процессов почвообразования и формирования состава грунтовых вод, миграция элементов в почвах и коре выветривания, концентрация их в животных организмах и почвах определяют сущность типов и разновидностей геохимических ландшафтов.

Исследуя горные породы, продукты выветривания, почвы, растительность, поверхностные и грунтовые воды, можно определить элементы, мигрирующие и накапливающиеся в ландшафте, их качественное и количественное соотношение в отдельных его разновидностях.

Зональные геохимические процессы миграции элементов

В зональности геохимических процессов проявляется химический состав мигрирующих в почве и коре выветривания водных растворов, характер процесса выветривания и почвообразования, остаточных и выносимых элементов; состав новообразующихся гипергенных минералов, биогенная продуктивность живых организмов (накопление и состав органических остатков) и другие особенности ландшафтов. А. Е. Ферсман в своей капитальной работе «Геохимия» наиболее ярко сформулировал эти особенности: направление движения почвенных растворов (сверху вниз во влажных областях и снизу вверх — в сухих пустынях); смену кислотности почв (от щелочных в сухих зонах до слабокислых — в лесных); различное количество воды и связанную с этим концентрацию растворов (слабые растворы приполярных областей, рассолы пустынь); различие в судьбе продуктов гниения или окисления (образование гумуса в таежных зонах и сгорание органических продуктов до CO_2 в пустынях); различие в ходе миграции SiO_2 , Al_2O_3 и FeO_3 (подзолы, соляные коры); различие в соотношении скоростей механического и химического гипергенеза; различие в солнечном облучении (от пологих

температур около нуля в области вечной мерзлоты до 80 градусов в пустынях); различие в интенсивности воздействия механических факторов (воды, ветра, льда) и хода, скорости и масштаба биохимических процессов.

Для геохимической характеристики ландшафта и условий его развития в историческом и палеогеографическом аспекте важны прежде всего данные, указывающие на геологическую историю территории и главные комплексы пород зоны гипергенеза. От этих факторов зависит, какие элементы поступают в миграцию и биологический круговорот в процессе выветривания пород и образования ландшафтов.

Другой комплекс факторов физико-географический, главным образом гидроклиматические и геоморфологические условия развития геохимических и биогеохимических процессов (выветривания, окисления, выщелачивания, разложения органических остатков). Все это определяет условия миграции и распределения элементов в ландшафте.

Третий комплекс факторов — количественные данные, характеризующие состав химических элементов и их кларки в отдельных компонентах ландшафта, порядок и коэффициенты миграции элементов в природных водах, состав первичных и вторичных минералов, концентрацию ионов водорода и окислительно-восстановительные потенциалы среды, биологическое поглощение.

В результате геохимического изучения ландшафтов устанавливаются фоновые кларки для более или менее обширной территории, однородной по структуре ландшафтов, и аномальные отклонения. Выясняется роль отдельных элементов и их ассоциаций, вызывающих контрастные явления в развитии ландшафта.

Наименьшей химической подвижностью элементов и их соединений, по понятным причинам, характеризуются **полярные области**, где господствуют суровые гидроклиматические условия.

Геохимические процессы развития ландшафтов в странах с холодным и умеренно-холодным климатом (зоны тундры и лесотундры) определяются влиянием низких температур. Средняя температура самого теплого месяца здесь не поднимается выше 10 градусов, холодное время преобладает над теплым — зима длится от 7 до 9 месяцев. Количество солнечного тепла в этих зонах недостаточно, неглубоко под земной поверхностью залегает вечная мерзлота. В формировании и развитии ландшафтов физико-механические и динамические факторы и процессы здесь преобладают над химическими и биогеохимическими. Выветривание пород выражается преимущественно в механическом разрушении, химическое выветривание протекает слабо и не ведет к глубокому гидролитическому разложению минералов. Поэтому в коре выветривания господствуют грубообломочные продукты, преимущественно мало измененные химическими процессами первичные минералы — кварц, полевые шпаты и рутил. Лишь в

тонкозернистых продуктах выветривания в незначительных количествах присутствуют вторичные минералы типа гидрослюд, представляющие промежуточные (стадийные) минералы выветривания.

Природные воды в этой области характеризуются гидрокарбонатным составом. Почвенные растворы обогащены органическим веществом и являются в той или иной степени кислыми. Почвообразование здесь носит специфический характер: образуются торфяно-болотные и скрытоподзолистые почвы с неясно выраженными горизонтами, малой мощностью и небольшим содержанием перегноя. Они бедны зольными элементами и азотом в минеральной форме.

Основной фон растительного покрова тундры — лишайники и низкорослые кустарники. Биологический круговорот атомов здесь протекает слабо. В местах накопления органического вещества недостает свободного кислорода, и разложение органических остатков идет слабо, что влечет за собой недостаток многих других биогенных элементов, важных для развития ландшафтов.

Более энергично геохимические и биогеохимические процессы протекают в условиях **таежно-лесной** зоны. Климатические условия здесь более благоприятны для химического разложения пород и биологического круговорота химических элементов. Зима менее продолжительна, лето теплое — средняя температура самого теплого месяца выше 10 градусов. Атмосферные осадки выпадают в достаточном количестве; испарение невелико, и в почве остается значительная часть поступающей влаги.

Здесь велика роль проточных поверхностных вод, заболачивания и отложения органических илов на дно озер. Лесная и густая травянистая растительность обеспечивает образование значительного количества органического вещества, часть которого полностью разлагается, превращаясь в белки, жиры, углеводы, органические кислоты, минеральные соли, а часть накапливается в виде торфа и других органических остатков. Большую роль в разрушении органического вещества играют микроорганизмы.

В ходе разрушения и минерализации органического вещества поверхностные и почвенные воды обогащаются углекислотой, органическими кислотами и минеральными солями. Они становятся кислыми и обладают высокой химической активностью. Кислоты дают со щелочными и щелочноземельными основаниями и полуторными окислами растворимые в воде соединения, способные легко выноситься из почвы. Образующаяся кислая среда способствует глубокому разложению минеральной массы. Алумосиликаты распадаются так, что кремнезем, окись алюминия и особенно железа выделяются в свободном состоянии в виде гидратов и мигрируют в толще почв и коры выветривания.

Все это ведет к формированию подзолистых горизонтов, представляющих крайнюю степень выщелачивания и содержащих только кварц или близкие к нему по устойчивости разновидности

кремнезема. Элементы первой и значительной части второй группы таблицы Менделеева почти полностью выносятся не только из сферы почвообразования, но и из всей коры выветривания.

Господствующие почвы в таежно-лесной зоне — дерново-подзолистые, с большим количеством разновидностей в зависимости от степени оподзоленности, содержания гумуса и других генетических особенностей. Широко распространены заболоченные и болотные почвы, а также глубокие торфяные болота. У южной границы лесной зоны в особый тип выделяются серые лесные почвы, на карбонатных породах формируются выщелоченные карбонатные.

Важнейшая биогеохимическая особенность формирования таежно-лесного ландшафта — недостаток в почвах и растительном покрове таких биогенных элементов, как кальций, фосфор, калий, магний, натрий, и многих редких элементов, вымывающихся из верхних слоев почвы в нижние. Это не только влияет на развитие естественного ландшафта и сельскохозяйственных культур, но и нередко приводит к заболеваниям растений и животных. У животных наблюдаются болезни скелета (например, рахит), молочный скот дает низкие удои.

В степной зоне по сравнению с тайгой климатические условия более теплые и сухие, что благоприятствует развитию густой разнообразной растительности, разложению органических остатков и накоплению их в почвах в виде гумусовых кислот. Вследствие того, что почвы и коры выветривания здесь слабо промываются почвенными растворами, гумусовые кислоты в значительных количествах накапливаются в верхних горизонтах, образуя различные разновидности черноземов.

Те же условия способствуют глубокому разложению минеральной части почвы, выносу легкоподвижных элементов, особенно хлоридов и сульфатов, и накоплению карбонатных солей в форме кальцита, арагонита и магнезита. Последние пропитывают почвы и отложения коры выветривания, накладывая свой отпечаток на химический состав поверхностных и грунтовых вод и растительности. Поверхностные и грунтовые воды здесь жесткие. На дне водоемов отлагается пресноводный мергель, в образовании которого принимают участие специфические водоросли. Широко распространены отложения коры выветривания — лессы и лессовидные грунты, существенную часть которых составляют карбонаты кальция и магния. В поймах рек и на лугах накапливаются известковые туфы.

Господствующие почвы степной зоны — черноземные и каштановые. Последние развиты на границе между черноземными почвами и почвами пустынь и обладают признаками и тех, и других. Черноземные почвы характеризуются прочной мелкозернистой или крупчатой структурой, не разрушающейся от увлажнения, хорошо проницаемы для воздуха и воды. Если в них присутствует гипс, то он находится ниже гумусового горизонта.

Кроме кальция и магния, ландшафты здесь богаты фосфором, азотом, калием и разнообразными микроэлементами. Это обеспечивает высокое плодородие почв, нормальное развитие животных и растений, высокую молочность скота. В биогеохимическом отношении — по содержанию химических элементов и их биологическому влиянию на рост и развитие сельскохозяйственных растений и животных — почвы и ландшафты степной зоны можно считать эталоном для других зон и ландшафтов.

По мере продвижения к югу, в **область пустыни**, количество тепла увеличивается, а количество осадков уменьшается. Заметно изменяется растительный покров, который приспособляется к специфическому режиму пустынь. Большую роль играет здесь ветровое разрушение земной поверхности, в результате которого перевеваются и переносятся в воздухе значительные массы песка и пыли. Жара вызывает сильное испарение почвенных растворов и образование на поверхности и в почве солевых скоплений — солончаков, состоящих из хлоридов, сульфатов, карбонатов и их разнообразных сочетаний.

В миграции элементов в ландшафтах пустыни важную роль играют хлор, бром, йод, сера (в форме SO_4), кальций, натрий, магний и другие, образующие различные минералы. В числе последних видное место занимают галит, сода, ангидрит, гипс, мирабилит, селитра (натриевая и калиевая).

Все это накладывает свой отпечаток на облик ландшафтов. В травяном и древесном покрове пустынь господствует редкая растительность, приспособленная к засухе. Это молочайниковые, кактусы и различные солелюбивые растения. Роль растительности в биогенном круговороте незначительна. Вся она быстро отмирает, минерализуется и рассеивается на поверхности почвы. Там, где на предгорных склонах и равнинах формируются почвы, они имеют маломощный гумусовый горизонт и представлены сероземами и буроземами. В них наблюдается большое скопление извести, часто сильная солонцеватость. В большинстве случаев огромные пространства пустыни заняты барханными песками, глинистыми и песочно-глинистыми солончаками (такырами, шорами).

Широко распространены каменистые пустыни. Это мрачные, черные от пустынного загара пространства, образующиеся чаще всего на подгорных склонах, куда редкие, но бурные погоды выносят с гор несортированный «горный мусор» — щебень, ил и песок.

Геохимические процессы в этой зоне всецело определяются недостатком воды и сухостью климата. Почвы и кора выветривания не промываются сверху вниз и не выщелачиваются. Наоборот, испарение и связанный с ним капиллярный подъем грунтовых вод к поверхности обогащают почву разнообразными элементами и засоляют ландшафт. Образуется избыток таких элементов, как хлор, сера, натрий, оказывающих вредное влияние на

развитие организмов. Для повышения биологической продуктивности ландшафтов пустынь необходимо удаление солей, что осуществляется различными мелиоративными мероприятиями.

С исключительной активностью протекают геохимические и биологические процессы в ландшафтах **тропических и влажных субтропических областей**. Там в течение круглого года господствуют высокие температуры, выпадает много осадков, происходит энергичное и глубокое разрушение горных пород. Растительный покров очень обилен и разнообразен.

В биосфере тропиков накапливается много живого вещества и органических остатков, минерализация которых обогащает почву и кору выветривания органическими кислотами и минеральными солями. В то же время развитие органического мира сопровождается извлечением из почв и коры выветривания большого количества различных элементов и соединений, особенно SiO_2 , Al_2O_3 , Ca , Mg , Fe . На каждом гектаре тропических лесов, где ежегодный прирост сухого веса растений составляет 25—50 тонн, за год накапливается около 100 килограммов кремнезема.

В ходе выветривания пород в тропической зоне энергично протекают выщелачивание и миграция элементов и соединений. Здесь легко подвижны кальций, магний, калий, натрий и другие элементы. В больших масштабах образуются свободные гидраты Al_2O_3 , Fe_2O_3 , SiO_2 ; такие минералы, как диаспор, бемит, гиббсит, каолинит, галлуазит, нонтронит, гидрогематит, гетит и другие. Они преимущественно составляют красноцветные породы — латериты, бокситы, боксито-латериты и каолин-латериты. На этих породах формируются в различной степени оподзоленные и неоподзоленные желтоземные, красноземные и латеритные — красноцветные почвы.

Главные черты геохимических процессов красноземной коры выветривания и почв — образование свободных гидратов глинозема, железа и кремнезема, а также вынос кремнезема, щелочных и щелочноземельных солей из верхних горизонтов, что приводит к обогащению их свободными гидратами окислов железа, алюминия и марганца. Высокая температура и значительное количество влаги вызывают также энергичное разложение органических веществ и вынос их из верхних горизонтов, что обедняет почву перегноем. Процесс выветривания и почвообразования в тропических и влажных субтропических странах получил название латеритно-красноземного.

Изучение геохимических типов ландшафтов помогает установить территориальные комплексы и разновидности ландшафтов, качественные и количественные различия между наиболее мелкими ландшафтными единицами, описать свойственные им природные условия и геохимические процессы миграции и концентрации элементов. Все это дает возможность выявлять природные потенциальные возможности данной территории, обу-

ловленные биологическим и геохимическим круговоротом вещества, рекомендовать наилучшие способы хозяйственного использования ландшафта.

Геохимия атмосферы

Воздушная оболочка Земли — атмосфера разделяется на тропосферу, стратосферу, мезосферу, ионосферу и экзосферу, каждая из которых имеет специфические геофизические и геохимические особенности. Границы между этими слоями выражены нерезко и находятся на разных высотах в зависимости от широты местности. Так, верхняя граница тропосферы — тропопауза — лежит над экватором в среднем на высоте 16—19 километров, в умеренных широтах — 10—12 километров, а в полярных — 7—10 километров.

Тропосфера — это область обитания живых существ, богатая азотом, кислородом, насыщенная парами воды и углекислотой. В тропосфере сосредоточено около 80 процентов всей массы атмосферы.

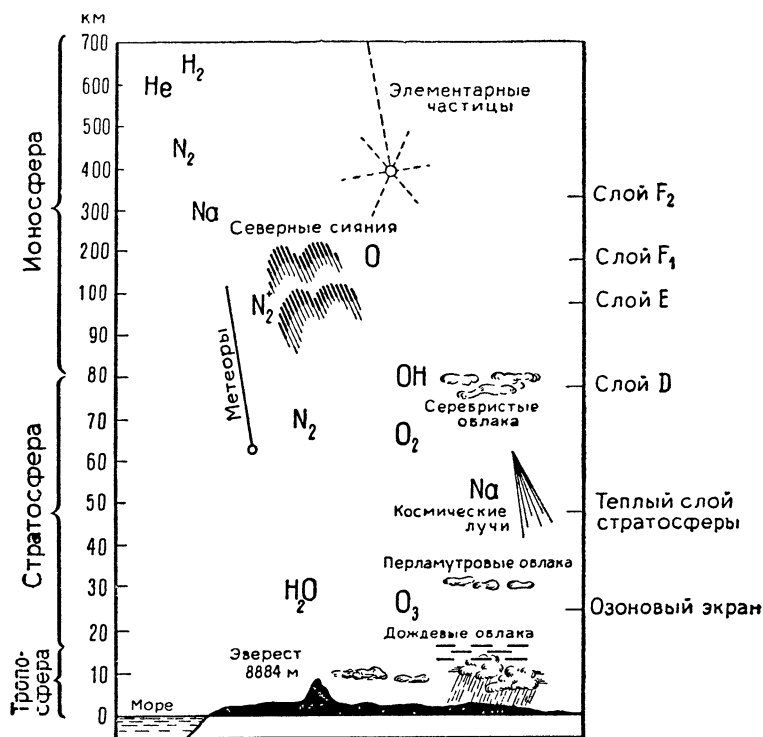
Выше тропосферы, примерно до высоты 40—50 километров, расположена стратосфера. Здесь количество азота и кислорода уменьшается, а процентное содержание водорода, гелия и других легких газов увеличивается. Между тропосферой и стратосферой, на высоте 15—35 километров, залегает так называемый озоновый экран, обладающий способностью поглощать ультрафиолетовую коротковолновую радиацию Солнца. Этот слой оказывает огромное влияние на тепловые условия у поверхности Земли и физические процессы, протекающие в тропосфере.

Стратосфера постепенно переходит в мезосферу, причем до высоты примерно 60 километров температура возрастает, достигая 50 градусов, а на высоте около 80 километров, у верхней границы мезосферы, понижается до минус 70—80 градусов.

Дальше, на высоте от 80 до 5000 километров, расположена ионосфера, в составе которой преобладают разрушенные космическим излучением атомы — ионы. Ионосфера переходит в экзосферу (вакуумсферу), или внешнюю часть земной атмосферы. Характерная особенность ее — преобладание газов в атомарном состоянии и исключительно малая плотность частиц. Это — преддверье космического пространства.

В последние годы запуски искусственных спутников Земли, космических ракет и кораблей-спутников позволили науке получить новые данные о свойствах верхней атмосферы и прилегающего к Земле космического пространства, о магнитных полях Земли и Луны, электромагнитном и корпускулярном излучениях Солнца, о космических лучах, межпланетной пылевой и газовой среде, а также изучить другие явления, представляющие большой интерес для науки и для решения практических вопросов, связанных с космическими полетами человека.

При помощи точной аппаратуры установлено, что плотность атмосферы выше 500 километров в 16—40 раз больше, чем считалось до последнего времени. Это весьма важное обстоятельство, которое следует учитывать при характеристике процессов, протекающих в атмосфере.



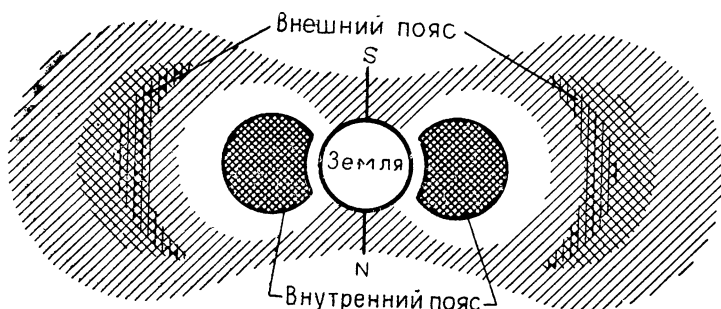
Строение атмосферы Земли.

Из глубин Вселенной на границу атмосферы падает поток заряженных частиц — космических лучей, в основном протонов, обладающих очень высокими энергиями и проникающей способностью, во много раз превосходящей способность других видов излучений. При взаимодействии с атомами земной атмосферы космические лучи образуют вторичное излучение сложного состава. Действие космических лучей определяется прежде всего их ионизационной способностью, то есть способностью разбивать атомы любого вещества на ионы.

От Солнца приходят на Землю потоки электрически заряженных частиц, известные под названием корпускулярного излучения. Вместе с ультрафиолетовыми лучами они оказывают

существенное влияние на состояние земной атмосферы, на распространение радиоволн, на магнитные явления.

Вблизи Земли находится зона интенсивной радиации, в которой сосредоточено большое число электронов. Положение



Разрез поясов повышенной радиации вокруг Земли в плоскости магнитного меридиана.

этой зоны соответствует распределению силовых линий магнитного поля Земли, играющего роль «ловушки» для заряженных частиц. Внутри этой области выделяются два пояса — внешний, простирающийся от северных до южных полярных областей, и внутренний, опоясывающий Землю в экваториальных районах.

Внешний радиационный пояс состоит преимущественно из электронов. Область максимальной интенсивности его расположена на расстоянии 20—25 тысяч километров от Земли. Внутренний пояс состоит в основном из протонов; максимум интенсивности его находится приблизительно на расстоянии 1,5—2 тысяч километров от поверхности Земли. Заряженные частицы в обоих поясах движутся с огромной скоростью.

В последнее время получены данные, указывающие на наличие еще и третьего, самого внешнего радиационного пояса.

С «дыханием» радиационных поясов связываются многие явления, протекающие в высоких слоях атмосферы и ионосферы, в том числе полярные сияния и магнитные бури.

Земная атмосфера — резервуар, в котором скопляются газы самого различного происхождения, образующиеся в земной коре. Они непрерывно вовлекаются в геохимические процессы, протекающие на земной поверхности и уводящие элементы атмосферы в космическое пространство.

Существуют две основные гипотезы о происхождении и дальнейшем развитии атмосферы Земли. Согласно одной из них, современная воздушная оболочка Земли — остаток плотной древней атмосферы, сформировавшейся при остывании расплавленного земного шара. Вторая гипотеза гласит, что современная атмосфера создавалась постепенно в ходе геохимической истории

Земли в результате геохимических процессов, протекающих в земной коре и в мантии, «дегазации» пород и утечки из них газов. Большинство ученых придерживается второй гипотезы.

По мнению американского ученого В. В. Руби, то количество углекислого газа, воды, азота и серы, которое входило и входит в состав земной атмосферы, свидетельствует в пользу гипотезы постепенного накопления газов из глубин. Если предположить, в соответствии с первой из приведенных выше гипотез, что атмосфера образовалась после того, как расплавленная ранее Земля застыла, и что современная атмосфера — остаток этой горячей древней атмосферы, то породы земной коры должны были под действием выветривания разложиться в гораздо большей степени, чем это наблюдается на самом деле. В морской воде должно было бы раствориться гораздо больше оснований, а на дне океана отложиться гораздо больше известняка, чтобы первичная концентрация углекислого газа в такой древней атмосфере уменьшилась до величины, при которой могла бы начаться первичная жизнь.

Подобным же образом, в соответствии с этой гипотезой, в морской воде должно было бы быть растворено значительно больше натрия, чем все его количество, которое растворилось в течение всего периода земной истории. Чтобы образовалось такое количество карбонатных осадков, какого требует эта гипотеза, докембрий должен был быть временем интенсивного накопления карбонатных пород; геологическая же летопись свидетельствует, что основная масса известняков отложилась значительно позже — в палеозое.

Если же признать, что образование древней атмосферы происходило постепенно в течение геологического времени в результате утечки водяного пара, углекислоты, азота и других летучих газов из недр земной коры и мантии («дегазация» пород), то нет нужды полагать, что в древнем докембрии было разложено столь большое количество пород, растворено огромное количество натрия и отложено так много карбонатов.

Все эти геологические факты свидетельствуют о предпочтительности гипотезы постепенного накопления атмосферы и воды в океане в результате «дегазации» глубинных частей Земли и выделения из них воды.

Один из важнейших источников образования атмосферы — развитие жизни на Земле, со всеми ее сложными и многообразными проявлениями геохимических процессов. Как указывал В. И. Вернадский, «атмосфера Земли в ее главных газах — водороде, азоте, углекислоте — есть создание жизни».

Согласно американскому геохимику Г. Юри, первичная атмосфера Земли состояла из водяного пара, водорода, аммиака, некоторого количества сероводорода. В ней отсутствовал свободный кислород, и протекающие на земной поверхности процессы носили восстановительный характер. Хотя под воздействием

ультрафиолетового излучения Солнца постоянно происходило разложение водяного пара на водород и кислород, последний полностью тратился на окисление аммиака до азота и воды, а также на окисление метана с переходом его в воду и углекислый газ. Водород в значительной мере терялся, улетучиваясь из атмосферы в космическое пространство, углекислый газ вступал в реакции с горными породами, образуя скопления известняков и других карбонатных пород.

Главный компонент современной атмосферы — **азот**. Это весьма инертный газ, который почти не вступает в химическое взаимодействие с другими веществами. Часть ученых полагает, что современный азот — это не что иное, как древний азот, образовавшийся во время остывания Земли и создания ее оболочек. Растворяясь в воде, он проникает вместе с ней в земную кору, а затем при определенных условиях снова возвращается в атмосферу с восходящими струями воды. Известны выходы азотных газовых струй, которые чаще всего сопутствуют горячим водным источникам (Тянь-Шань, Алтай, Забайкалье) и высокоминерализованным рассолам (средняя и северная часть европейской территории СССР).

Другие ученые, в том числе В. И. Вернадский, считают, что главный источник образования атмосферного азота — жизненные процессы в биосфере. Этой точки зрения придерживается сейчас большинство ученых.

В земной коре азот образуется при бактериальном брожении белковых веществ, а также при разложении азотсодержащих веществ, входящих в состав горных пород. Часть выделяющегося азота усваивается особыми бактериями почвы (азотобактер), после смерти которых азот либо возвращается в атмосферу (денитрификация), либо подвергается метаморфизму вместе с ископаемым азотом и переходит в состав минеральных азотных соединений — нитратов, нитритов, аммонийных солей. Эти хорошо растворимые вещества вместе с подземными водами мигрируют в толще горных пород. При вулканических процессах минеральные азотсодержащие вещества разлагаются, а свободный азот или его окисные соединения вновь возвращаются в атмосферу.

Важнейший элемент атмосферы — **кислород**. Количество свободного кислорода в атмосфере почти постоянно и равно $1,5 \cdot 10^{15}$ тонн, что составляет приблизительно 0,01 процента всего кислорода земной коры. Свободный кислород содержится не только в атмосфере. Значительная часть его растворена в водах океана, в пресных водах суши, в снегах, льдах и в породах.

Кислород — самый могучий деятель из всех известных химических элементов. Мы знаем тысячи химических реакций, в которых он участвует. И везде, где бы он ни находился, он окисляет огромное количество химических соединений, он всегда в движении, все время вступает в соединения с органическими и минеральными веществами, образуя окислы, гидраты окислов метал-

лов и неметаллов и продукты их разрушения. История всех элементов земной коры связана со свободным кислородом.

Кислород непрерывно накапливается в тропосфере, освобождаясь из углекислоты и воды при фотосинтезе зелеными растениями. Свободный кислород выделяется также при радиоактивном распаде, разложении водяных паров и углекислоты ультрафиолетовыми излучениями и в процессах метаморфизма. В глубинах земной коры свободный кислород должен также выделяться, так как соединения, богатые кислородом (сульфаты, окись железа), превращаются в глубоких слоях коры в соединения, более бедные кислородом или вовсе его не содержащие. Однако ни при разложении воды и углекислоты ультрафиолетовыми лучами, ни при радиоактивном распаде не образуется такой массы свободного кислорода, которая могла бы сравниться с количеством кислорода, выделенного биогенным путем.

Происхождение свободного кислорода и его содержание в древней атмосфере до сих пор не ясно. Эти вопросы могут быть освещены лишь тогда, когда мы сумеем полностью выяснить состав самых древних пород и реконструировать геохимические процессы, протекавшие в земной коре в отдаленные эпохи. Газы, выделяющиеся из вулканов и горячих источников, а также входящие в состав изверженных пород и метеоритов, свободного кислорода не содержат. По-видимому, нет оснований считать, что свободный кислород образовался одновременно с формированием Земли.

Помимо возникновения свободного кислорода в результате жизненных процессов, он, по-видимому, образовывался в верхних частях атмосферы в результате фотодиссоциации водяного пара. Однако такого кислорода могло образоваться в 3—6 раз меньше, чем потребовалось для окисления веществ, погребенных теперь в осадочных породах. Вероятно, процессы окисления закисного железа в окисное и сульфидов в сульфаты, в ходе которых кислород поглощался или его содержание поддерживались на низком уровне, и создавали восстановительную среду, необходимую для возникновения жизни.

В состав тропосферы входит также **углекислый газ**. По подсчетам советского исследователя В. А. Успенского, в общей массе газов земной коры количество углекислоты составляет 3,39 процента и равно $18,04 \cdot 10^{13}$ тонны.

Концентрация углекислоты в воздухе не остается постоянной, а колеблется. Эти колебания обусловлены как локальными причинами, так и общими — перемешиванием воздушных масс. Содержание углекислоты в арктических массах воздуха, как правило, выше, чем в тропических. Последнее, по-видимому, объясняется влиянием солнечного излучения.

Углерод как элемент проникает в атмосферу не только в виде двуокиси, но и окиси, а также метана. Но в условиях поверхности Земли окись углерода и метан подвергаются химическому

изменению и часто превращаются в углекислый газ — наиболее устойчивое газообразное соединение углерода в атмосфере.

В. И. Вернадский указал, что углекислота находится в тропосфере в состоянии сложного динамического равновесия. Она освобождается при вулканических явлениях, из горячих минеральных источников, из природных газов, из изверженных пород при выветривании, из морей и пресных водоемов; в процессе дыхания животных и растений, при биохимических процессах разложения органических остатков и, наконец, в результате технической и сельскохозяйственной деятельности человека.

Проникающая в атмосферу теми или иными путями углекислота не остается неизменной. Углекислый газ поглощается живыми организмами как наземными, так и морскими. Таким путем углерод входит в состав органических соединений и проникает в область биохимических реакций. Углерод живых организмов происходит в основном из углерода атмосферы. В форме углекислого газа и метана углерод возвращается в атмосферу при жизнедеятельности организмов и после их смерти. Часть органических остатков претерпевает минерализацию, в результате чего углерод переходит в состав своих минеральных соединений (кальцит). Эти минеральные соединения проникают в метаморфическую оболочку Земли и при нагревании разлагаются, образуя тот же углекислый газ и иногда метан. Таким образом, этот геохимический цикл завершается возвращением углерода в атмосферу.

Кроме живого вещества, есть и другие пути извлечения углекислоты из атмосферы. Это, например, образование на земной поверхности значительных скоплений карбонатов. Углекислота в форме карбонатов и бикарбонатов уносится водами в океан и в более глубокие слои земной коры. Поверхностные воды, поглощая углекислоту, регулируют количество ее в атмосфере.

Общая сумма газов, находящихся в гидросфере, водоемах и стратосфере, составляет, по расчетам В. А. Успенского, всего 4,1 процента от общего количества этих газов на Земле. Однако здесь сосредоточено около 99 процентов общей массы углекислоты. Эти огромные количества углекислоты, растворенной в гидросфере и накопленной в стратосфере, и составляют тот источник, за счет которого выравнивается концентрация непрерывно поглощающейся атмосферной углекислоты. Достаточный запас углекислоты в атмосфере и гидросфере, а также круговорот углерода в природе создают возможность для безграничного развития жизни без ощутимого снижения количества углекислоты — основного строительного материала биохимического синтеза.

Можно предполагать, что содержание углекислоты в атмосфере не всегда было постоянно. Доказательством этому служит тот факт, что количество образующихся карбонатных осадков снижалось со временем — от 42,6 процента всех пород в палеозойскую эру до 5,8 процента в мезозойскую эру и 0,08 процента

в кайнозойскую эру. Это свидетельствует о том, что содержание углекислоты в атмосфере уменьшалось.

Поступление углекислого газа в атмосферу заметно увеличилось за последние 100 лет в результате хозяйственной деятельности человека. Сжигая ископаемое горючее, человек выбрасывает в атмосферу каждый год приблизительно 6 миллиардов тонн углекислоты. В процессе сельскохозяйственной деятельности углекислоты освобождается еще около 2 миллиардов тонн.

Группа **инертных газов** (аргон, неон, гелий, криптон, ксенон) составляет в воздухе менее 1,3 процента. Эти газы отчасти имеют космическое происхождение, отчасти (гелий, аргон, ксенон) образуются в результате радиоактивных процессов, протекающих в земной коре. О космическом происхождении инертных газов свидетельствует присутствие гелия и аргона на Солнце и на других планетах. Полагают, что за время существования Земли содержание этих газов в земной коре и атмосфере уменьшалось за счет диффузии в мировое пространство и за счет химических реакций. Особенно быстро улетучивается в мировое пространство гелий. Другие благородные газы имеют значительно большую растворимость и меньшую скорость движения атомов при большой их плотности. Поэтому они меньше улетучиваются в мировое пространство и в большем количестве сохранились на планете.

В условиях Земли источником аргона служит радиоактивный распад калия. При излучении бета-лучей калий превращается в кальций, при гамма-излучении — в аргон. По современным представлениям, 11 процентов распавшегося калия-40 превращается в аргон-40.

Как показали в 1946 году академик В. Г. Хлопин и Ю. К. Герлинг, ксенон также образуется при радиоактивном распаде урана с очень большим периодом полураспада ($5 \cdot 10^{15}$ лет).

В атмосфере содержится и незначительное количество **водорода**. Одним из его источников служит разложение воды под действием солнечного света на водород и кислород. С другой стороны, источником водорода в земной коре могут служить процессы бактериального брожения органических веществ и разложения их под действием альфа-лучей, образующихся при радиоактивном распаде.

Водород в земной коре редко образует свободные выходы на поверхность. Однако в последнее время обнаружены газовые струи с значительным содержанием водорода (Кавказ, Кузбасс, Быстрийское газонефтяное месторождение в Минусинской котловине, Московская, Ярославская области и другие районы Русской платформы). В таких случаях водород обычно сопутствует нефти, и, вероятно, его происхождение связано с происхождением нефти.

В верхних слоях атмосферы в силу существующих там особых геофизических и геохимических условий (низкое барометри-

ческое давление, резкие колебания температуры, различные виды ионизирующей радиации) происходит диссоциация газов и ионизация их атомов. Помимо электронов и ионов здесь образуются свободные атомы и радикалы, которые играют особо важную роль в химических процессах.

Мы видим, что геохимические процессы образования газов атмосферы исключительно сложны и многообразны. Во многом они остаются для нас загадочными. В то же время очевидно огромное геохимическое значение атмосферы. В газообразном состоянии геохимическая миграция элементов происходит быстрее, и только благодаря этому осуществляются многие геохимические реакции и превращения. Газы атмосферы, мигрируя в смежные сферы Земли, участвуют в концентрации и рассеянии элементов в литосфере и гидросфере, в процессах разрушения и образования пород и минералов, в изменении состава поверхностных и подземных вод.

Атмосфера — важнейший геохимический деятель

Атмосфера — один из важнейших деятелей земной поверхности. Через нее поступает в земную кору солнечная энергия, ее элементы и соединения в растворенном состоянии содержатся в природных водах, почвах и организмах растений и животных. Атмосфера предохраняет подстилающую поверхность от чрезмерного остывания в результате излучения по ночам и зимой. Велико влияние атмосферы на все земные процессы, с которыми связано выветривание и почвообразование, жизнь и развитие живых организмов.

От количества и характера выпадения атмосферных осадков зависит микробиологическая деятельность организмов, механическое разрушение поверхности (эрозия) и другие процессы. Ветер участвует в разрушении и отложении пород. В пустынях он переносит соли и пылевые частицы.

Влияние температуры воздуха особенно велико при больших ее перепадах. Колебания температуры ведут к физическому или термическому распаду пород и превращению их в рухляк. С повышением температуры возрастает энергия многих геохимических и биогеохимических процессов.

Лучистая энергия Солнца — важнейший фактор энергетики почв и коры выветривания. Влияние энергии Солнца на процессы выветривания и миграцию элементов в ходе разрушения и перемещения продуктов выветривания определяется законами мировой зональности. Вследствие шарообразной формы Земли и различного наклона солнечных лучей к земной поверхности на разных широтах, на единицу площади поступает различное количество солнечного тепла. Температурные условия земного шара и осадки в значительной мере определяют ландшафтные

зоны с различными природными условиями и последовательной сменой почвенно-растительного покрова в зависимости от широтного и высотного положения.

Особая роль в окислительно-восстановительных процессах принадлежит кислороду. На реакциях окисления — восстановления основаны все жизненные процессы организмов: дыхание, фотосинтез, работа нервной системы и другие биогеохимические процессы. В биосфере окислительные процессы наиболее активно протекают на поверхности Земли при участии свободного кислорода атмосферы и растворенных газов гидросферы. Глубина зоны окисления зависит главным образом от трещиноватости пород и от уровня залегания грунтовых вод. В сильно трещиноватых породах глубина зоны окисления может превышать 500 метров. С глубиной количество свободного кислорода убывает, и окислительные процессы уступают место восстановительным. Окисление или восстановление изменяет растворимость соединений, вызывая либо большую подвижность элементов и рассеяние их, либо выпадение их в осадок.

Несмотря на весьма малое количество в земной коре свободного кислорода по сравнению со связанным, геохимическое значение его в биосфере исключительно велико. Он участвует в тысячах самых разнообразных реакций. С большинством элементов кислород реагирует непосредственно, исключение составляют лишь галогены, золото и платина. В результате этих процессов образуются разнообразные так называемые гипергенные минералы, специфические для биосферы и коры выветривания. Количество таких минералов исчисляется сотнями. Многие из них образуют крупные месторождения железа, марганца, меди, свинца, фосфора, серы, серебра и других ископаемых.

Наибольшее значение имеют соединения кислорода с водородом — вода и с углеродом — углекислый газ. Эти соединения участвуют в самых разнообразных земных реакциях. Они являются активными агентами разрушения пород и минералов, миграции, рассеяния и концентрации элементов в почвах, породах и месторождениях полезных ископаемых. В воде обычно растворены многие металлы, присутствие которых ускоряет окисление или восстановление.

Воздействие воды и кислорода на сернистые соединения металлов сопровождается образованием серной кислоты и сульфидных растворов металлов, которые играют исключительно важную роль в дальнейшем изменении минералов — окислении металлов и металлоидов, их миграции и образовании новых минералов. Из сульфатов металлов наиболее активным агентом в разрушении сульфидов являются сульфаты железа $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ и FeSO_4 . Последний менее устойчив и легко окисляется в $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$. При воздействии последнего на сульфиды меди, свинца, цинка и других образуются сульфаты этих металлов, а также FeSO_4 и в ряде случаев серная кислота.

Соединение кислорода с серой образует, как известно, сернистый ангидрид—сернистый газ SO_2 , который при растворении в воде образует слабую сернистую кислоту. В этом виде сернистый ангидрид растворяет многие органические соединения и неорганические соли.

Широко распространено окисление руд сульфидных месторождений в коре выветривания в присутствии свободного кислорода и углекислоты. Продукты окисления имеют чрезвычайно разнообразный характер, определяющийся составом первичных пород и руд и развитием процессов окисления. Все сульфиды в процессе окисления обязательно проходят сульфатную стадию, что очень важно для миграции металлов в зоне окисления и дальнейшего хода превращений горных пород и минералов. Растворимость сульфатов отдельных металлов различна, что и определяет различное участие их в образовании продуктов последующего окисления и разложения пород и минералов.

В процессе окисления химически стойкие минералы скопляются либо в форме окислов и гидроокислов, либо в виде силикатов и некоторых других соединений.

Восстановительные процессы, освобождающие кислород и создающие новые минералы, также приводят к образованию месторождений полезных ископаемых. В результате этих процессов концентрируются такие элементы, как железо, золото, серебро, медь, платиновые металлы, сера, селен, теллур и другие.

Окислительные процессы протекают и ниже уровня грунтовых вод, в так называемой зоне глубинного выветривания. Здесь породы и минералы подвергаются медленно идущим процессам гидролиза, гидратации и замещения с участием влаги, содержащейся в породах, кислорода биогенного происхождения, растворенного в воде, а также углекислоты.

Гидросфера — геохимическое чудо природы

Термин «гидросфера» включает всю совокупность воды в земной коре и на ее поверхности. Сюда входят воды рек и озер, морей и океанов, ледников, минералов и пород. Гидросферу выделил как особую земную оболочку (геосферу) австрийский геолог Э. Зюсс. Наибольший вклад в геохимическое изучение природных вод внес В. И. Вернадский. В книге «История природных вод» он выделил и охарактеризовал 485 их видов.

По подсчетам В. И. Вернадского, объем вод Мирового океана составляет 1370 миллионов кубических километров. В земной коре до глубины 16 километров содержится 400 миллионов кубических километров воды, из которых большая часть — в виде связанной воды в составе горных пород. Объем высокогорных и полярных льдов составляет 30 миллионов кубических километров, в реках и озерах образуется еще 4 миллиона кубических километров льда.

В атмосфере находится около 12 тысяч кубических километров воды. С поверхности океана испаряется ежегодно 411 тысяч кубических километров воды, с поверхности всего земного шара — более 511 тысяч кубических километров. На суше в виде осадков ежегодно выпадает примерно 100 тысяч кубических километров воды.

Большое количество воды содержится в мантии Земли — по весу в тысячу раз больше, чем в гидросфере. Отсюда она поступает на поверхность во время вулканических извержений и в форме ювенильных источников. Полагают, что в течение геологического времени на земную поверхность из недр Земли поступило не менее 3,4 миллиарда кубических километров воды. Этим и объясняется образование больших масс воды на Земле.

В. И. Вернадский предполагал, что объем воды в гидросфере не изменялся со времени ее образования. Однако новейшие гипотезы утверждают, что происходят периодические изменения объема вод гидросферы в зависимости от тектонического развития земной коры и характера порообразования. Особенно большие выбросы воды на поверхность падают на эпохи активного развития вулканической деятельности.

В природе вода совершает непрерывный круговорот. Ее пары поднимаются в верхние слои атмосферы, где конденсируются в мельчайшие капельки, образующие облака; из них она выпадает дождем и снегом на поверхность Земли и частью снова испаряется, частью стекает в водоемы и просачивается в почву и в земную кору, образуя поверхностные и подземные воды. В своем пути вглубь вода растворяет и выщелачивает горные породы. С ее деятельностью связано образование воронок, пустот в горных породах, изменение состава месторождений полезных ископаемых.

Главная масса подземных вод сосредоточена в порах и пустотах рыхлых осадочных пород. Вода, содержащаяся в почве, — одно из обязательных условий почвенного плодородия. При участии воды в почвах происходит распределение макро- и микроэлементов. Она играет огромную роль в жизни всякого живого организма.

В земной коре вода находится в различных агрегатных состояниях: жидком, твердом и газообразном. Она входит в состав многих минералов и горных пород, где в ряде случаев может сохраняться даже при температуре до 500 градусов.

В. И. Вернадский один из первых обратил внимание на геохимическое значение перехода воды, содержащейся в минералах и горных породах, из одного физического состояния в другое. Он полагал, что существует подвижное равновесие между природными водами, твердыми телами, газами и живым веществом. В зависимости от взаимодействия этих факторов каждая разновидность природных вод характеризуется определенными химическими свойствами, количеством и составом газов.

Особенно велика роль воды в образовании осадочных пород и в органической жизни. Это основная составная часть коллоидно-дисперсных систем, в которых она преобладает над твердой частью.

Мигрируя в земной коре, вода разрушает, размывает, переносит и откладывает горные породы, разъедает многие металлы, образует с химическими элементами различные соединения — основания, кислоты, гидраты, кристаллогидраты.

Многие вещества вступают с водой в реакцию гидролиза, которая представляет важнейший геохимический процесс в земной коре. Гидролизу подвергаются вещества различного химического состава: соли, сложные эфиры, белки.

Природные воды по своему химизму делятся на кислородные, углекислые, азотные, метановые, сероводородные и другие. Воды с минерализацией от 0,1 до 5 процентов называются минеральными, с меньшей минерализацией — пресными, с большей — солеными. По преобладанию в составе природных вод тех или иных солей их разделяют на гидрокарбонатные, сульфатные и хлористые.

В природной воде в небольших количествах содержится тяжелая вода, в молекулу которой вместо обыкновенного водорода входит его изотоп — «тяжелый водород» (дейтерий). По биогеохимическому действию тяжелая вода существенно отличается от обыкновенной. В небольших концентрациях она стимулирует жизнедеятельность организмов; наоборот, в больших концентрациях замедляет ее и оказывает губительное действие.

В химическом составе речных вод, по данным Ф. Кларка, первое место занимают гидрокарбонаты, составляющие больше 35 процентов. В меньших количествах содержатся в водах рек сульфаты и хлориды. Из катионов преобладает кальций (почти 20 процентов), второе место занимает натрий и третье — магний. Много переносят воды и кремнезема.

Общая минерализация рек изменяется в широких пределах, в зависимости от условий водного режима реки, состава пород ее бассейна и физико-географической зональности ландшафта. Наибольшая минерализация, обусловленная выщелачиванием легко растворимых солей, обычно бывает в реках засушливых районов, наименьшая минерализация — в областях, сложенных массивно-кристаллическими породами, трудно поддающимися выветриванию и выщелачиванию. Низкая минерализация особенно характерна для районов с большим количеством осадков, малым испарением и высоким поверхностным стоком.

На климатическую зональность грунтовых вод указывал еще в начале текущего века крупный гидролог и почвовед П. В. Отоцкий. Сейчас в этом направлении широко ведутся исследования. В европейской части СССР, по данным И. В. Гармонова, четыре зоны грунтовых вод. Первая — зона ультрапресных гидрокарбонатных грунтовых вод — совпадает с природной зоной тундры.

Здесь минерализация составляет 0,1—0,15 грамма на литр, в воде присутствует значительное количество органических веществ. Вторая — зона гидрокарбонатно-кальциевых вод — охватывает большую часть европейской территории Союза, от гундры до северных черноземов. Содержание в воде минерального вещества здесь от 0,1 до 1 грамма на литр. Зона сульфатных и хлоридных вод занимает в основном центральную и южную части природной зоны степей с черноземными и каштановыми почвами. Здесь испарение преобладает над осадками. Минерализация вод весьма разнообразная — от 1 до 8 граммов на литр — и увеличивается с севера на юг. В водах господствуют карбонаты и сульфаты кальция. В южной и юго-восточной части зоны преобладают хлоридно-сульфатные воды, переходящие в хлоридные воды четвертой зоны, охватывающей Прикаспийскую низменность, южную часть Причерноморской низменности и северную часть Крымского полуострова. Степень минерализации хлоридных вод здесь 10 граммов на литр и выше.

Таким образом, с севера на юг состав поверхностных вод изменяется от кислого в тундре к нейтральному или слабощелочному в степной зоне и сильно щелочному, засоленному хлоридно-сульфатными солями, в засушливой зоне.

Миграция минеральных соединений с текучими водами рек происходит по-разному, в зависимости от степени растворимости этих соединений.

Легкорастворимые соли (NaCl , KCl , MgSO_4 , MgCl_2 , CaSO_4 , CaCl_2) дают только истинные и ионные растворы и мигрируют на большие расстояния. Карбонаты щелочных и щелочноземельных металлов (CaCO_3 , MgCO_3 , Na_2CO_3), алюминий и кремнезем также мигрируют главным образом в растворенном виде, но при активном размыве территории некоторая часть их выносится во взвешенном состоянии.

Соединения железа, марганца, фосфора и некоторых других, реже встречающихся элементов (V , Cr , Ni , Co , Cu) из-за малой растворимости представлены в растворах в небольших количествах. Они мигрируют преимущественно в форме коллоидов и в механически взвешенном состоянии. Некоторые из них, например ванадий, мигрируют только в виде взвеси, не давая растворов, уловимых современными методами. Ничтожна растворимость в воде кварца и разнообразных силикатных и алюмосиликатных минералов, которые также переносятся главным образом в виде взвеси и более грубозернистого материала.

Ряд элементов переносится чаще всего адсорбированными с коллоидными и минеральными частицами, а также в виде примесей в составе кристаллической решетки минералов.

Формы переноса элементов определяются также рельефом местности и интенсивностью размыва. Роль механического переноса значительно возрастает в горных условиях и в областях с тектонической активностью.

Эти закономерности миграции различных химических компонентов в речном стоке позволяют лучше понять условия осадкообразования и их геохимическую природу.

Режим и химический состав грунтовых вод также теснейшим образом связан с ландшафтными условиями местности. Средняя глубина зеркала грунтовых вод постепенно увеличивается с севера на юг; в зоне тундры она совпадает с земной поверхностью, в лесной зоне колеблется в пределах 6—15 метров, в степной и пустынной зонах составляет 15—20 метров и больше.

Миграция химических элементов в грунтовых водах происходит в различных направлениях. В областях с увлажненным климатом, где поступление атмосферной влаги в ландшафт преобладает над испарением, основную роль в миграции играет вертикальное перемещение воды от поверхности в нижележащие горизонты, вызывающее характерное выщелачивание горных пород и вынос химических элементов. Наоборот, там, где испарение господствует над поступлением воды в почву, преобладает перемещение грунтовых вод капиллярным путем снизу вверх к поверхности земли, и кора выветривания обогащается различными хлоридно-сульфатными соединениями. При этом активно мигрируют энергично и легко выносимые элементы — хлор, бром, йод, натрий и другие. Они оказывают определенное воздействие на продукты выветривания, почвы, местные воды и растительный покров. Таким именно путем и образуются в пустынях и полупустынях засоленные хлоридами и сульфатами почвы и продукты коры выветривания.

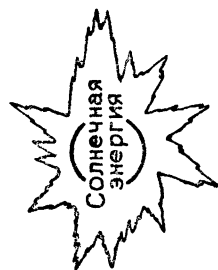
Геохимические процессы миграции, рассеяния и концентрации элементов в глубинных водах значительно отличаются от подобных процессов, связанных с грунтовыми водами. Эти воды залегают глубоко от поверхности, в водоносных пластах между водонепроницаемыми горными породами, и для них характерен преимущественно замедленный водообмен.

Химический состав глубинных вод обычно отражает гидрогеохимические условия, существовавшие в области их образования в момент захоронения. Их состав формируется в ходе просачивания поверхностных вод, связанного с процессами растворения пород, катагенеза, метаморфизма и радиоактивного распада. Многие свойства глубинных вод определялись в процессе отложения осадков или кристаллизации магмы.

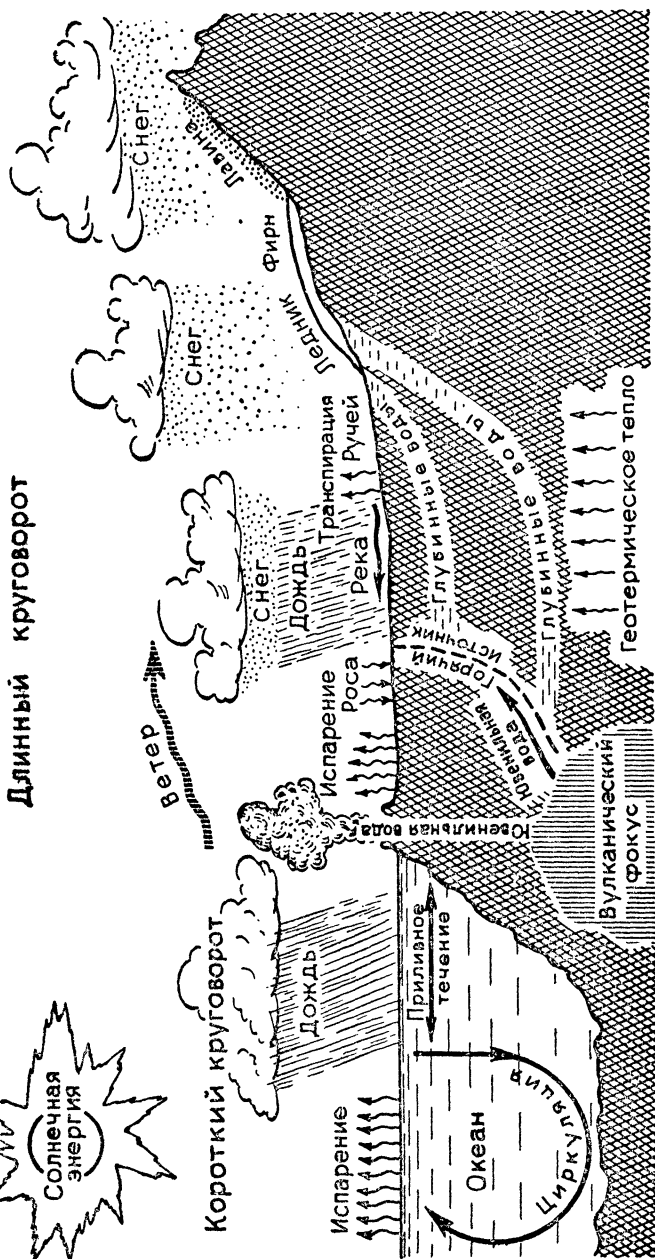
Часто глубинные воды находятся под напором и при вскрытии изливаются на поверхность или фонтанируют.

В артезианских бассейнах платформенных областей наблюдается вертикальная гидрогеохимическая зональность подземных вод: с глубиной залегания увеличивается их общая минерализация и изменяется химический состав от пресных гидрокарбонатных вод до хлоридно-натриево-кальциевых рассолов почти предельного насыщения.

Подземные минеральные воды часто оказываются нагретыми.



Длинный круговорот



Круговорот воды в природе.

Воды с температурой 20—30 градусов называют теплыми, субтермальными, от 37 до 42 градусов — горячими, термальными, выше 42 градусов — очень горячими, гипотермальными. Горячие фонтанирующие источники, развитые в районах современного вулканизма, принято называть гейзерами (от района Гейзер в Исландии, где они были открыты). Выходы гейзерных вод на поверхность встречаются в Исландии, в Йеллоустонском парке (США), в Новой Зеландии, Италии. В СССР они известны на Камчатке, на Кавказе и в других районах.

Иногда гейзерные воды используются в народном хозяйстве. В Исландии ими отапливают города. Столица Исландии — Рейкьявик получает гейзерную воду с температурой 87 градусов по трубам длиной в 16 километров. В Италии эксплуатация природных горячих паров и газов позволяет получать электроэнергию, добывать борную кислоту, хлористый аммоний и другие продукты. Природный пар с температурой от 140 до 296 градусов здесь получают из скважин, пробуренных на глубину 300 метров.

В СССР (на Камчатке) сооружены теплицы, обогреваемые гейзерными водами, построен санаторий, который ими отапливается. Начато строительство геотермической станции в районе Паужетских горячих ключей. В перспективе предусматривается теплофикация Петропавловско-Камчатского района от гейзеров, расположенных вблизи крупных действующих вулканов.

Скопления подземных вод часто сопутствуют промышленным скоплениям нефти. Глубинные воды нефтяных месторождений, независимо от геологического возраста и литологического состава окружающих пород, принадлежат в основном к двум типам — хлоркальциевому и гидрокарбонатно-натриевому. Характерная особенность их — отсутствие или незначительное содержание сульфатов, повышенное содержание сероводорода, аммония, йода, радия и некоторых других микроэлементов. Содержание брома в нефтяных водах иногда достигает 500 миллиграммов на литр, йода — превышает 50 миллиграммов на литр. Появление этих веществ в водах связывают в основном с процессами разложения некоторых компонентов нефтей, протекающими в определенной геологической и геохимической обстановке.

Газовая фаза нефтяных залежей представлена тяжелыми углеводородами — этаном, пропаном, бутаном. Мигрируя к поверхности Земли, нефтяные воды вносят эти вещества в биосферу и вовлекают их в протекающие здесь геохимические и биогеохимические процессы.

Миграция глубинных вод к поверхности оказывает воздействие на химический состав смешивающихся с ними встречных вод. В результате этого на фоне обычного химического состава поверхностных, почвенных и других вод часто появляются воды с аномальным содержанием тех или иных составных частей, характерных для нефтяных вод. На этом основаны некоторые по-

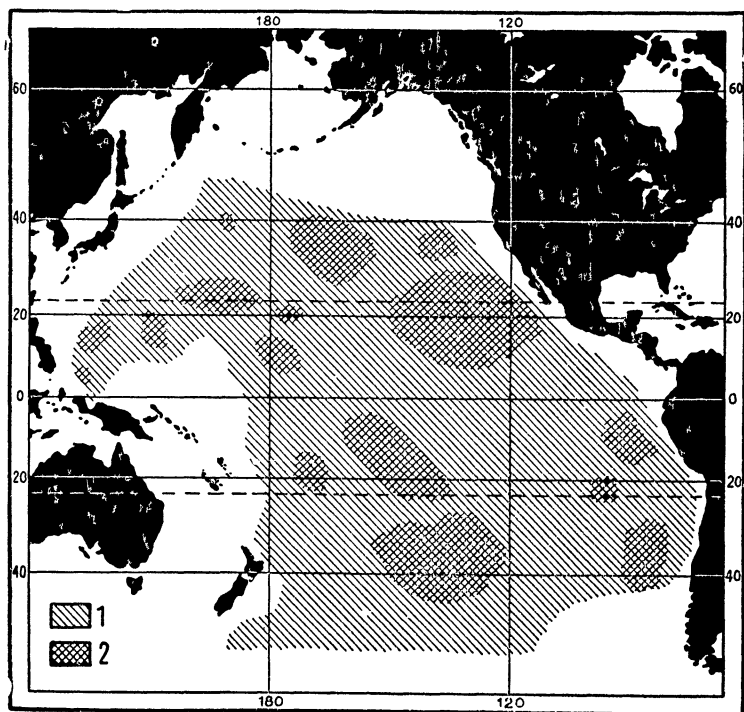
исковые признаки, указывающие на присутствие в глубинах нефти.

Гидрогеохимическое изучение земной коры и гидросферы, установление типов вод, условий их образования и миграции в земной коре, форм переноса и накопления земного вещества представляют большой научный и практический интерес.

Геохимические богатства Мирового океана

Для вод Мирового океана характерны специфические геохимические особенности — состав, соленость, плотность. Морская вода плотнее, чем пресная. Плотность ее зависит одновременно от солености и температуры. С повышением солености и понижением температуры плотность увеличивается, с увеличением температуры и понижением солености — уменьшается.

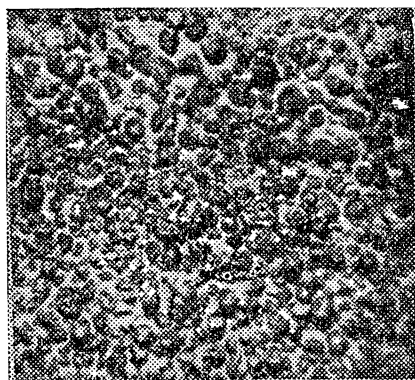
Воды океанов — это всемирная кладовая минеральных и органических ресурсов, колоссальное хранилище солнечной энергии и тепловой энергии Земли, регулятор климатических изменений, главный источник воды на нашей планете.



Карта распространения железо-марганцевых конкреций на дне Тихого океана: 1 — область распространения конкреций; 2 — зоны их высоких концентраций

По подсчетам Х. Свердруп, тонна морской воды содержит около 19 граммов хлора, 10,5 грамма натрия, 1,3 грамма магния. Даже такие малораспространенные элементы, как рубидий или литий, содержатся в тонне воды в количествах порядка долей грамма.

Около 300 тысяч видов живых организмов обитает в прибрежных водах и на дне самых глубоких океанических впадин. Они принимают активное участие в геохимическом круговороте вещества на Земле. В частности, в огромных количествах извлекаются из воды кремний и кальций, из которых морские организмы строят свои раковины и скелеты. Водоросли ежегодно связывают миллионы тонн углерода и выделяют миллионы тонн кислорода. Они извлекают из морской воды значительные количества йода.



Конкреции на дне Тихого океана (24°01' с. ш., 163°02' в. д.). Фото сделано Н. Л. Зенкевичем с помощью сконструированной им автоматической аппаратуры, опущенной на глубину 5573 метра.

Человек издавна добывает из моря большое количество различных живых организмов. Мировое потребление белка, получаемого из моря для питания людей, животных и для других целей, составляет до 30—40 миллионов тонн в год и все время увеличивается. Совершенствуются способы добычи рыбных и других богатств не только в прибрежных, неглубоких зонах, но и на значительных морских глубинах.

В некоторых странах Востока в пищу используют многие виды водорослей. Их перерабатывают также в различные вещества, например в альгин, который применяется в парфюмерной и текстильной промышленности, при изготовлении бумаги, чернил, лекарств, а также в кондитерском производстве.

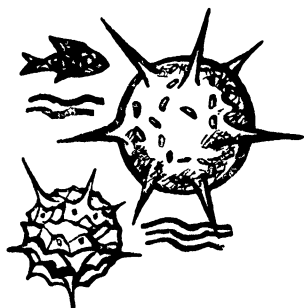
Морские организмы содержат кальций, кремний, фосфор и нередко многие рассеянные элементы. Значительная часть добываемого сейчас йода берется из морских водорослей. Возможно, что в будущем человеку удастся искусственно воздействовать на природу морских организмов и в несколько раз усилить их способность накапливать ценные элементы.

Море дает нам сырье для промышленности — соли магния, натрия, калия, йода, брома. В морской воде в различных количествах обнаружены железо, золото, медь, никель, кобальт, марганец. В лабораториях проводятся исследовательские работы, цель которых — разработать методы извлечения химических элементов из морской воды.

Недавно было установлено, что на огромном пространстве океанского дна скрываются богатые скопления железо-марганцевых конкреций. Подсчитано, что на дне Атлантического океана находится примерно 45 миллиардов тонн таких конкреций, на дне Индийского — 41 и Тихого — 112 миллиардов тонн. В среднем конкреции содержат 20 процентов марганца, 15 процентов железа и 0,5 процента никеля, кобальта и меди. Кроме того, в них много ценных рассеянных элементов. В частности, таллия они содержат в 50—1000 раз больше, чем осадочные породы. Разработка залежей этих конкреций — сложная, но в будущем вполне осуществимая инженерная задача.

Человек довольно широко использует запасы нефти, расположенные на материках и под неглубокими водами материковых отмелей. В будущем в поисках нефти будут все больше обращаться к морским глубинам. Под дном морей, по ориентировочным подсчетам, хранится около 40 миллиардов тонн нефти.

Заглядывая в будущее, можно представить себе, как человек, используя достижения науки и техники, будет целенаправленно покорять природу, преобразовывать ландшафты земной поверхности, создавать искусственный климат, покорять стихию воздушных и водных масс океана и его дна.



ГЕОХИМИЯ ЖИВОГО

Биогеохимическая жизнь земной коры

Биогеохимия — раздел геохимии, созданный В. И. Вернадским. Главная задача биогеохимии — изучение живого вещества, то есть совокупности живых организмов, в их миграции и биогеологическом круговороте химических элементов в биосфере, а также разработка биогеохимических методов поисков месторождений полезных ископаемых.

Живое вещество, покрывающее почти сплошной пеленой поверхность земного шара, — это постоянно действующий механизм преобразования энергии солнечных лучей в потенциальную, а затем и в кинетическую энергию геохимических процессов; оно охватывает и перестраивает все химические процессы биосферы.

В настоящее время установлено, что живым организмам обязаны своим происхождением не только нефть, уголь, торф, сапропель, битумы, гумус, нитраты, главная масса фосфора и карбонатов. С деятельностью организмов связывается состав речных, озерных и морских вод, накопление солей в море и на суше, образование руд и многих других продуктов литосферы, атмосферы и гидросферы. Исключительно велико участие организмов в образовании кислот и других соединений, разрушающих породы, в рассеянии редких химических элементов. В. И. Вернадский считал, что биогенное происхождение имеет вся атмосфера Земли.

Учение о биогеохимической роли организмов в земной коре и биосфере помогает объяснять образование почв и ландшафтов, распределение химических элементов в биосфере. Геохимию биосферы, коры выветривания, почвенного покрова и ландшафтов невозможно понять без учета и оценки роли живых организмов и их биогеохимической деятельности.

В нашу эпоху живые организмы завоевали верхнюю часть земной коры, нижние слои атмосферы и всю гидросферу, включая ее глубоководные впадины. Интересно отметить, что отдельные организмы не боятся очень суровых условий внешней среды, например выносят очень низкие и очень высокие температу-

ры. Некоторые бактерии и их споры выживают при охлаждении до минус 250 градусов в течение 20 часов, а при охлаждении до минус 200 градусов — в течение многих месяцев; споры грибов выдерживают температуру 180 градусов. В термальных источниках около вулканов Камчатки бактерии живут при температуре 85 градусов, а при 82 градусах к ним присоединяются и простейшие водоросли.

Общая масса живого вещества на Земле составляет около $36 \cdot 10^{10}$ тонн, из которых $20 \cdot 10^{10}$ тонн распространено в океанах и $16 \cdot 10^{10}$ тонн — на суше. В ходе фотосинтеза растения ежегодно усваивают из воздуха $16 \cdot 10^{10}$ тонн углерода, в том числе морские растения — $14 \cdot 10^{10}$ тонн и наземные растения — $2 \cdot 10^{10}$ тонн. Живое вещество ежегодно использует для своего образования $59 \cdot 10^{10}$ тонн углекислоты, $70 \cdot 10^{10}$ тонн воды и освобождает $43 \cdot 10^{10}$ тонн кислорода. Ежегодно окисляется около $37 \cdot 10^{10}$ тонн органического вещества.

Хотя общая масса органического вещества составляет весьма небольшую часть веса земной коры, нужно учитывать, что живое вещество постоянно обновляется. Поэтому его значение в образовании биосферы и органических осадков земной коры очень велико. В частности, огромна роль микроорганизмов — бактерий, грибов, низших водорослей, имеющих большую скорость размножения. В благоприятных условиях деление клеток у микроорганизмов происходит каждые 15—30 минут.

Главную массу живого вещества составляют те химические элементы и соединения, которые легко образуют газы и пары атмосферы, — кислород, вода, углекислота, азот, или водорастворимые соединения главных ионов гидросферы (H , OH , HCO_2 , NO_3 , Cl , SO_4 , PO_4) и катионов литосферы (Na , K , Ca , Mg).

Некоторые из элементов, как, например, углерод, азот, кислород, водород, серу, калий, фосфор, железо, раньше называли биогенными элементами. Теперь к числу элементов, участвующих в биогеохимических процессах, можно отнести и многие другие: йод, марганец, цинк, медь и пр. В составе организмов обнаружены также многие редкие и рассеянные элементы.

Более 90 процентов общего веса элементов, встречающихся в организмах, относится к циклическим, то есть участвующим в биогенном круговороте вещества. Особенно велика роль кислорода, углерода, азота, водорода, серы, фосфора, калия, кальция, железа. Углерод и азот входят в состав белка; кальций, магний, кремний, фосфор, фтор принимают участие в образовании скелетов и твердых составных частей организмов; натрий, калий, кальций, магний, хлор, углерод, фосфор действуют как электролиты и регуляторы при формировании клеток; железо, медь, марганец, цинк, йод, сера выполняют функции катализаторов при окислительно-восстановительных процессах; железо и магний входят также в состав хлорофилла и гемоглобина.

Геохимическая роль организмов в разные периоды истории

Земли изменялась в зависимости от развития жизни и ее эволюции. В течение первого миллиарда лет со времени зарождения жизни на Земле здесь господствовали синезеленые водоросли. Их деятельностью и определялось воздействие живых организмов на природу и миграцию химических элементов в биосфере. Накопление органического вещества в земной коре в этот период не отличалось большой интенсивностью. Миграция элементов совершалась преимущественно в восстановительной среде, при большом влиянии углекислоты и незначительном участии органических кислот. Подавляющая масса осадочных пород откладывалась главным образом как химические и механические осадки.

Следующим важным этапом в развитии органического мира было появление зеленых растений, способных в результате фотосинтеза высвобождать кислород из воды и углекислоты. Осадочные процессы породообразования стали протекать при участии органического вещества, появляется все больше органогенных пород, увеличивается их разнообразие в химическом отношении.

К началу палеозоя (570 миллионов лет назад) органический мир стал более разнообразным. В отдельные эпохи и периоды (особенно после девонского времени, закончившегося 320 миллионов лет назад) накапливались огромные массы органического вещества — уголь, нефть, торф и многие другие химикоорганогенные отложения в земной коре.

Геохимическое изучение горных пород, условий их залегания, сохранившегося в них органического вещества позволяет науке шаг за шагом восстанавливать палеогеохимические условия развития жизни на Земле и главные этапы изменения их во времени.

Судьбы органических веществ

Сезон за сезоном, поколение за поколением организмы размножаются и умирают. Вещество, их образовывавшее, подвергается биогеохимическим процессам и образует отложения различных органических и органо-минеральных соединений.

Из химических соединений растительных остатков наиболее быстро окисляются и разлагаются белковые вещества, аминокислоты и амиды кислот, амины сахара, крахмал, органические кислоты и вообще все те соединения, которые представляют наиболее доступную пищу и среду для микроорганизмов. Труднее разлагаются клетчатка и жиры, еще труднее — лигнин, пробковые вещества, которыми богаты растительные остатки, и особенно трудно — дубильные вещества, смолы и воск. Разложение органического вещества может привести к изменению биогеохимической среды, причем образуются различные вещества, которые, в свою очередь, могут реагировать с соседними минералами и давать разнообразные вторичные образования.

С продуктами разложения организмов и особенно с подвижными их соединениями в биосфере связано возникновение разнообразных железорудных образований в почвах, торфах и иловых отложениях (болотная, озерная, луговая или дерновая руды).

Органическое вещество в больших количествах мигрирует в растворах и рассеивается в горных породах земной коры. По подсчетам ряда авторов, в рассеянном состоянии в земной коре находится значительно большее количество органического вещества, чем его сконцентрировано в органогенных породах.

Ежегодно на гектар поверхности Земли поступает от 3 до 5 тонн органического вещества. Вещество это подвергается разложению, которое протекает различно в зависимости от температуры, степени увлажнения, химических свойств среды, а также характера поступления к разлагающемуся материалу влаги и воздуха.

Недостаточная влажность, как и избыток влаги, замедляет разложение. Кислотность среды, по опытам многих исследователей, действует угнетающе на процессы разложения главным образом потому, что такая среда губительна для бактериального населения. Щелочная среда, наоборот, способствует разложению.

Скорость разложения органического вещества возрастает с увеличением доступа кислорода. Недостаток кислорода, поступающего к разлагающемуся материалу, не только сказывается на понижении скорости разложения, но и отражается на самом характере процесса. Принято различать процесс тления — разложения при доступе воздуха и процесс гниения — разложения в анаэробных условиях. Процесс тления имеет окислительный характер, и распад органического вещества при достаточном доступе воздуха может идти безостановочно, вплоть до таких продуктов, как вода, углекислый газ, соли азотной, серной, фосфорной и других кислот. При этом минеральное вещество, входящее в состав зольных элементов разлагающихся остатков, освобождается. Происходит то, что мы называем минерализацией органических остатков.

При гниении образуется ряд неокисленных соединений — метан, сероводород, аммиак и многообразные органические кислоты.

Все минералы и горные породы, образовавшиеся в результате жизнедеятельности организмов, называют биолитами. Их принято делить на акаустобиолиты — негорючие вещества и каустобиолиты — горючие. К сожалению, пока еще нет общепринятого мнения, какие породы относить к той или другой группе. И. М. Губкин разделил каустобиолиты на две группы: угольный и битумный ряды. К первому относятся торф, бурые угли, каменные угли, антрацит; ко второму — углеводородные газы, нефть, озокерит, асфальты, асфальтиты.

Каустобиолиты угольного и битумного рядов претерпевают дальнейшие процессы преобразования. При образовании углей растительные остатки — основа угольного ряда — подвергаются гумификации — превращению в гумус и обугливаю и переходят в бурые и каменные угли (конечная стадия — графит). Эти процессы сопровождаются изменением химического состава, увеличивается относительное содержание углерода и уменьшается количество кислорода, водорода и азота. На торфяной стадии большое значение в преобразовании органического вещества имеют биогеохимические процессы, на угольных стадиях — физико-химические процессы.

Исходный материал для образования битумов — планктонные организмы, различные водоросли и другие растительные вещества и органические остатки животного происхождения. Все они в процессе анаэробного разложения превращаются в твердые, газообразные или жидкие углеводороды, из которых в определенных условиях формируются месторождения горючих газов, нефти, озокерита — горного воска, асфальта, асфальтита. За исключением нефти и газа все эти продукты представляют собой твердые углеводородные вещества разнообразного химического состава. Большая часть битумного вещества представлена в земной коре не в виде месторождений нефти и газа, а в рассеянном состоянии: битумы размещаются в породах или адсорбируются ими. Горные породы, богатые битумами, известны под названием битуминозных сланцев.

Битумы — это сложные смеси углеводородов, в основе которых лежат различные сочетания таких биогенных элементов, как углерод, водород, кислород, азот, сера. Битумы содержат масла, смолы и другие сложные органические вещества. Наибольшим содержанием масел характеризуются нефти.

Из битумов лучше всего изучены нефтяные газы и нефти. Другие битумы изучены пока недостаточно.

Основную массу нефти составляют углеводороды. В ее состав входят также кислородные, сернистые, азотные органические соединения, высокомолекулярные смолистые соединения, содержащие кислород и серу. На поверхности Земли нефть легко окисляется, теряет легкие фракции (метановые или парафиновые масла) и затвердевает, образуя киров или пропитанные ими породы. При этом часто возникают скопления асфальтов. В СССР на Апшеронском полуострове встречаются крупные асфальтовые озера.

В более глубоких местах земной коры, за пределами зоны окисления, протекают процессы, ведущие к увеличению содержания в нефти легких компонентов — метановых и парафиновых фракций. В ходе этих процессов происходит перестройка молекул органических соединений, перераспределение в них водорода и потеря углекислоты и сероводорода.

Биогеохимические провинции

В настоящее время в геохимии прочно установилось понятие «биогеохимическая провинция». Такие провинции академик А. П. Виноградов определяет как области земной поверхности, тесно связанные с геохимическими провинциями и отличающиеся определенным нормальным, недостаточным или избыточным уровнем концентрации какого-либо химического элемента, с которым непосредственно сопряжены биогеохимические условия развития живых организмов. Поэтому такие элементы и стали главным объектом изучения при выделении биогеохимических провинций.

Живое вещество захватывает в свои ткани до 70 элементов, входящих в состав земной коры, в том числе большое количество редких и рассеянных элементов. В растениях содержится значительно больше водорода, кислорода, углерода, фосфора и других элементов, чем в земной коре и литосфере. В составе животных организмов гораздо больше натрия, кальция, фосфора, азота, серы, фтора, хлора и, наоборот, меньше кислорода, кремния, алюминия, марганца, брома, бора, свинца, мышьяка, чем в растениях.

Известны организмы, концентрирующие литий, бериллий, фтор, алюминий, кремний, фосфор, магний, серу, хлор, калий, кальций, ванадий, марганец, железо, кобальт, медь, цинк, мышьяк и некоторые другие элементы.

А. П. Виноградов указывает на два типа концентрации химических элементов организмами: массовое повышенное содержание химического элемента в определенной среде, например в районах вулканизма, и специфическая концентрация того или иного химического элемента данным видом или родом организмов вне зависимости от среды.

Концентрация химических элементов организмами прежде всего связана с их физиологическими потребностями, особенностями образования скелетов, белков, жиров, клетчатки. В одних случаях вся растительность той или иной провинции характеризуется повышенным содержанием одного или нескольких элементов (особенно в местах выходов на поверхность рудных месторождений, в районах вулканизма). В других случаях отдельные виды и роды растительности накапливают один или несколько элементов.

Отдельные химические элементы концентрируются в растительности в микродозах, которые, однако, с исключительной силой стимулируют рост и развитие растений. Это — микроэлементы.

Об избытке или недостатке в почве определенных элементов — никеля, меди, марганца, цинка — обычно свидетельствует внешний вид ветвей, листьев растений, нередко — их измененные, уродливые формы.

Прямыми показателями недостатка отдельных химических элементов в почве и растительности служат эндемические заболевания растений и животных. К ним относятся, например, зубная болезнь, связанная с недостатком йода, кариес зубов, вызываемый недостатком фтора, и др. Недостаток меди вызывает полегание овса, а избыток никеля — отсутствие у цветов лепестков.

В последнее время все больше выясняется роль микроорганизмов как индикаторов концентрации химических элементов. Установлено, например, что азотобактер, гептано-окисляющие бактерии, грибок аскергия явно реагируют на присутствие в окружающей среде молибдена, вольфрама, цинка, марганца, свинца и меди. В Забайкалье, Казахстане, на Урале наблюдалось усиленное развитие бактерий, связанное с ореолами рассеяния в горных породах молибдена и цинка и, наоборот, замедленное их развитие вследствие угнетающего влияния меди.

Содержание в золе растений меди, германия, кобальта, никеля, свинца и других элементов часто бывает значительно выше, чем в почве. Это особенно характерно для рудных районов, а также тогда, когда корневая система связана с грунтовыми водами, богатыми теми или иными элементами.

В проблеме биогеохимических провинций наиболее интересно и важно изучение того, как почвы удерживают микроэлементы, как последние избирательно поглощаются растениями и каково их биологическое значение.

Микроэлементами принято называть химические элементы, содержащиеся в почвах, растительных и животных организмах, природных водах в незначительных количествах (чаще всего менее 0,001 процента). К ним относятся медь, цинк, марганец, молибден, кобальт, хром, йод, бром, бор, золото, серебро, рубидий, радий, уран и другие элементы. Микроэлементы, находящиеся в природных телах в количествах менее 0,00001 процента, именуются ультрамикроэлементами.

Микроэлементы играют чрезвычайно большую роль в росте и развитии живых организмов. В последнее время их изучение получило широкий размах как в Советском Союзе, так и за рубежом.

В процессе своего роста и развития организмы извлекают из внешней среды нужные им химические вещества. Используемые при этом микроэлементы активизируют биохимические процессы, оказывают воздействие на рост организма, на внутриклеточный обмен, синтез белков и углеводов. Микроэлементы — важнейшая часть ферментов, гормонов, витаминов и других необходимых для жизни веществ.

Например, бор, марганец, цинк и медь содействуют лучшему использованию света в ходе фотосинтеза, влияют на углеводный обмен, усиливают окислительные процессы, участвуют в синтезе белков, повышают гидрофильность протоплазматических коллоидов,

способствуя удержанию растениями свободной и связанной воды. Молибден, ванадий, марганец и осмий принимают участие в специфических реакциях фиксации азота различными видами азотобактерий. Марганец, кремний, кобальт, бор, литий, медь активизируют обмен веществ в растениях, повышают их устойчивость к заболеваниям.

Определенные микроэлементы играют роль «инициаторов», зачинателей и регуляторов ценных биохимических реакций. Микроэлементы активизируют биохимические процессы в корневой системе и при образовании гумуса, положительно влияя тем самым на почвообразование.

При недостатке некоторых микроэлементов в питательной среде возникают характерные заболевания, например гниль сердечка свеклы при недостатке бора.

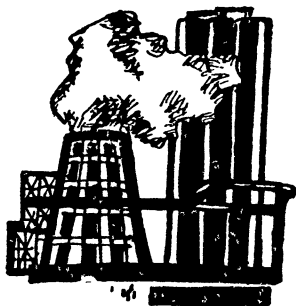
Избыток ряда микроэлементов также влечет за собой заболевания. Например, при избытке в пище молибдена крупный рогатый скот страдает энзоотическим поносом; избыток селена вызывает развитие у животных так называемой щелочной болезни, избыток свинца — нервные заболевания, меди — болезни печени, никеля — болезни глаз.

Изучив микроэлементы биогеохимических провинций, можно наиболее рационально влиять на физико-химические свойства почв и развитие растений, повышать плодородие земель, добиваться высоких и устойчивых урожаев, роста продуктивности животноводства, предотвращать заболевания человека, растений и животных.

Очень важно выяснить оптимальное содержание химических элементов в ландшафтах, при котором наилучшим образом удовлетворялись бы потребности живых организмов. Большую практическую пользу приносит изучение агротехнических приемов, которые позволили бы ускорять или замедлять биогеохимический круговорот, внося в почву те или иные элементы.

Успехи биогеохимии позволяют подвести научную основу под применение удобрений, содержащих микроэлементы, жизненно важные для сельскохозяйственных животных и растений: кобальт, никель, медь, бор.

ЧЕЛОВЕК СОЗДАЕТ НОВУЮ ГЕОХИМИЮ



Человечество — геохимический фактор

Поверхность Земли — главная арена хозяйственной деятельности человека. Он преобразует природу, воздействует на геологические и геохимические процессы, вносит поправки в законы образования пород и минералов, в миграцию и распределение химических элементов в земной коре и окружающих ее геосферах. В результате деятельности человека усиливается роль одних факторов в образовании вещественного состава биосферы и ее горных пород, почв и ландшафтов и ослабляется роль других. При этом воздействие человека на природные процессы усиливается по мере развития производительных сил общества и машинных способов производства, использования все новых природных сил и источников энергии и материалов. Сейчас роль человека во многих процессах превосходит роль некоторых естественных геологических и биологических факторов.

Еще в глубокой древности в засушливых и жарких странах Ближнего и Среднего Востока, Средней Азии, Китае возникло орошаемое земледелие. По ориентировочным данным, площадь орошаемых земель составляет сейчас 100—115 миллионов гектаров.

В Советском Союзе орошены значительные территории Средней Азии и Казахстана, Кавказа, Украины и Поволжья. Орошаемые земли заняты ценными культурами, имеющими большое народнохозяйственное значение.

При орошении в почву вносятся новые растворенные и взвешенные вещества, создаются более благоприятные условия для микробиологических процессов, в частности для нитрификации, улучшаются физические и химические свойства почв и пищевой режим растений. В этом заключается большое геохимическое и биогеохимическое значение орошения.

Также с давних времен на болотах, заливаемых поймах рек и озер, морских и приозерных низменностях и равнинах, не имеющих естественных стоков, проводятся осушительные работы. Всего на земной поверхности осушено более 50 миллионов

гектаров земли. Особенно широко осушение проводится в Советском Союзе.

При осушении заболоченных территорий ускоряется разложение органического вещества, которое минерализуется, и элементы его переходят в доступную для питания растений форму. В почве создаются новый тепловой режим и микроклимат, изменяется ранее сложившийся круговорот воды, а следовательно, и роль атмосферных и гидросферных факторов в биогеохимических процессах.

Современная эпоха характеризуется созданием крупных искусственных озер и морей — водохранилищ. С момента образования этих искусственных водоемов отложение осадков и развитие органического мира в них происходит в водных условиях. Не остается без влияния созданных водоемов и окружающая местность, где может произойти некоторое изменение климата — увеличивается влажность, смягчаются годовые колебания температуры, усложняется местная циркуляция воздуха. Все это формирует новые геохимические условия в окружающем ландшафте.

Важнейшие геохимические проблемы возникают и в связи с обработкой почвы и ее удобрением. В течение многих тысяч лет обширные массивы лесов вырубались и превращаются в луга или пашни и вместо естественной растительности возделываются культурные растения.

При обработке почв перераспределяются верхние слои и частицы почвенного покрова, создаются новая структура и физические свойства почвы, благоприятствующие жизнедеятельности растений; усиливаются микробиологические процессы, требующие доступа воздуха; более интенсивно идет минерализация органических остатков и накопление питательных веществ в форме, доступной для сельскохозяйственных растений.

Внесение органических и минеральных удобрений изменяет реакцию почвы, влияет на доступность для растений элементов почвенного питания и на деятельность полезной почвенной микрофауны и микрофлоры. При внесении удобрений почва обогащается теми или иными макро- и микроэлементами (азотом, фосфором, кальцием, калием, медью, бором, марганцем, молибденом, цинком, кобальтом и др.).

Трудно переоценить геохимическое значение всех этих мероприятий по обработке и возделыванию почв. Они стимулируют биологический и геологический круговорот вещества в биосфере и земной коре; изменяют химический, физический, биогеохимический режим почво-грунтов; формируют состав катионов, анионов и кислотность почвы; оказывают влияние на процессы, связанные с минерализацией и накоплением органического вещества.

Добывая и используя минералы, человек нарушает природные сочетания элементов и создает новые условия для химической миграции и накопления их. В результате развития промыш-

ленности и использования различных минералов и металлов, природные концентрации руд уже сейчас разрушаются быстрее, чем идет их образование в новейший период истории развития земной коры. В сферу действия человека попадают горные породы, не только залегающие в самых верхних горизонтах земной коры, но и расположенные на глубинах 5 километров и более. Истощение богатых рудных ресурсов заставляет разрабатывать все более бедные руды, а это означает, что в геохимические процессы на поверхности вовлекаются все большие массы горных пород и минералов, в том числе не выходящие на земную поверхность.

Сжигая нефть, уголь, торф, человек выбрасывает в воздух ежегодно около 1,5 миллиарда тонн углерода и почти полностью возмещает убыль его из атмосферы, обуславливаемую рассеянием в мировое пространство. Это оказывает огромное влияние на климат, жизнь растений и самые разнообразные геохимические процессы, протекающие в биосфере. Круговорот вещества в биосфере ускоряется также в результате переработки известняков и других пород.

Параллельно с увеличением количества углекислоты в атмосфере происходит повышение температуры, отмеченное в разных местах земной поверхности в течение последних ста лет. За последние сто лет человек увеличил атмосферную концентрацию углекислоты на 13 процентов. Если потребление топлива будет увеличиваться с той же скоростью, как в настоящее время, то к 2000 году в воздух поступит более тысячи миллиардов тонн углекислоты. Это повлечет за собой повышение средней температуры Земли примерно на 2 градуса.

При хищническом отношении к природному ландшафту деятельность человека часто сопровождается интенсивным размывом — эрозией земной поверхности, разрушением почвы стекающей водой, развеванием рыхлых отложений. Особенно сильной эрозии подвергаются распаханые склоны возвышенностей, лишенные растительности. Смыв гумусового горизонта снижает плодородие почв и урожай сельскохозяйственных культур. В результате эрозии почвы образуются промоины, рытвины, овраги, борозды, превращающие почвы в бросовые земли. Вследствие эрозии во всем мире было из числа пахотных земель около 50 миллионов гектаров.

Борьба с эрозией должна вестись прежде всего путем регулирования стока воды, закрепления почвы древонасаждением и травосеянием, осуществления мероприятий, усиливающих водопроницаемость и сопротивляемость размыву. Широко практикуются такие меры, как террасирование, валование, создание ячеистого микрорельефа, сев подпокровных культур, ленточное земледелие (чередование узких полос рядового сева, пропашных и трав), контурная вспашка (пахота вдоль горизонталей), создание насаждений на оврагах и песках.

Хозяйственная деятельность людей вызывает также и мно-

гие другие нежелательные явления. Так, промышленные отбросы и инсектициды, используемые в земледелии, могут заражать воды и воздух. Эти явления особенно характерны для хозяйственной деятельности капиталистических государств. Например, постоянное искусственное загрязнение сделало непригодными для орошения воды Рейна, в которых содержание хлора с 1898 года увеличилось в 5 раз.

Загрязнение воды вызывается, в частности, спуском моющих синтетических средств. Образующаяся при этом пена затрудняет содержание очистных сооружений, а бактерицидное действие этих средств нарушает естественные биологические процессы, способствующие очистке. Применение инсектицидов ведет подчас к отравлению водоемов водой, просачивающейся с полей. Спуск в воду отбросов и отходов промышленности приводит также к большой потере минеральных веществ почвы, увеличивает количество заболеваний, например заражения солитером, делает реки непригодными для обитания рыб.

Нерациональное потребление грунтовой воды может привести к истощению ее запасов. В ряде случаев это вызывает необходимость больших затрат, а иногда ведет к сокращению площадей, занятых сельскохозяйственными культурами.

Конечная цель преобразования человеком природы заключается в том, чтобы найти средства наилучшего использования природных богатств, защитить себя от вредных стихийных явлений, особенно связанных с изменением погоды и климата, научиться регулировать природные процессы в желаемом направлении.

Изучая баланс и круговорот химических элементов в ландшафтах, их участие в разнообразных процессах в земной коре, потребность растений, животных и человека в химических элементах, которые наилучшим образом обеспечивали бы условия их жизни, геохимия может способствовать созданию искусственных ландшафтов, а также разработке наиболее эффективных мероприятий по использованию неограниченных ресурсов природы.

Материалы техники будущего

Геохимия раскрывает нам таинственные свойства атомов и элементов в кристаллах и минералах, учит связывать химию с природой, с химической жизнью Земли, с образованием и размещением в ней полезных ископаемых; она увлекает молодежь к новым исследованиям и исканиям, призывает к борьбе за новое понимание явлений природы и их эффективное использование на основе знаний законов распространения и сочетания атомов в различных телах природы.

Минеральные ресурсы исключительно важны для жизни современного общества. Без железа, нефти и угля нельзя себе

представить ни одной отрасли промышленного производства. Уголь, нефть и газ — источники энергии и важное химическое сырье; черные металлы — основа тяжелой индустрии; цветные и редкие металлы необходимы для изготовления разнообразных машин и приборов. Уран и торий служат топливом в ядерных реакторах. Многочисленные виды минерального сырья употребляются для производства удобрений, химических препаратов, в производстве каучука, огнеупорных и кислотоупорных изделий и материалов, в строительном деле, в писчебумажном производстве, в промышленности красителей. Ряд минералов и продуктов их химической переработки применяется в виде лекарств.

Но человечество не останавливается на достигнутом. Оно настойчиво ищет новых путей использования ресурсов Земли. Если в древности человек использовал, по данным В. И. Вернадского, 19 химических элементов, а в XVIII веке — 28, то в XIX веке — уже 50 и в начале XX века — 59 элементов. В течение последних ста лет быстрыми темпами увеличивалась добыча угля, нефти, каменных и калийных солей, горючих газов, руд железа, марганца, хрома, никеля, молибдена, меди, свинца, цинка, олова и многих редких элементов. Потребление некоторых металлов — алюминия, вольфрама, олова — возросло в сотни и тысячи раз.

Технические достижения последних 25—30 лет позволили извлекать из минералов и горных пород и получать искусственно такие элементы и соединения, которые в первой четверти XX века были совсем неизвестны (трансурановые элементы, многие радиоактивные изотопы).

Сейчас около 80 элементов добывается человеком и в той или иной форме применяется в современной технике.

Особенно большой прогресс за последние 25 лет достигнут в области производства и использования редких элементов. Многие из них (индий, галлий, таллий, рубидий, цезий, цирконий, бериллий и другие) широко применяются в составе жаропрочных сплавов и нержавеющей сталей, в деталях сложнейших машин, точнейших приборов и аппаратов. Расширилось использование этих металлов в производстве синтетических продуктов и в медицине.

Невозможно даже перечислить все области новейшей техники и технологии, где глубоко внедряются элементы, которые еще совсем недавно представляли загадку для химика и геолога. Мы укажем лишь на некоторые из них.

Вот, например, **цирконий**. Благодаря высоким противокоррозионным свойствам он употребляется в сплавах с другими металлами. Металлический цирконий используется при изготовлении радиоламп, электродов, в качестве составной части сверхтвердых сплавов, является важным конструкционным материалом в атомной технике. Из окиси циркония изготавливают тигли, облицовочный кирпич; устойчивый против воздействия химических аген-

тов, а также цементы, сопротивляющиеся высоким температурам. Чистая окись циркония используется в медицине.

Германий по своим свойствам напоминает кремний. Он используется как полупроводниковый материал. Германиевые приборы применяют для выпрямления переменного тока и для усиления радиоколечаний. Во многих областях техники они вытесняют более громоздкие и менее надежные вакуумные радиолампы. Введение окиси германия в оптическое стекло улучшает многие его свойства. Если к олову добавить 0,35 процента германия, то получившийся сплав вдвое тверже, чем чистое олово, а его тягучесть на 20 процентов выше. Такой сплав во многих случаях успешно конкурирует с чистым оловом, широко применяемым в технике. Некоторые соединения германия применяются также и в медицине.

Исключительно ценны свойства металлического **индия**. Это самый мягкий из устойчивых на воздухе металлов. Он очень пластичен и под давлением поддается почти любой деформации. Индий легко образует сплавы со многими металлами: таллием, свинцом, оловом, серебром, золотом, платиной, ртутью, висмутом и натрием. Он обладает хорошей текучестью, позволяющей получать высококачественные отливки. Промышленную ценность представляют сплавы индия, особенно с родственными металлами: свинцом, цинком, оловом, кадмием и висмутом. Такие сплавы все шире применяются как припай для соединения стекла со стеклом и с металлом. Индий обладает высокой отражательной способностью, и им покрывают зеркала прожекторов и серебряные изделия. Используется он и для придания янтарного цвета стеклу. Из соединений индия изготовляют люминесцирующие экраны. Индий входит в состав специальных подшипниковых сплавов, в частности употребляющихся в авиационных моторах.

Использование **ниобия** в производстве нержавеющей сталей привело к значительному повышению качества их при высоких температурах. Сплав ниобия и алюминия отличается кислотоустойчивостью и большой твердостью. Ниобиево-циркониевый сплав не окисляется даже при температуре белого каления. С хромом ниобий дает очень твердый и кислотоустойчивый сплав. Применяется ниобий и в качестве материала для катодов и металлических деталей мощных генераторных электронных ламп. Из карбида ниобия в комбинации с карбидом тантала или карбидом вольфрама, молибдена изготовляют твердые режущие сплавы.

Тантал по внешнему виду напоминает платину. Благодаря высокой кислотоупорности и его относят к благородным металлам. Тантал почти вдвое тяжелее стали. Это тягучий и ковкий металл, который может быть вытянут в очень тонкую проволоку. Если его накаливать до высокой температуры, он хорошо поглощает кислород, водород и азот и становится очень хрупким. Тантал в состоянии адсорбировать водород в количестве, в

740 раз больше своего объема. В производстве вакуумных трубок тантал применяют для поглощения газов. При соответствующей термической обработке тантал приобретает высокую твердость и используется в производстве режущих инструментов. При добавлении кремния твердость тантала может быть доведена почти до твердости алмаза.

В последнее время тантал нашел применение в качестве катализатора при производстве бутадиена — важнейшего сырья для изготовления синтетического каучука. Полупроводниковые свойства тантала позволяют использовать его в выпрямителях переменного тока. Сплавы тантала с никелем и молибденом кислотоупорны, а с вольфрамом отличаются исключительной твердостью. Сплав тантала с медью хорошо имитирует золото.

Цезий издавна применялся в медицине (в виде солей при некоторых язвенных заболеваниях), а также в аналитической химии, особенно в микрохимическом анализе для обнаружения ионов алюминия, висмута, олова. Цезий нашел применение и в промышленном производстве, где его значение непрерывно растет. Ценнейшим его свойством является чувствительность к свегу и способность при освещении испускать электроны. Цезиевые фотоэлементы применяются в устройствах автоматики, в телевидении, звуковом кино, в колориметрии. Существуют сурьмяноцезиевые фотоэлементы, а также фотоэлементы, изготовленные из сплавов цезия с кальцием, барием, таллием и другими металлами.

Цезий используется также для производства люминесцентных ламп и в качестве газопоглотителя.

Чудесными качествами обладает **галлий**. Он плавится при температуре всего лишь 30 градусов и успешно заменяет ртуть, пары которой, как известно, очень ядовиты. Галлиевыми термометрами можно измерять температуру от 30 до 1500 градусов, то есть до температуры размягчения кварцевого стекла. Ими измеряют температуру расплавленных металлов.

Интересен элемент **селен**, который в зависимости от освещенности резко меняет свою электропроводность. Это свойство определяет широкое применение селена в технике передачи изображений, в устройстве автоматических контролеров, регистрирующих детали на конвейере. При изготовлении лучших оптических стекол — чистых и бесцветных — в расплавленную массу добавляется селен, который входит в химические соединения с железом, извлекая его из расплава, в результате чего получается бесцветное стекло.

Без использования редких металлов трудно представить себе современную технику и промышленность, требующие высокопрочных, кислотоупорных, жаростойких, устойчивых к коррозии и в то же время легких материалов. Вместе с тем применение этих металлов определяет развитие многих новых отраслей промышленности и направлений техники, призванных совершать подлинный переворот в самых разнообразных производствах.

Перед геологами и геохимиками стоит задача выявлять новые источники сырья для получения редких элементов, развивать сырьевую базу производства этих металлов. Одновременно повышаются требования к технологическим процессам обогащения комплексных руд, содержащих редкие элементы, и получения редких металлов высокой чистоты в больших количествах.

Наряду с использованием естественных ресурсов земных недр, крупных успехов достигла наука в области производства искусственных минералов, выращивания кристаллов, создания синтетических материалов для многих отраслей производства.

Сотни минералов, в том числе неизвестные в природе, изготавливаются синтетическим путем. Исключительно большие успехи достигнуты в производстве различных синтетических продуктов из угля, нефти и газа. Широкое развитие получила петрография технологического камня, занимающаяся изучением технических каменных пород (бетона, керамики, огнеупоров, шлаков, абразивов). Искусственным путем получены алмаз, рубин, графит, кварц, кальцит, слюды (мусковит, биотит, флогопит), цеолиты, синтетические минеральные краски (зеленый малахит, синий азурит, белый рутил) и многие другие минералы.

Успешно осуществляется синтез фосфатов, обладающих яркой люминесценцией, а также синтез минералов различных других классов — силикатов, германатов, селенидов. В телевизионной технике нашли широкое применение искусственные шпинели, синтезируемые металлокерамическим способом. Ценнейшими свойствами обладают искусственный материал боразон, синтезированный из бора и азота и превзошедший по твердости природный алмаз, и корундовый микролит, созданный из глины и оставивший позади самые твердые сплавы, агат, сапфир, рубин и другие минералы. Большое развитие получают кремнийорганические, металлоорганические и другие подобные соединения, знаменующие новый этап в использовании минеральных ресурсов Земли.

Прогресс науки и техники создает все большие возможности для получения минералов, удовлетворяющих самым высоким требованиям, стойких к температуре и давлению, обладающих необходимыми электрическими и магнитными свойствами, с нужными размерами кристаллических зерен и другими важнейшими качествами.

Много сделано, много решено задач. А сколько еще сложных и трудных проблем предстоит решить науке, и в том числе геохимии, чтобы получить еще более твердые сплавы, еще больше редчайших элементов, сотни и тысячи новых искусственных материалов, используя всю таблицу Менделеева, скрытую в недрах нашей планеты!

Непроторенными путями

Разведка месторождений полезных ископаемых в земной коре — увлекательная и трудная задача. Геологи используют большой арсенал средств — от простого наблюдения и собирания образцов минералов и горных пород на поверхности до глубокого и сверхглубокого бурения. Все большее развитие получают геофизические методы поисков и разведок. Широко применяются электроразведка, сейморазведка, гравиметрические, магнитометрические, радиометрические методы разведки, электрорадиоактивный каротаж. На основании полученных данных определяются условия залегания рудных месторождений, составляются схемы тектонического и металлогенетического районирования, позволяющие давать оценку месторождений и создающие условия для их разработки.

В поисках месторождений цветных и редких металлов, нефти и газа видное место занимают и **геохимические методы**.

Это прежде всего поиски рудных месторождений по ореолам рассеяния рудообразующих и сопутствующих им элементов. Такой метод имеет особое значение в условиях так называемых слепых рудных тел и месторождений, залегающих на глубинах в сотни метров и покрытых мощными наносами, где обычные методы визуальных наблюдений оказываются малоэффективными. Например, при помощи металлометрии — прямых измерений содержания тех или иных металлов в почвах и последующей статистической обработке результатов этих измерений в разных местах — открыты многочисленные промышленные месторождения меди, свинца и цинка, молибдена, олова и других полезных ископаемых.

В поисках месторождений полезных ископаемых успешно применяются **гидрогеохимические** (гидрохимические) **методы**, основанные на выявлении в подземных водах и открытых водоемах ореолов рассеяния — повышенного или пониженного содержания в них тех или иных химических элементов.

По водным ореолам рассеяния путем изучения химического состава подземных вод обнаруживают рудные залежи, скрытые на глубинах до 50 метров и более. С помощью этого метода удается обнаружить ореолы рассеяния ряда подвижных элементов: меди, цинка, молибдена, урана, никеля, кобальта и ванадия.

Наиболее активную роль в образовании гидрогеохимических ореолов рассеяния играют поверхностные и грунтовые воды, глубинные межпластовые артезианские минеральные воды, залегающие ниже грунтовых вод и нередко поступающие на поверхность в виде минеральных источников, нефтяные воды в районах нефтяных структур, горячие источники, выходящие на поверхность в районах современного вулканизма, наконец, морские воды, захороненные в породах при осадкообразовании.

Режим и химический состав поверхностных и грунтовых вод

теснейшим образом связаны с ландшафтными условиями местности и круговоротом воды. В рудных районах водные ореолы рассеяния богаты концентрациями железа, марганца, фосфора и других металлов. Глубинные воды, особенно минерализованные, образуют гидрогеохимические ореолы рассеяния, обогащенные многими редкими и радиоактивными элементами (литием, ураном, радием, фтором, йодом).

Нефтяные воды — это чаще всего соленые растворы, содержащие хлор, натрий, кальций, магний, а также йод, бром, барий, железо, стронций, радий и иногда, вблизи нефтяной залежи, нефтяные кислоты. Мигрируя к поверхности земли, нефтяные воды и газы вносят в биосферу эти вещества и вовлекают их в протекающие здесь геохимические и биогеохимические процессы. Многие из них обуславливают специфические признаки почв и продуктов коры выветривания.

На этом основании в настоящее время разработаны почвенно-геохимические показатели нефтеносности недр, которые служат поисковыми признаками на нефть. Это прежде всего повышенное содержание в почве углекислого кальция, йода, серы.

Газогеохимические методы позволяют определять ореолы рассеяния элементов, связанные с выходом на поверхность природных газов различного происхождения (биогеохимического, вулканического, метаморфического, радиоактивного).

В некоторых горных породах и подземных водах содержится значительное количество газов, и их роль в миграции элементов в земной коре и в образовании ореолов рассеяния очень велика.

Значительные скопления газов биохимического происхождения часто связаны с месторождениями нефти, угля, болотных и иловых осадков в бассейнах. Для определения газовых ореолов, связанных с залежами нефти, основным показателем является концентрация в почвах тяжелых углеводородов, которая прямо указывает на скопление на той или иной глубине нефти и газа.

Как мы уже говорили, многие химические элементы могут в значительных количествах концентрироваться в организмах и их отложениях, образуя специфические биогенные геохимические ореолы рассеяния. В выявлении концентраций различных элементов в растениях и животных и состоят **биогеохимические методы** поисков месторождений полезных ископаемых. Особенно большое применение эти методы имеют в изучении районов, занятых ледниковыми, эоловыми (ветровыми) отложениями, наносами, а также в поисках слепых рудных тел, залегающих на глубине до 20—25 метров.

Определенным горным породам и их выветрившимся отложениям соответствуют те или иные виды растительности и животного мира. Например, прямыми индикаторами присутствия цинковых руд служат растения галмейная фиалка и галмеиная ярутка; индикатором урановых и селеновых руд — астрагал.

Научные и практические исследования в этом направлении

только начаты. Еще не изучено содержание всех элементов в фауне и флоре. Но уже выяснилось, что биогеохимический метод может быть использован при поисках никеля, кобальта, меди, молибдена, цинка, хрома и многих других элементов.

Отдельные части растений по-разному усваивают химические элементы. Чаще всего наибольшая концентрация элементов происходит в корневых частях растений, хотя в отдельных случаях стебли и листья накапливают не меньше элемента, чем корневая часть. Геоботанический метод используется при поисках не только рудных месторождений, но и подземных вод, нефти, серы.

Микроорганизмы также поглощают из почвы, рыхлых отложений и кор выветривания химические элементы. Этот раздел биохимических методов поисков пока весьма слабо развит, но в последние годы им начинают усиленно заниматься.

Различные виды бактерий используют в своей жизнедеятельности такие элементы, как молибден, вольфрам, цинк, свинец, медь и марганец. Сравнение микробиологических анализов с металлометрическими исследованиями, например в Казахстане и Забайкалье, показало, что ореолам рассеяния молибдена соответствуют области повышенной интенсивности развития определенных бактерий.

Уже сейчас ясно, что биохимические методы представляют интерес при поисках месторождений различных металлов. Изучая химический состав растений и животных и устанавливая в них повышенную концентрацию различных элементов, можно выделять наиболее перспективные участки для последующего проведения детальных поисковых работ.

Существуют и другие геохимические методы поисков полезных ископаемых. Пока они разрабатываются лишь для ограниченного количества элементов. Полученный при этом небольшой опыт показывает, что такие методы смогут успешно применяться и войдут в арсенал геологов-поисковиков.

На новые рубежи

Геохимия — не только одна из интереснейших, но и одна из полезнейших для человека наук. Замечательно ее настоящее, еще более прекрасно ее будущее.

Решения XXII съезда КПСС и Программа КПСС отводят геологии и геохимии исключительно большую роль в создании материально-технической базы коммунизма. Эти науки призваны обеспечить народное хозяйство необходимым количеством минеральных ресурсов.

С каждым днем все шире вовлекаются в промышленное производство разнообразные химические элементы и огромное количество изотопов. Это результат творческого исследования человеком химических элементов, выявления закономерностей

распространения, сочетания и перемещения атомов и изотопов в природе.

Человек стремится как можно полнее использовать богатства земных недр и природных ландшафтов. Он разрабатывает способы наиболее целесообразного и эффективного применения химических элементов, получения из них наиболее ценных веществ и материалов. Человек все больше подчиняет себе атом и использует его могучие силы для прогресса науки, техники и культуры. Во всем этом ему помогает геохимия.

Опираясь на законы сочетания атомов в кристаллах и минералах, человек создает новую, синтетическую химию — химию разнообразных искусственных камней, полимеров, металлов, красок, питательных веществ. С помощью редких и редчайших элементов он конструирует аппараты и приборы, которые в миллионы раз увеличивают наши возможности в изучении окружающего мира.

Человек уже открыл окно во Вселенную. Он овладевает тайнами бесконечного космоса и мельчайшей живой клетки, синтезирует замечательные лечебные препараты, разрабатывает новые средства транспорта, которые будут преодолевать расстояние и время в сотни и тысячи раз быстрее, чем сейчас. Он создает новые установки и двигатели для использования всех видов энергии, таящейся в каждой молекуле, атоме и элементарной частице.

Поистине могуч и безграничен гений человека, беспредельны его возможности!

Советская наука — самая передовая наука современности — служит миру. Вместе со всем народом советские ученые трудятся для коммунизма, поэтому их исследования так плодотворны. Они дают человечеству новые и новые средства для того, чтобы сделать жизнь всех людей на Земле богаче, красивее и содержательнее.

Интересно, полезно знать

СОВЕТУЕМ ПРОЧИТАТЬ

- Вернадский В. И. Очерки геохимии. М., 1934
- Виноградов А. П. Геохимия редких и рассеянных элементов в почвах. М., Изд-во АН СССР, 1950.
- Виноградов А. П. Химия Земли. В сб.: «Глазами ученого». М., Изд-во АН СССР, 1963.
- Вологдин А. Г. Земля и жизнь. Эволюция среды и жизни. М., Изд-во АН СССР, 1963.
- Горский Н. Н. Вода — чудо природы. М., Изд-во АН СССР, 1962.
- Джонс Г., Ротблат Дж., Уинтроу Г. Атомы и вселенная. М., Госатомиздат, 1961.
- Ковда В. А., Якушевская И. В., Тюрюканов А. Н. Микроэлементы в почвах Советского Союза. М., Изд-во МГУ, 1959.
- Ломоносов М. В. О слоях земных. М., Госгеолиздат, 1949.
- Лукашев К. И. Редкие металлы и их использование. Минск, 1956.
- Лукашев К. И. Геохимические процессы миграции и концентрации элементов в биосфере. Минск, Изд-во АН СССР, 1957.
- Лукашев К. И. Геохимия служит народу. Минск, 1961.
- Лукашев К. И. Химия Земли. М., Изд-во «Знание», 1962.
- Макареня А. А. Д. И. Менделеев о радиоактивности и сложности элементов. М., Госатомиздат, 1963.
- Опарин А. И. Возникновение жизни на земле. М., Изд-во АН СССР, 1957.
- Ромер А. Неугомонный атом. Госатомиздат, 1963.
- Сиборг Г. Искусственные трансурановые элементы. В кн.: «Наука и человечество», т. II. М., Изд-во «Знание», 1963.
- Смирнов В. И. Рудные пояса Земли. М., Изд-во «Знание», 1962.
- Спицин В. И. Периодическая система и современная неорганическая химия. В сб.: «Глазами ученого». М., Изд-во АН СССР, 1963.
- Ферсман А. Е. Занимательная геохимия. М., Изд-во АН СССР, 1959.
- Ферсман А. Е. Очерки по минералогии и геохимии. М., Изд-во АН СССР, 1959.
- Франк И. М. Физика ядра и атомная энергия. В сб.: «Глазами ученого». М., Изд-во АН СССР, 1963.
- Щербakov Д. И. Шкала абсолютного возраста геологических формаций. «Природа», 1961, № 2.

О ЧЕМ РАССКАЗЫВАЕТСЯ В ЭТОЙ КНИГЕ

	<i>Стр.</i>
К читателю	3
Слагаемые новой науки	6
Рождение геохимии	6
Геохимия — синтез наук	7
Законы атомов — законы геохимии	10
Распределение элементов в земной коре	10
Ключ к поведению атомов	14
Атомы-родственники и семейства элементов	17
Геохимические провинции	20
Геохимия и строение Земли	22
Элементы в земных оболочках	22
Вечные странствия атомов	28
Рождение и смерть атомов	32
Образование изотопов и вторичных элементов	32
Радиоактивный распад и тепло Земли	35
Естественные эталоны времени	38
Геохимический облик Земли	43
Геохимические ландшафты	43
Зональные геохимические процессы миграции эле- ментов	46
Геохимия атмосферы	52
Атмосфера — важнейший геохимический деятель	60
Гидросфера — геохимическое чудо природы	62
Геохимические богатства Мирового океана	69
Геохимия живого	72
Биогеохимическая жизнь земной коры	72
Судьбы органических веществ	75
Биогеохимические провинции	78
Человек создает новую геохимию	81
Человечество — геохимический фактор	81
Материалы техники будущего	84
Непроторенными путями	89
На новые рубежи	91
Литература	93

Константин Игнатьевич Лукашев

АТОМЫ И НАША ПЛАНЕТА

Редактор **А. Д. Иорданский**
Художественный редактор **Т. И. Добровольнова**
Технический редактор **М. Т. Перегудова**
Художник **Е. С. Скрынников**
Корректор **А. А. Пузакова**

Сдано в набор 5.4 1965 г. Подписано к печати 12.5 1965 г. Изд. № 83.
Формат бум. 60×90¹/₁₆. Бум. л. 3,0. Печ. л. 6,0 Уч.-изд. л. 5,93.
А 11069. Цена 18 коп. Тираж 20 800 экз. Заказ 1234.
Опубликовано тем. план 1965 г. № 8.

Издательство «Знание». Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4.

Типография изд-ва «Знание». Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4.

**ПОДПИСЫВАЙТЕСЬ
НА НАУЧНО-ПОПУЛЯРНЫЕ БРОШЮРЫ
ИЗДАТЕЛЬСТВА «ЗНАНИЕ»
«НАРОДНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Факультеты:

**Естественнонаучный
Технико-экономический
Сельскохозяйственный
Литературы и искусства
Правовых знаний
Педагогический
Здоровья**

помогут слушателям народных университетов овладеть основами наук. Доступность и простота изложения делает эти брошюры ценным пособием для самостоятельной работы.

Среди авторов — видные советские ученые академики Н. Н. Аничков, В. С. Немчинов, члены-корреспонденты АМН СССР А. А. Смородинцев, В. Н. Мошков, Ф. В. Шибанов, П. А. Петрищева, член-корреспондент ВАСХНИЛ А. Г. Вологдин, доктора наук В. А. Веников, А. И. Денисов, О. В. Козлсва; известные педагоги Н. Т. Долинина, И. Г. Овчинникова; критик-литературовед Л. Т. Мотылева, искусствоведа, писатели, журналисты, общественные и политические деятели.

Подписная цена

На 3 месяца	— 45 коп.
На 6 месяцев	— 90 коп.

В каталоге «Союзпечати» на 1965 год эти брошюры помещены под индексом 70057—70063.

Цена 18 коп.