

ISSN 0032-874X

# 7 ПРИРОДА

1984





## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор  
академик  
Н. Г. БАСОВ

Заместитель главного редактора  
кандидат физико-математических наук  
А. И. АНТИПОВ

Доктор физико-математических наук  
Е. В. АРТЮШКОВ

Академик  
Д. К. БЕЛЯЕВ

Член-корреспондент АН СССР  
Р. Г. БУТЕНКО

Доктор географических наук  
А. А. ВЕЛИЧКО

Член-корреспондент АН СССР  
В. А. ГОВЫРИН

Член-корреспондент АН СССР  
И. Р. ГРИГУЛЕВИЧ

Член-корреспондент АН СССР  
Г. А. ЗАВАРЗИН

Член-корреспондент АН СССР  
В. Т. ИВАНОВ

Доктор физико-математических наук  
Н. П. КАЛАШНИКОВ

Доктор физико-математических наук  
С. П. КАПИЦА

Академик  
Б. М. КЕДРОВ

Доктор физико-математических наук  
И. Ю. КОБЗАРЕВ

Кандидат физико-математических наук  
А. А. КОМАР

Академик  
Н. К. КОЧЕТКОВ

Доктор геолого-минералогических наук  
И. Н. КРЫЛОВ

Доктор философских наук  
Н. В. МАРКОВ

Доктор экономических наук  
В. А. МЕДВЕДЕВ

Ответственный секретарь  
В. М. ПОЛЫНИН

Доктор исторических наук  
П. И. ПУЧКОВ

Заместитель главного редактора  
член-корреспондент АН СССР  
Ю. М. ПУЩАРОВСКИЙ

Доктор философских наук  
Ю. В. САЧКОВ

Заместитель главного редактора  
доктор биологических наук  
А. К. СКВОРЦОВ

Академик АН УССР  
А. А. СОЗИНОВ

Академик  
В. Е. СОКОЛОВ

Доктор геолого-минералогических наук  
М. А. ФАВОРСКАЯ

Заместитель главного редактора  
кандидат технических наук  
А. С. ФЕДОРОВ

Заместитель главного редактора  
член-корреспондент АН СССР  
Л. П. ФЕОКТИСТОВ

Член-корреспондент АН СССР  
В. Е. ХАИН

Член-корреспондент АН СССР  
Р. Б. ХЕСИН

Доктор физико-математических наук  
А. М. ЧЕРЕПАЩУК

Доктор физико-математических наук  
В. А. ЧУЯНОВ

Академик  
В. А. ЭНГЕЛЬГАРТ

На первой и четвертой страницах обложки.  
Цветет лилия пенсильванская (*Lilium pensylvanicum*) — один из видов дикорастущих лилий Приморского края. Река Кедровая осенью. См. в номере: Урусов В. М. В Приморье необходим национальный природный парк.

Фото Ю. Т. Васьковского.

## В НОМЕРЕ

- Мартинек К. Мицеллярная энзимология** 3
- До последнего времени функцию ферментов не удавалось исследовать в живой клетке; обычно их изучали в водных растворах. В обращенных мицеллах, моделирующих клеточную среду, ферменты проявили новые, неожиданные свойства. Уже сейчас эти достижения нашли широкое применение в органическом синтезе, аналитической химии и в медицине.
- Шуколюков Ю. А. Все ли понятно в феномене Окло?** 14
- В урановой руде из природного ядерного реактора — месторождения Окло в Африке — обнаружены изотопные аномалии ксенона. Их невозможно объяснить ни одной известной ядерной реакцией. Не исключено, что аномалии вызваны делением какого-то нового изотопа.
- Мельниченко В. М., Никулин Ю. Н., Сладков А. М. Слоистая структура алмаза** 22
- То, что атомы алмаза — самого твердого материала на Земле — образуют кубическую решетку, в течение нескольких десятилетий считалось аксиомой. Излагаемый подход не только позволяет иначе взглянуть на структуру алмаза, объяснив ряд свойств, казавшихся ранее непонятными, но и предсказывает многочисленные новые регулярные формы углерода.
- Хани В. Е. От мобилизма Вегенера к неомобилизму** 31
- Теория тектоники литосферных плит является сегодня наиболее полно разработанной тектонической концепцией. Тем не менее «классическая» тектоника плит слишком схематично описывает процесс тектогенеза, что становится очевидным при переходе от глобального масштаба исследований к региональному. Кроме того, ряд особенностей тектогенеза остается за рамками плитовой тектоники.
- Мирилин Г. А. Минеральные ресурсы на пороге XXI в.** 44
- Ресурсы полезных ископаемых в мире еще достаточно велики. С развитием техники человечество сможет использовать ныне непригодное для промышленности сырье. Крупным резервом для открытия новых месторождений станут более глубокие слои земной коры, дно Мирового океана.
- Урусов В. М. В Приморье необходим национальный природный парк** 57
- Эта необходимость диктуется заботой об истощающихся природных богатствах Южного Приморья, где некоторые районы страдают от массового стихийного туризма.
- Никитин С. А. Космический полет советско-индийского экипажа** 66
- Эта блестящая экспедиция стала примером сотрудничества в мирном освоении космического пространства государства с разными социально-экономическими системами.
- Борин А. А. Полет и механические колебания** 69
- Исследования последних лет показали, что надежды на эффективное применение в технике машущего полета — основного способа передвижения птиц и насекомых — не оправданны.
- Черодзев А. Е. Китайский аллигатор** 78
- Китайский аллигатор — один из видов «Красной книги МСОП» — в нашей стране содержится только в зоопарках. Предлагается увеличить коллекцию этих животных, создав фонд и наладив размножение их в одном из зоопарков на юге СССР.

Недавно полученные периодические многослойные структуры — полупроводниковые сверхрешетки — обладают рядом необычных свойств и уже нашли широкое применение в радиофизике и электронике.

**Чайковский Ю. В. «Происхождение видов». Загадки первого перевода**

Первый перевод знаменитого труда Ч. Дарвина на немецкий язык был сделан известным зоологом Г. Бронном. История этого перевода, сыгравшего большую роль в становлении и распространении эволюционного учения, — подлинная драма научных идей, отголоски которой слышны и сегодня.

**ЗАМЕТКИ, НАБЛЮДЕНИЯ****Несис К. Н. Как предки китов начали завоевывать море****Карцев В. М. Гармония или адаптивность?****НОВОСТИ НАУКИ**

Первые результаты астрофизической станции «Астрон» [101] • Квазары с большим красным смещением [101] • Прекратил излучать рентгеновский источник в созвездии Лебедя [102] • Третья солнечная система? [102] • Одинокая молодая звезда [102] • Астрономические открытия инфракрасного спутника «ИРАС» [103] • Горы земного типа на Венере [103] • Метеориты с Марса [104] • Редкий распад нейтрального пиона [105] • Линии электропередач влияют на ионосферу и магнитосферу Земли [106] • Лазерное возбуждение поверхностных волн в твердом теле [107] • Сварка с помощью ионного пучка [107] • Фонокинетический аналог фотоэлектрического эффекта? [108] • Вводнение металла в графит [108] • Синтез поверхностного антигена вируса гепатита В [109] • Поведение контролируется сложными белками [109] • Механизм действия онкогенов [109] • Рецепторы Т-лимфоцитов [110] • Индукторы интерферона усиливают эффективность вакцинации [110] • Борьба со стафилококковой инфекцией [111] • «Пептид сна» из яда морской улитки [111] • Новая функция митохондрий [111] • Как ребенок рисует человечка [112] • Сон у морских котиков [112] • Судьба нефти «Амоко Кадис» [113] • Международная программа «Региональные моря» [114] • Индийский океан должен быть чистым [115] • Вековой ход магнитного поля Земли [116] • Предсказанное землетрясение [117] • Серебро в древнем Средиземноморье [117]

**РЕЦЕНЗИИ****Никогосян Д. Н. Настольная книга физика-экспериментатора (на кн.: А. П. Сенченков. Техника физического эксперимента)****Силаева О. Л. Популярно о биоакустике (на кн.: Владимир Морозов. Занимательная биоакустика)****НОВЫЕ КНИГИ**

Фундаментальная структура материи [122] • Селезников М. Антимир — реальность? [122] • Говале В. И. Парадоксы иммунологии [122] • Яблоков А. В., Остроумов С. А. Охрана живой природы: проблемы и перспективы [123] • Швецов П. Ф., Зильберборд А. Ф. Под землю, чтобы сберечь Землю [123] • Щапова Ю. Л. Очерки истории древнего стеклоделия [124] • Челаков В. Нобеловите награди: учени и открытия. 1901—1982. Физика, химия, физиология и медицина [124]

**В КОНЦЕ НОМЕРА****Зарипов Р. Х. Вариации на тему «Уральских напевов»**

## Мицеллярная энзимология

К. Мартинек



Карел Мартинек, член-корреспондент Чехословацкой Академии наук, доктор химических наук, профессор Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова. Занимается научными проблемами на стыке физической и органической химии и молекулярной биологии. В последние годы активно разрабатывает прикладные задачи с использованием иммобилизованных ферментов. Лауреат Ленинской премии 1982 г. Автор монографии: Основы физической химии ферментативного катализа (совместно с И. В. Березиным). М., 1977.

Наука о ферментах — энзимология — находится на стыке биологии, химии и физики. Хотя границы между этими дисциплинами здесь почти стерлись, тем не менее легко узнать «происхождение» того или другого исследователя, работающего в данной пограничной области. Для этого достаточно прислушаться к его научному языку или взглянуть на задачи, которые он перед собой ставит.

Ферменты в глазах биолога — это высокоспециализированные белковые молекулы, катализирующие биологический обмен веществ. Действительно, без ферментов большинство жизненно важных процессов не могли бы протекать с достаточной высокими скоростями; более того, ферменты в живом организме играют также регуляторную роль. Именно по этим причинам изучение структуры и функции ферментов стало одной из важнейших задач всей молекулярной биологии.

Физики рассматривают фермент прежде всего как макромолекулярную систему, которая работает подобно «машине, способной, с одной стороны, использовать внутреннюю энергию для полезной работы, а с другой — создавать осмысленную упорядоченность, т. е. информацию»<sup>1</sup>.

В свою очередь, ферменты стали обычным объектом исследования и в химических лабораториях. Механизмы ферментативного катализа пытаются понять как химики-органики, так и физико-химики. Несмотря на существенные различия в исследовательских методах и подходах, и те и другие говорят на языке молекулярных моделей. Это означает, в частности, что ферменты изучают наравне с другими катализаторами (неорганическими и органическими, гомогенными и гетерогенными), чтобы выявить в итоге некоторую общность причин, приводящих к ускорению или к селективности катализируемой реакции. Можно надеяться, что в будущем именно на этом пути будет создана единая физико-химическая теория катализа.

Интерес к энзимологии еще более возрос после того, как открылись широчайшие перспективы практического применения биокатализа, особенно иммобилизованных ферментов: в препаративном органическом синтезе, в химическом и клиническом анализе, в терапии, в системах биоконверсии энергии и массы, в технологических процессах фармацевтической и пищевой промышленности.

Как видно, энзимология оказывает существенное влияние на развитие многочисленных научных и технических отраслей. Так, без энзимологической лаборатории

<sup>1</sup> Блюменфельд Л. А. Проблемы биологической физики. М., 1977, с. 134.

трудно представить себе научно-исследовательский институт молекулярной биологии или генетики, микробиологии, биохимии и биофизики, биоорганической химии, фармакологии, токсикологии, физиологии, медицины, но также и химической физики или физической химии, кибернетики, электробиологии, не говоря уже о многочисленных технологических и технических институтах. Во многих странах созданы сейчас даже специальные институты для изучения ферментов.

Итак, энзимология — это междисциплинарная наука, которая наряду с фундаментальными биологическими, химическими и физическими проблемами решает также и прикладные задачи.

### ОСНОВНОЕ ПРОТИВОРЕЧИЕ КЛАССИЧЕСКОЙ ЭНЗИМОЛОГИИ

Большинство энзимологов сознает, что наиболее значимые эксперименты, в результате которых удалось выяснить физико-химические механизмы биокатализа, можно было поставить лишь тогда, когда научились выделять индивидуальные ферменты из живой материи в чистом виде. Первый шаг в этом направлении сделал Дж. Самнер, получивший в 1926 г. кристаллы фермента уреазы.

С другой стороны, такого рода якобы «чистые» эксперименты породили закономерный вопрос: можно ли свойства ферментов, наблюдаемые вне организма (*in vitro*), корректно относить к условиям их работы в живой клетке. Дело в том, что классическая энзимология исследует ферменты, растворенные просто в воде, точнее, в буферном растворе, а ферментативные реакции в живой природе протекают обычно вблизи или на поверхности раздела фаз, т. е. в организме ферменты большей частью или адсорбированы на биологических мембранах, или встроены в них. Более того, сама среда клетки сильно отличается от водного раствора, обычно используемого в эксперименте, и по химическому составу, и по физическим свойствам, таким как диэлектрическая проницаемость, полярность, вязкость и др. Именно поэтому многие сейчас склонны считать, что традиционная энзимология — наука искусственная.

Разумеется, такую напряженную ситуацию в развитии науки необходимо исправлять. И время не терпит, поскольку «мир гигантских биомолекул, а также

надмолекулярных структур типа мембран, именно сейчас начинает раскрываться под натиском весьма мощного арсенала биоорганических методов...»<sup>2</sup>. К сожалению, интактные организмы пока трудно изучать на молекулярном уровне. Поэтому во многих лабораториях мира ведутся поиски адекватных моделей, имитирующих структуру и функции отдельных «элементарных» фрагментов клетки. Для этого используют моно- или бислои поверхностно-активных веществ (т. е. веществ, способных адсорбироваться на поверхностях раздела фаз), «черные пленки» со встроенными в них белковыми молекулами, липосомы и т. п. Весьма реалистичный компромисс между энзимологией сложных биологических систем и классической энзимологией «чистых» ферментов разработали Э. Качальский-Кацир и его сподвижники: они начали присоединять ферментные молекулы к поверхности (или включать внутрь) различного рода носителей, таких как полимерные гели, микрокапсулы, полые волокна или микропористые частицы.

Несмотря на достигнутые успехи в создании модельных систем, основное место в фундаментальных исследованиях продолжают занимать методы классической энзимологии. И дело здесь не только в консерватизме энзимологов. Постановку более реалистичного лабораторного эксперимента торМОзит ряд прежде всего методических причин. Во-первых, для создания большинства модельных систем, главным образом для включения в них фермента, нужны специальные, иногда весьма сложные приемы. Во-вторых, эти модели, как правило, можно реализовать лишь при определенных специфических условиях. В-третьих, имеющиеся сейчас модели мембран — это макрогетерогенные системы, и поэтому непосредственно наблюдать за включенным в них ферментом достаточно трудно.

В 1977 г. для молекулярной энзимологии открылись, на наш взгляд, принципиально новые возможности<sup>3</sup>. Было найдено, что индивидуальные ферменты сохраняют каталитическую активность не только в воде, но и в органических

<sup>2</sup> Дюга Г., Пенни К. Биоорганическая химия. М., 1983, с. 6.

<sup>3</sup> Мартинек К., Левашов А. В., Клячко Н. Л., Березин И. В.— Доклады АН СССР, 1977, т. 236, с. 920; *idem*.— Science, 1982, v: 218, p. 889.

растворителях, не смешивающихся с водой. На первый взгляд это может показаться невероятным, поскольку хорошо известно денатурирующее действие органической среды на белок. Однако денатурации можно избежать, если включить ферменты в обращенные мицеллы поверхностно-активного вещества. О такой мицеллярной ферментсодержащей системе, которая, по существу, положила начало новому научно-техническому направлению — мицеллярной энзимологии, и пойдет речь в нашей статье.

### МИЦЕЛЛЯРНАЯ ФЕРМЕНТСОДЕРЖАЩАЯ СИСТЕМА

Тройные системы органический растворитель — поверхностно-активное вещество — вода — давний объект исследования коллоидной химии. Известно, что, изменяя содержание того или другого компонента этой системы, можно получать ламеллярные (плоскостные), гексагональные (трубчатые), или, наконец, сферические или эллипсоидные (мицеллярные) ассоциаты (рис. 1). В образовании ассо-

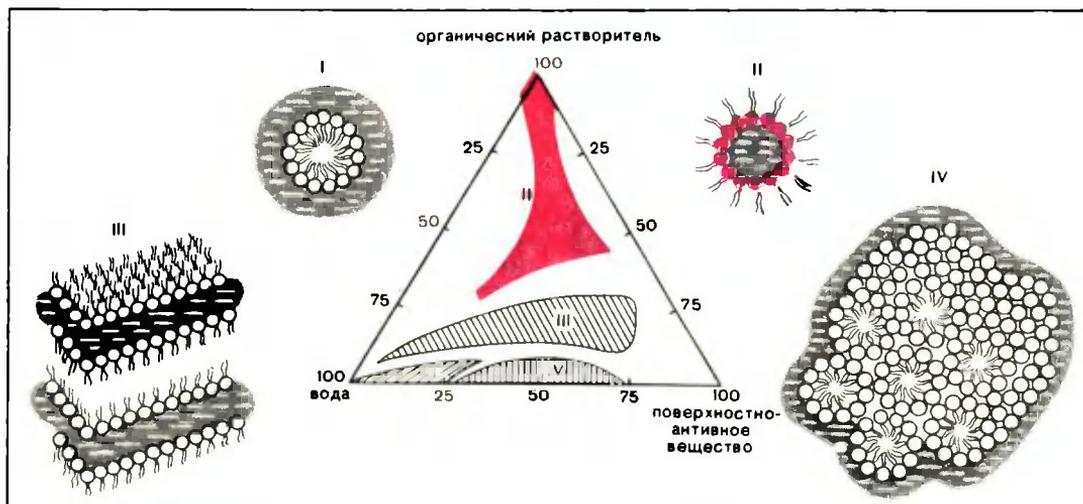


Рис. 1. Фазовая диаграмма образования ассоциатов в трехкомпонентной системе вода — органический растворитель — поверхностно-активное вещество: обычная (I) и обращенная (II) мицеллы; ламеллярная, плоскостная (III), и гексагональная, трубчатая (IV) промежуточные мезоформы. Концентрации компонентов указаны в весовых процентах.

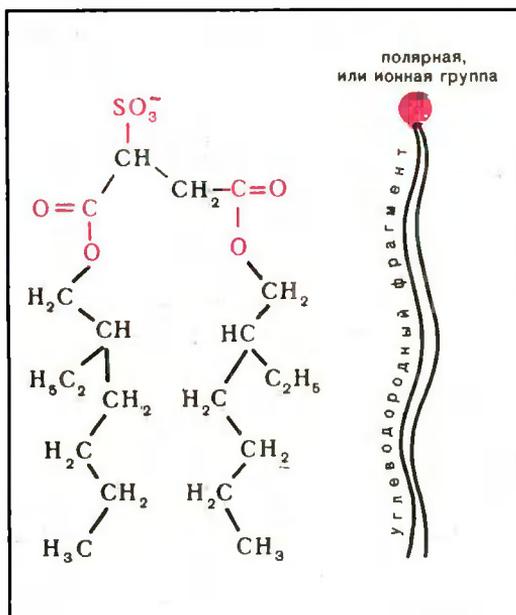


Рис. 2. Строение молекулы поверхностно-активного вещества (диоктиловый эфир натриевой соли сульфогранный кислоты — аэрозоль OT). Слева — химическая структура, справа — схематическое изображение молекулы обусловлены тем, что она содержит как полярно-ионный фрагмент (обозначен цветом), так и гидрофобные углеводородные цепи. В обращенной мицелле полярно-ионный фрагмент образует ядро, а гидрофобные углеводородные цепи формируют внешний слой, контактирующий с органическим растворителем.

циатов типа «обращенных мицелл» участвуют обычно несколько десятков или сотен молекул поверхностно-активного вещества. Ядро ассоциата создают полярные или ионные группы молекулы поверхностно-активного вещества, а углеводородные фрагменты формируют внешний слой мицеллы (рис. 2). В качестве мицеллообразующего материала пригодны различные дифильные соединения, такие как цетилтриметиламмоний бромистый, додецилсульфат натрия, алкилированные полиэтиленгликоли (известные детергенты типа

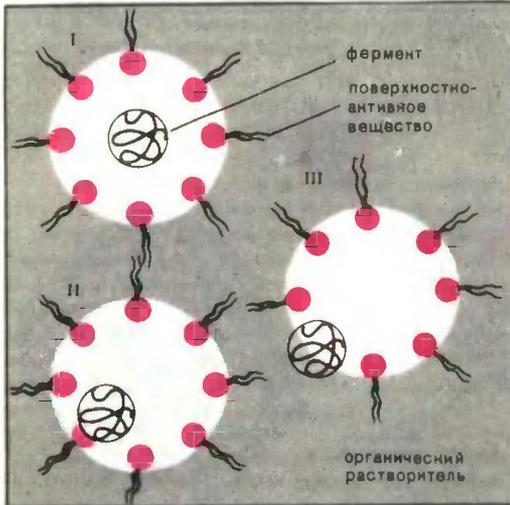


Рис. 3. Сферическая обращенная мицелла, содержащая фермент, в органическом растворителе. Ферментная молекула может либо находиться в водном ядре (I), либо взаимодействовать с поверхностным слоем обращенной мицеллы (II), или же, наконец, контактировать с органическим растворителем (III).

«бридж» или «Тритон») или же, наконец, природные липиды. Выбор таких веществ достаточно велик, однако к настоящему времени большинство экспериментов было выполнено с синтетическим аналогом липидов, так называемым аэрозолем ОТ (натриевая соль диоктилового эфира сульфогрантной кислоты). Спонтанное образование мицелл идет в таких органических растворителях, как углеводороды (октан, бензол), высшие спирты, хлороформ, эфир и другие.

Образование мицелл характеризуется, как правило, довольно подвижным равновесием. Так, при столкновениях друг с другом мицеллы деформируются, рассыпаются (диссоциируют) и возникают снова. Благодаря подвижности их строения,

обращенные мицеллы способны захватывать (солюбилизовать) в свое ядро ионы и полярные органические молекулы и весьма быстро ими обмениваться. Более того, с помощью поверхностно-активных веществ органические растворители способны удерживать в коллоидном виде значительное количество воды (вплоть до нескольких десятков объемных процентов), а также биологические макромолекулы, например ферменты.

Приготовить коллоидный ферментный раствор очень просто: лиофилизированный или в виде концентрированного водного раствора фермент вносят при встряхивании или перемешивании в органический растворитель, содержащий поверхностно-активное вещество; при этом ферментная молекула самопроизвольно включается в обращенную мицеллу.

Мицеллы в органических растворителях открыли уникальную возможность растворять белки в стандартных условиях, где, однако, молекула растворенного белка может сама выбрать «подходящее для нее» микроокружение (оптимальное с точки зрения термодинамики). В самом деле, если молекула гидрофильного (имеющего сродство к воде) белка «не захочет» контактировать ни с органическим растворителем, ни с поверхностью внутренней полости мицеллы, то она расположится в водном ядре обращенной мицеллы. С другой стороны, поверхностно-активные ферменты, например липазы, непременно взаимодействуют с поверхностным слоем обращенной мицеллы или даже частично в него погружаются. И, наконец, типичные мембранные (гидрофобные) ферменты аступают в контакт даже с органическим растворителем (рис. 3). Следовательно, коллоидный раствор воды в органических растворителях можно рассматривать фактически как универсальную микрогетерогенную среду для ферментативных реакций.

Один из ключевых вопросов мицеллярной энзимологии состоит в том, насколько зависят и зависят ли каталитические свойства фермента в обращенной мицелле от геометрического соответствия его молекулы размерам внутренней полости самой мицеллы. Этот вопрос легко решить экспериментально (рис. 4). Как правило, линейные размеры обращенных мицелл определяются главным образом степенью их гидратации; например, в системе фермент — вода — аэрозоль ОТ в изооктане увеличение степени гидратации (т. е. мо-

лекулярного соотношения  $H_2O$ /поверхностно-активное вещество) от 0 до 50 увеличивает гидродинамический радиус мицелл от 20 до 120 Å.

Как видно, размер внутренней полости мицеллы, заполненной водой, удается варьировать без особых методических затруднений. Добавляя в систему большее или меньшее количество воды, полость можно сделать значительно больше молекулы фермента или же, наоборот, как бы «сшить ее по мерке» и тем самым заставить фермент находиться в принуди-

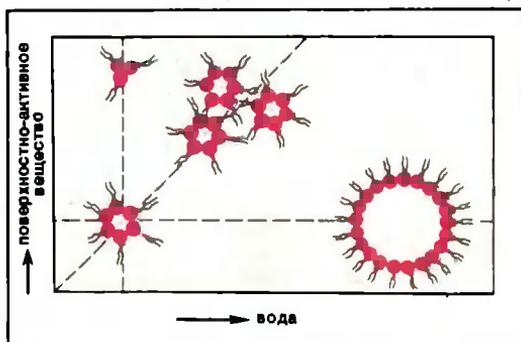


Рис. 4. Изменение размеров внутренней полости обращенных мицелл при изменении концентрации воды или, соответственно, поверхностно-активного вещества в органическом растворителе. При постоянном содержании воды по мере увеличения концентрации поверхностно-активного вещества размеры мицелл уменьшаются. Если зафиксировать концентрацию поверхностно-активного вещества, то с возрастанием содержания воды в системе образуются более крупные мицеллы. Увеличение концентрации как поверхностно-активного вещества, так и воды при из постоянном молярном соотношении (наклонная прямая) приводит к большому числу одинаковых мицелл.

тельном контакте с поверхностно-активным веществом.

Вода, заполняющая внутреннюю полость гидратированных обращенных мицелл, отличается от обычной воды по своим физико-химическим свойствам. Эти различия существенно зависят от размера мицелл. Дело в том, что первые порции добавляемой в систему воды прочно связываются молекулами поверхностно-активного вещества. Лишь после завершения гидратации (4—10 молекул  $H_2O$  на молекулу поверхностно-активного вещества) появляется «свободная» вода, образующая самостоятельную микрофазу. При малых степенях гидратации вязкость воды, захваченной мицеллами аэрозоля ОТ в алифатическом углеводороде, превышает вяз-

кость объемной воды более чем в 200 раз, а ее полярность соответствует полярности хлороформа! И чтобы еще более удивить читателя, неискушенного в тайнах коллоидной воды, добавим, что ее реакционная способность при гидролизе в тысячи раз превышает уровень, известный для обычных водных растворов. Разумеется, при увеличении степени гидратации поверхностно-активного вещества эти различия в свойствах мицеллярной и объемной воды, как правило, монотонно исчезают.

Для исследования ферментов, включенных в обращенные мицеллы, пригодны все спектральные методы классической энзимологии. Дело в том, что мицеллярный раствор фермента в органическом растворителе оптически прозрачен. Более того, в отличие от водных растворов, структуру фермента можно изучать даже методом инфракрасной спектроскопии, так как низкое содержание воды в мицеллярной системе дает лишь небольшой фон.

#### СВОЙСТВА ФЕРМЕНТОВ В ОБРАЩЕННОЙ МИЦЕЛЛЕ

В настоящее время исследования по мицеллярной энзимологии, начатые в Москве, преодолели первоначальный барьер недоверия и инерции и развиваются не только в ряде научных институтов СССР, но также и за рубежом — во Франции, Швейцарии, США, Голландии, Японии, Индии, Новой Зеландии и других странах. Уже изучено поведение более чем двух десятков ферментов, в том числе гидролитических (химотрипсин, лизоцим, рибонуклеаза, пиррофосфатаза и др.) и окислительно-восстановительных (липоамиддегидрогеназа, стероиддегидрогеназа, алкогольдегидрогеназа, лактатдегидрогеназа, пероксидаза, лакказы, каталаза, гидрогеназа, ряд цитохромов)<sup>4</sup>.

Для некоторых ферментов найдены условия (состав мицеллы, степень гидратации), при которых их каталитическая активность значительно превышает показатели водного раствора. Особенно впечатляет поведение пероксидазы. При включении этого фермента в обращенную мицеллу его каталитическая активность (для специалистов: скажем, константа скорости  $k_{кат}$ , по Михаэлису) возрастает более чем

<sup>4</sup> См. в обзоре: Хмельницкий Ю. Л., Левашов А. В., Мартинек К.— Усп. химии, 1984, т. 53, № 4, с. 545.

в 100 раз! Это означает, что ранее, т. е. в классических экспериментах *in vitro* в водном растворе, не удавалось обнаружить истинный каталитический потенциал исследуемого фермента. Фактически во многих лабораториях мира десятилетиями изучали этот фермент в состоянии его функциональной «анемии».

Иные ферменты, включенные в органический растворитель, существенно изменяют, по сравнению с водным раствором, селективность действия. Например, для алкогольдегидрогеназы, фермента, катализирующего окисление алифатических спиртов до соответствующих альдегидов, в водном растворе оптимальный субстрат — октанол. Однако в обращенных мицеллах быстрее всего окисляется другой субстрат — бутанол.

Поражает также высокая стабильность солюбилизированных ферментов. Так, протеолитические ферменты, растворенные с помощью азозола ОТ в октане, можно хранить месяцами без потери каталитической активности.

### ОБРАЩЕННЫЕ МИЦЕЛЛЫ В ПРИРОДЕ

Как видно, в коллоидном растворе воды в органических растворителях удается раскрыть совсем иные, по сравнению с водным раствором, часто более совершенные каталитические свойства солюбилизованного фермента. В связи с этим естественно возникает вопрос, каков механизм мицеллярных эффектов и насколько близко мицеллярные системы способны имитировать микроокружение фермента в живой природе. В первую очередь следует обратить внимание, что фермент в обращенной мицелле попадает, как и в природе, в необычную среду гидратированного слоя на поверхности раздела фаз или же непосредственно входит в контакт со структурированными молекулами поверхностно-активного вещества (липида). Вызванные этим эффекты можно, в принципе, целенаправленно усилить, если полость мицеллы «выстилать» различными биомакромолекулами, например полисахаридами, белками и т. п. Читатель, однако, может не удовлетвориться этими общими рассуждениями и спросить: а есть ли в природе обращенные мицеллы?

Для ответа необходимо выйти на передний фронт науки, где сегодня еще не затихли сражения за раскрытие тайн структуры и функций биологических мембран. «Хотя представление о мембране как о липидном море с плавающими

белковыми айсбергами стало чрезвычайно популярным, следует помнить, что это всего лишь модель, причем довольно упрощенная и схематическая. Во-первых, в этом море во многих случаях воды меньше, чем айсбергов. Во-вторых, не все липиды в мембране расположены по принципу «бислой»<sup>5</sup>. В литературе неоднократно поднимался вопрос о возможном образовании мицелл внутри мембран и биологическом значении этого феномена. Однако лишь недавно благодаря работам голландских, английских и советских иссле-

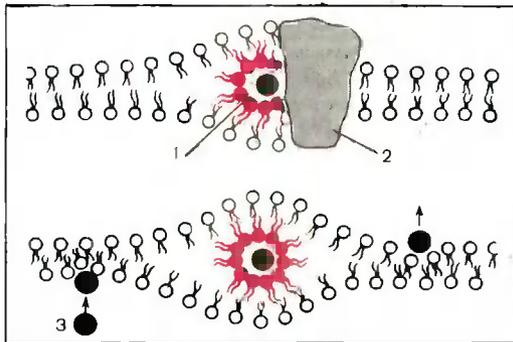


Рис. 3. Возможные функции внутримембранных липидных частиц (обозначены цветом) в биологической мембране: вверху — взаимодействие двух белков на примере цитохрома с [1] и цитохром с-оксидазы [2]; внизу — трансмембранный перенос молекулы белка [3]. При адсорбции белка на мембране происходит его обволакивание липидными молекулами и погружение в бислой с образованием внутримембранной обращенной мицеллы. В результате теплового движения белок может выйти из мембраны по ту или другую сторону бислоя.

дователей действительно было обнаружено, что бислойные мембраны часто содержат небислойные структуры, так называемые липидные частицы, различимые на электронномикроскопических снимках<sup>6</sup>. Эти частицы, как сейчас многие полагают, представляют собой ассоциаты, построенные именно по типу обращенных мицелл и заключенные между монослоями мембраны.

Исследования небислойных структур только начались. Пока ясно лишь одно: если такие мицеллярные структуры действительно существуют в живой природе, то они должны играть ключевую роль в

<sup>5</sup> Бергельсон Л. Д. Мембраны, молекулы, клетки. М., 1982, с. 75.

<sup>6</sup> См. сноску 4.

работе биологической мембраны (рис. 5). Во-первых, обращенная мицелла с включенным в нее ферментом — это, фактически, внутримембранный «химический реактор». В качестве примера укажем на предполагаемую структурную организацию цитохрома с, которая обеспечивает ему взаимодействие с другим мембранным белком — цитохром с-оксидазой. Во-вторых, внутримембранная обращенная мицелла может служить контейнером для трансмембранного переноса некоторых белков. В поддержку такой идеи, высказанной голландскими учеными, говорит тот факт, что некоторые белки, например цитохром с, индуцируют образование липидных частиц в искусственной бислойной мембране.

Итак, фундаментальные исследования на стыке мембранологии и молекулярной энзимологии продолжают. Это не должно, однако, ни в коей мере тормозить внедрение в практику уже познанного.

### ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ

Ферменты давно применяются в качестве каталитических и регуляторных элементов в самых различных областях практической деятельности, в том числе во многих отраслях промышленности<sup>7</sup>. Однако внедрение биокатализа в практику до сих пор ограничивалось тем, что ферментативные процессы проводили только лишь в водных растворах. Попытки стабилизировать ферменты, чтобы заставить их работать в органической среде, заканчивались, как правило, неудачей<sup>8</sup>. Поэтому метод включения ферментов в обращенные мицеллы открыл новый этап в прикладной энзимологии. Действительно, мицеллярные реакционные среды были буквально на лету подхвачены инженерной энзимологией, и уже сейчас можно указать на первые успехи.

**Органический синтез.** Биокатализ прочно вошел в арсенал современных методов тонкого органического синтеза. Так, с помощью ферментов можно получать оптически активные аминокислоты и органические кислоты, модифицировать антибиотики, синтезировать пептиды, олиго- и полинуклеотиды, вводить радиоактивную метку в белки, нуклеиновые кис-

лоты и нуклеозидтрифосфаты, получать фосфолипиды, специфически расщеплять биополимеры (белки, целлюлозу, крахмал и др.). Более того, во многих развитых странах мира создан ряд технологических процессов, использующих биокатализ.

Несмотря на уже существующий широкий фронт работ, мицеллярная (или микроэмульсионная) водно-органическая среда позволяет тем не менее раздвинуть границы использования ферментов в химической практике. Во-первых, стало возмож-

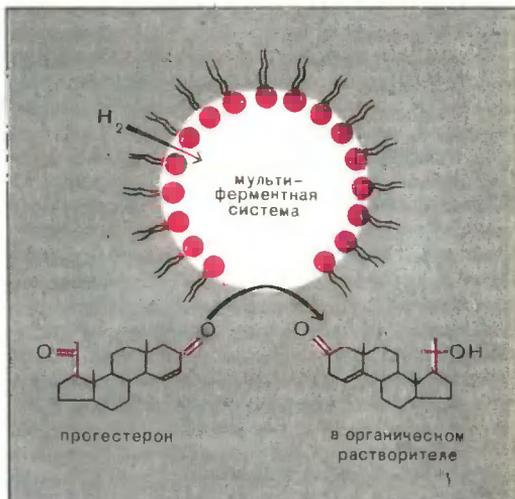


Рис. 6. Ферментативное превращение почти нерастворимого в воде стероида прогестерона (по К. Лейну, 1983 г.) в коллоидном растворе воды в органическом растворителе. Восстановление прогестерона молекулярным водородом катализирует сопряженная система трех ферментов (гидрогеназы, липоамиддегидрогеназы, стероиддегидрогеназы).

ным проводить биокаталитическое превращение водонерастворимых соединений, таких как стероиды, простагландины, липиды, жиры, некоторые нефтепродукты и др.

Захватывающий пример с далеко идущими перспективами — это превращение стероида прогестерона в его 20-В-оксиформу (рис. 6). Химику-органику трудно себе представить, что с помощью молекулярного водорода можно избирательно восстановить лишь одну из кетогрупп. Однако подобного рода химические чудеса вполне под силу ферментам.

Во-вторых, в традиционной среде ферментативных реакций, т. е. в воде,

<sup>7</sup> Введение в прикладную энзимологию. Под ред. Березина И. В. и Мартинака К. М., 1982.

<sup>8</sup> Успехи биоорганического катализа. Под ред. Березина И. В. и Мартинака К. М., 1979.

равновесие многих практически важных реакций сильно сдвинуто в сторону исходных реагентов. Это относится прежде всего к таким процессам, где исходные реагенты ионизованы и, следовательно, сильно гидратированы, или же в качестве одного из продуктов образуется вода, как, например, при полимеризации сахаров или аминокислот (в пептидном синтезе), в реакциях дегидратации и т. п. Неблагоприятную (с точки зрения термодинамики) ситуацию можно изменить именно в мицеллярной среде. Чтобы увеличить выход



Рис. 7. Схема ферментативного синтеза, протекающего в коллоидном растворе воды в органическом растворителе. Синтетическая реакция в такой микрэгетерогенной среде характеризуется двумя важными показателями: во-первых, это высокая скорость процесса за счет катализа ферментом, включенным в обращенные мицеллы; во-вторых, высокий выход синтеза, обусловленный экстракцией продукта в органический растворитель.

продукта, достаточно или снизить содержание водного компонента реакционной среды, или подобрать такой органический растворитель, который бы эффективно экстрагировал продукт (рис. 7).

Ферментативные методы анализа широко применяются в медицинской диагностике. С помощью ферментов, используемых как чувствительные датчики (часто в виде ферментных электродов), можно селективно определять в крови, моче, тканях и других биологических объектах малые количества метаболитов или физиологически активных соединений, таких как мочевины, мочевая кислота, аминокислоты,

сахара, спирты, липиды, холестерин, нуклеотиды, антибиотики и др. В клинических и биохимических лабораториях разработан также ряд избирательных и чувствительных методов определения с помощью ферментов ионов металла, неорганических анионов, перекиси водорода, кислорода.

Однако до сих пор применение ферментов в аналитических целях ограничивалось главным образом водорастворимыми соединениями. В свою очередь, создание мицеллярной реакционной среды позволяет распространить идеологию

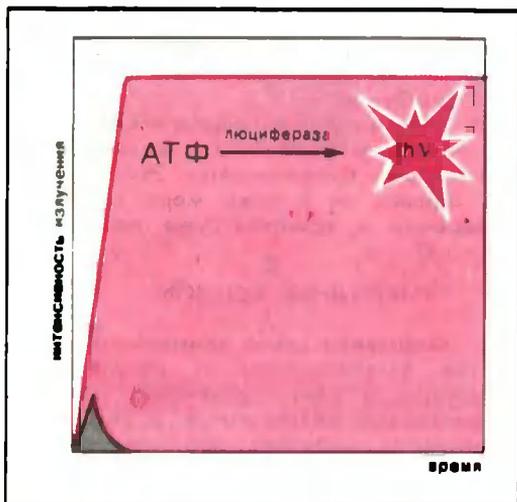


Рис. 8. Увеличение чувствительности биолюминесцентного анализа с помощью поверхностно-активных веществ.

В основе метода лежит биолюминесцентная реакция, при которой часть энергии исходных реагентов выделяется в виде света. Иными словами, фермент люцифераза, катализирующий эту реакцию, отзывается на присутствие важнейшего метаболита АТФ свечением, которое удобно регистрировать. Видно, что чувствительность метода можно повысить с помощью поверхностно-активного вещества (липида) не только за счет увеличения амплитуды сигнала, но и прежде всего в результате изменения его формы (цветная кривая): если в воде световой сигнал затухает обычно через несколько секунд (черная кривая), включение фермента в мембраноподобную систему позволяет наблюдать свечение в течение часов. В результате чувствительность метода возрастает в тысячи и более раз.

и технику известных ферментативных аналитических подходов также и к водонерастворимым соединениям. В этом отношении совершенно новые горизонты открываются для контроля и охраны окружающей среды, и прежде всего для экспрессного определения пестицидов и других плохо растворимых в воде соеди-

нений, загрязняющих живую природу или даже поражающих человека.

Второй, не менее важный аспект мицеллярного подхода заключается в том, что фермент, включенный в обращенную мицеллу, приобретает более высокую каталитическую активность; это повышает чувствительность анализа. В работах, проведенных в Московском государственном университете, именно таким путем удалось усовершенствовать биолюминесцентный метод, получивший в последние годы широкое распространение (рис. 8).

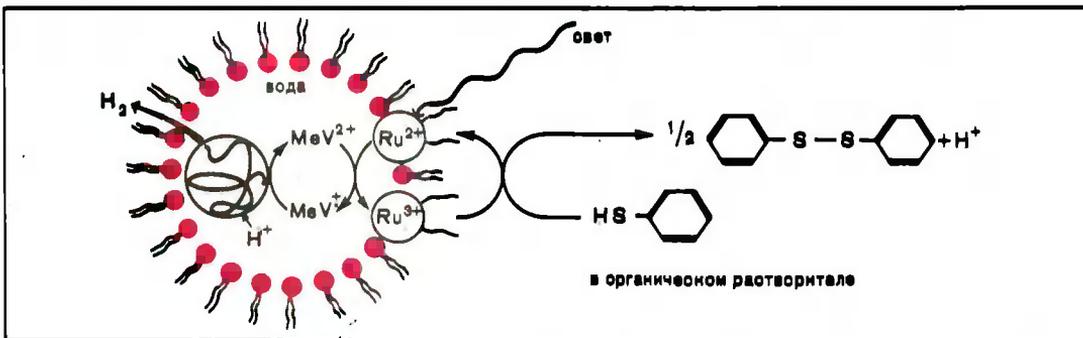


Рис. 9. Одна из моделей биофотоллиза воды (по К. Лайну, 1982 г.). Образование водорода катализируется ферментом гидрогеназой, включенной в обращенные мицеллы в смеси хлороформа с октаном. В фотохимической реакции, сопряженной с ферментативным процессом, принимают участие серосодержащие соединения (в органическом растворителе), катионы рутения (Ru), находящиеся в поверхностном слое мицеллы, и метилвиологен (MeV), известный переносчик электронов. Скорость процесса 1 мл  $H_2$ /мин на 1 мг гидрогеназы при квантовом выходе 2 %.

Биолюминесцентный анализ используют в пищевой и фармакологической промышленности для контроля за скоростью ферментации, для обнаружения микробного заражения (при контроле качества продукции в производстве пищи, лекарств, косметики и т. д.), для обнаружения следов жизни в космосе, в медицине (для определения чувствительности к антибиотикам, для оценки жизнеспособности эритроцитов, мышечной активности, активности гормонов, диагностики инфаркта миокарда, в иммуноанализе) и, наконец, в контроле качества воды, а прежде всего, сточных вод, а также во многих других процессах<sup>9</sup>.

**Биоконверсия энергии.** При решении энергетических проблем будущего придется, очевидно, более широко пользоваться солнечной энергией. Один из наиболее перспективных путей — это разложение воды для получения водорода в качестве горючего. Привлекательность его состоит в следующем: во-первых, газоблагодатный водород прекрасно транспортируема, во-вторых, исходное сырье возобновляется, поскольку в результате сгорания ( $2H_2 + O_2 = 2H_2O$ ) снова образуется вода, и, в-третьих, отсутствуют такие про-

дукты сгорания, которые загрязняли бы окружающую среду.

Поставленную цель удалось достичь, правда, пока в лабораторном масштабе, на базе природного фотосинтеза. Согласно современным представлениям, при фотосинтезе в растениях и микроскопических водорослях фотоокисление воды сопровождается фотопереносом электронов на некоторые переносчики электронно-транспортной цепи. Следовательно, физико-химикам нужно было научиться направлять этот поток электронов на протоны, и тогда на выходе образуется молекулярный водород (рис. 9).

Химическая модификация белка водонерастворимыми соединениями. Некоторые клетки животных и человека умеют удивительно просто увеличивать гидрофобность белковых молекул и гликопротеинов, чтобы усилить их взаимодействие с биомембранами. Этот эффект достигается простым замещением ионов водорода в макромолекуле остатками жирных кислот (т. е. ацилированием). Молекулярный механизм такой химической модификации в клетке пока неясен, однако эту идею можно использовать для создания нового типа гидрофобных белковых препаратов, обладающих физиологической (терапевтической) активностью.

<sup>9</sup> Химическая энзимология. Под ред. Березина И. В. и Мартиника К. М., 1983.

Ацилирование белка в лабораторных условиях, например, хлорангидридами пальмитиновой или стеариновой кислот вряд ли стоит проводить в водном растворе, где реагенты практически нерастворимы. В этом случае реакция протекает в гетерогенных условиях, т. е. на поверхности микрокапелек ацилирующего реагента; следовательно, остановить реакцию сразу же после модификации глобулы «в одной точке» нельзя. Дело в том, что в результате даже «одноточечной» модификации белка усиливается его адсорбция на микрокапельке, с которой он реагирует, и поэтому реакция заканчивается лишь с введением в белковую молекулу большого числа углеводородных фрагментов. Такой препарат, однако, полностью нерастворим в воде и не имеет практической ценности. В Московском государственном университете впервые провели химическую модификацию белка в микрогетерогенной среде обращенных мицелл в октане (рис. 10). Полученный белок сохранил достаточно высокую растворимость в воде и в то же время приобрел новое свойство: способность «бросать гидрофобный якорь» в мембранах.

**Медицина.** Белки с повышенной гидрофобностью найдут свое применение не только в фундаментальных исследованиях, но и в медицине. Связывание такого лекарственного препарата с мембранами, очевидно, задержит быстро выведение его из организма и продлит его терапевтический эффект. Более того, способность проходить сквозь мембраны может придать гидрофобизованному белку совершенно новые терапевтические свойства.

С помощью обращенных мицелл в органических растворителях удалось получить также и новый тип контейнеров для транспорта лекарств в организме. В первую очередь — это наногранулы размером всего лишь в несколько десятков ангстрем. Швейцарский исследователь А. Шпайсер получил их, заполнив внутреннюю полость обращенной мицеллы полимеризующимся составом.

Для медицины особый интерес представляют наногранулы, построенные из материала, постепенно разрушающегося в организме; в этом случае удастся обеспечить равномерное выделение из наногранул лекарственной начинки.

Другой тип депо для лекарственных препаратов дают полимеры, которые сами способны образовать в органическом растворителе обращенные мицеллы. Такого ро-

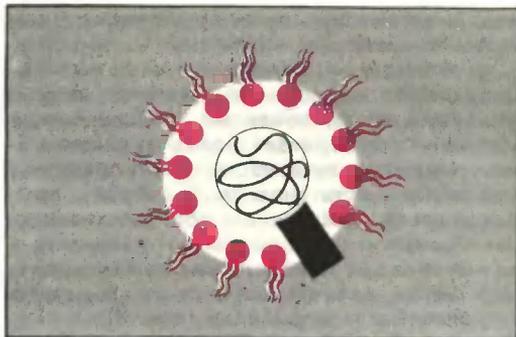


Рис. 10. Схема химической модификации белка водонерастворимым реагентом (обозначен черным цветом).

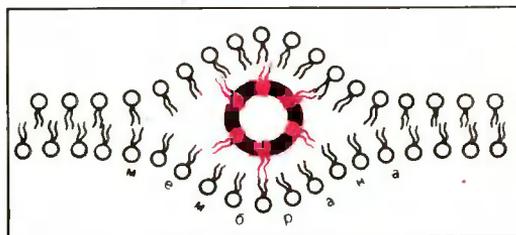
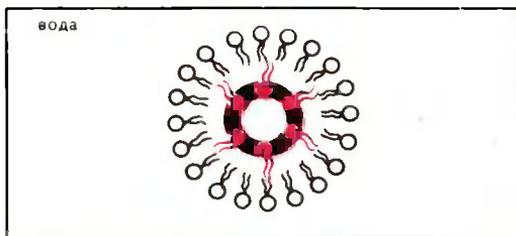
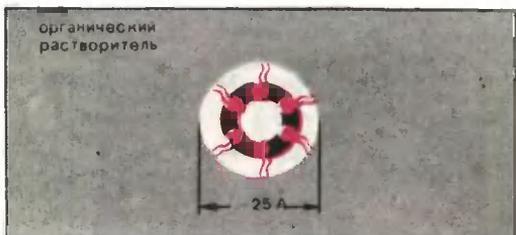


Рис. 11. Нанокансулы. Из гребнеобразных полимеров, содержащих как гидрофобные, так и гидрофильные фрагменты, в органических растворителях можно сформировать частицы, наполняющие своим строением обращенные мицеллы (вверху). Полярное ядро способно захватывать, например, лекарственные препараты. Важнейшее свойство таких контейнеров состоит в том, что они могут «перепредаться». Так, в водном растворе липидов они самопроизвольно дстраиваются в бислой (в середине). Устойчивость таких бислойных образований, лишь внешне напоминающих липосомы, обеспечивается их полимерным ядром. При взаимодействии с мембраной бислойная частица может снять верхнюю липидную «шубу» (внизу), а прохода через мембрану, может снова «шубу надеть», воспользовавшись для этого липидами самой мембраны.

да нанокапсулы (в виде полимерной оболочки) выгодно отличаются от известных липосом тем, что они существенно меньших размеров. Если размер липосом превышает 250 Å, то размеры обращенных мицелл значительно меньше. Следовательно, они должны обладать существенно большей проходимостью в капиллярных системах организма. Кроме того, поверхностно-активные полимерные нанокапсулы способны «переодеваться» (рис. 11).

### БУДУЩЕЕ МИЦЕЛЛЯРНОЙ ЭНЗИМОЛОГИИ

Итак, мицеллярная энзимология — это новое направление физико-химической биологии, изучающее катализ ферментами, включенными в обращенные мицеллы. Ключевые же задачи этой новой развивающейся области?

Прежде всего, нет сомнений, что мицеллярная энзимология вполне способна отразить если не реальную, то вполне реалистичную картину функционирования ферментов *in vivo*. Дело в том, что ассоциаты «поверхностно-активное вещество — вода — белок», спонтанно образующиеся в среде органического растворителя, представляют собой прекрасную модель элементарных фрагментов биомембранных структур. Однако за первыми открытиями необходимы дальнейшие более глубокие исследования. Так, изучение каталитических свойств мицеллярных ферментов в зависимости от степени гидратации и химической природы поверхностно-активных веществ позволит количественно оценить роль, которую играет вода, а также гидрофобность и вязкость микросреды не только в структуре белка, но и в механизме ферментативного катализа.

Использование липидов как мицеллообразующего компонента открывает новый путь к изучению механизмов регуляции липид-зависимых ферментов. Новое состоит в том, что при образовании мицелл в органических растворителях в отличие от водного раствора белок-липидные ансамбли формируются в условиях весьма ограниченной гидратации или вовсе в отсутствии воды.

Новые возможности открываются перед криоэнзимологией, поскольку вода, включенная в обращенные мицеллы, замерзает значительно ниже 0 °С. Возможно, с понижением температуры удастся (сохраняя жидкое состояние и прозрачность системы) настолько замедлить каталитические стадии фермент-субстратного взаи-

модействия, что можно будет зафиксировать ранее неизвестные промежуточные соединения. В принципе, уже сейчас мицеллярные криоэнзимологические приемы позволяют гораздо шире изучать влияние температуры на структуру белка и механизм катализа.

Мицеллярная энзимология привлекательна также тем, что она широко выходит в практику, и прежде всего в такие области, как тонкий органический синтез, химический и клинический анализ, терапия, биоконверсия энергии и массы. Вообще говоря, ферменты в коллоидном растворе воды в органических растворителях могут быть использованы, как правило, с большей эффективностью везде, где сейчас применяются лишь водные растворы.

Цель этой статьи будет достигнута, если у читателя возникнет мысль, что мицеллярная энзимология заслуживает дальнейшего развития. Энтузиазм автора, однако, ни в коей мере не следует понимать упрощенно, как призыв: «Долой «водную» энзимологию!» Хотелось лишь подчеркнуть то, о чем мы стали забывать, а именно: «фермент в воде» — это всего лишь одна из крайних форм его существования. Другой крайний случай — это фермент в органическом растворителе при полном отсутствии воды (в «сухих» мицеллах). А истина? Ее следует искать путем подбора оптимального микроокружения молекулы биокатализатора. Конечно, сама идея о решающей роли микроокружения в биокатализе не нова, поскольку хорошо известно, что «биологически активный белок не существует сам по себе»<sup>10</sup>. Новым является мицеллярный подход. Для того чтобы решиться взять его на вооружение и сломать устоявшуюся рутину, полезно вспомнить, как часто «мы ходим вокруг да около и гадаем, а Истина сидит рядом и помалкивает»<sup>11</sup>.

<sup>10</sup> Волькенштейн М. В. Физика ферментов. М., 1967, с. 24.

<sup>11</sup> Фрост Р. Скрытая истина. Цит. по: Дю-га Г., Пенни К. Биоорганическая химия, с. 263.

## Все ли понятно в феномене Окло?



Ю. А. Шуколюков



Юрий Александрович Шуколюков, доктор химических наук, заместитель директора Института геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского АН СССР, заведующий лабораторией геохимии изотопов того же института, профессор Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова. Специалист в области изотопной геохимии, космохимии, и геохронологии.

Я бы хотел рассказать об изучении одного интересного природного явления. Мне довелось участвовать в этом исследовании. Конца ему пока не видно, но уже и сейчас результаты кажутся нетривиальными.

Началась эта история очень давно. Япония, 1945 г...

В конце августа 1945 г. в маленькое дачное местечко на о-ве Киушиу на имя молодого талантливого геофизика П. Курода пришла телеграмма из Императорского университета Токио. Его срочно вызывали в Хиросиму для изучения последствий взрыва американской атомной бомбы. Курода обдумал приглашение и... не ответил на него: он решил, что такое исследование не будет иметь большого научного значения. И только возвращаясь через Хиросиму в Токио из отпуска, взглянув с уцелевшей вокзальной платформы на руины, Курода осознал весь кошмар и грандиозность разрушений. Именно в этот миг, потрясенный масштабом катастрофы, молодой ученый впервые задумался над возможностью самопроизвольных грандиозных цепных ядерных реакций и в природе. Курода вспоминал: где-то он уже читал об этом! Да, конечно, незадолго до второй мировой войны японец М. Одагири и француз Ж. Нэтцлин уже высказывали в печати предположения о возможности каких-то

мощнейших ядерных реакций в недрах Земли. И вот после пуска первых ядерных реакторов и взрыва первых атомных бомб это перестало казаться фантастикой... Идея природных цепных реакций настолько захватила Куроду, что он остался верен ей на всю жизнь. Впрочем, тогда многие бросились искать следы природных «ядерных реакторов» или следы природных «атомных бомб»...

США, 40—50-е годы...

Теперь, 40 лет спустя, нам кажутся наивными эти бессистемные поиски впотымах. Но их было немало. Пример — поиски следов деления в тухолите. Этот минерал со странным названием привлек внимание потому, что он содержит все компоненты, нужные формально для начала цепной реакции деления: «горючее» — торий (Th) и уран (U) — и замедлители — углерод (C), водород (H) и кислород (O) (потому и «ThUCHOлит»). Американец Дж. Опп предпринял попытку обнаружить в тухолите дефицит, «выгорание», изотопа  $^{235}\text{U}$ , способного к делению под действием медленных нейтронов. Были выполнены тщательные измерения изотопного состава урана, но изотопная распространенность  $^{235}\text{U}$  оказалась совершенно нормальной. Другому американцу — Дж. Мэрблу пришла мысль: не являются ли редкоземельные элементы, часто встречающиеся в урановых рудах,

продуктами цепной реакции деления? Он даже опубликовал заметку об этом в солидном научном журнале. Но последующие измерения показали, что изотопный состав этих элементов в урановых рудах нормален. Между тем при цепной реакции деления неизбежно должны бы образоваться редкоземельные элементы с очень специфическим изотопным составом. Следовательно, редкоземельные элементы попадают в урановые руды в геохимических процессах.

В поиски, проводившиеся американскими учеными, в это же время включился и Курода. Впрочем, он был приглашен летом 1952 г. на должность ассистента профессора Арканзасского университета в Файетвилле и стал с тех времен американским подданным. Вместе со своими аспирантами он начал интенсивно изучать радиоактивные изотопы стронция —  $^{89}\text{Sr}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  и другие — в водах горячих источников Национального парка в штате Арканзас. Не подогревается ли вода в недрах теплом цепной реакции? Если это так, из недр должны были бы поступать не только тепло, но и радиоактивные продукты этой реакции, вроде изотопов стронция. Такова была идея Куроды и его учеников. Однако никаких аномалий в радиоактивных изотопах не обнаруживалось.

В эти же годы на одной из конференций в США американцы Дж. Везерилл и П. Инграм высказали идею, что цепная реакция деления может сама по себе начаться не «вообще в недрах», а в крупных урановых месторождениях. И лучше всего искать следы такого процесса по стабильным изотомам ксенона и криптона. Они всегда образуются при делении ядер в таком соотношении, которое резко отличается от нормального их соотношения в воздухе. Американцы исследовали ксенон из нескольких урановых месторождений. Но увы, изотопных признаков цепной реакции деления не нашли. Поэтому поиски по ксенону они прекратили.

Ленинград, 50—60-е годы...

Каждую неделю я, начинающий аспирант Лаборатории геологии докембрия АН СССР, ходил на выставку новых поступлений научной литературы в Библиотеку Академии наук СССР. В один из весенних дней 1957 г., просматривая западно-германский журнал «Naturwissenschaften» я наткнулся на маленькую, всего на одну страницу, статью некоего (тогда мне не известного) П. Куроды<sup>1</sup>. Статья мне показана

лась забавной, да уж теперь сознаюсь, просто безумной. Автор привел расчеты, из которых следовало, что в древние геологические эпохи в крупных урановых месторождениях в недрах Земли сами по себе легко могли возникать такие условия, что в них начинали работать ядерные реакторы. Автор в количественной форме выразил эти условия. И это после того, как в литературе уже описывали огромные технические трудности, с которыми было связано создание первых американских и советских ядерных реакторов! «Ради смеха» я показал заметку Куроды своему учителю, профессору Э. К. Герлингу. Эрих Карлович гораздо серьезнее, чем его аспирант, отнесся к ней и буквально заставил меня повторить расчеты Куроды.

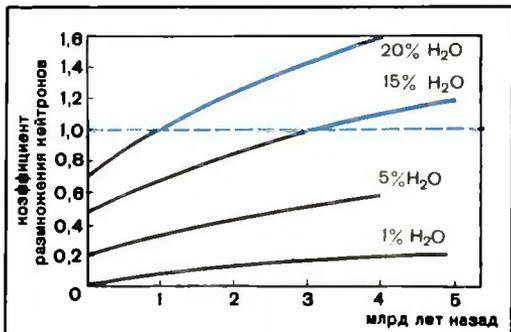
В этих расчетах нужно было учесть многое. Во-первых, что в любом урановом месторождении уран состоит из легкого ( $^{235}\text{U}$ ) и тяжелого ( $^{238}\text{U}$ ) изотопов. Сейчас их соотношение 1:138. Но период полураспада  $^{235}\text{U}$  — 720 млн лет. Значит, 720 млн лет назад во всех месторождениях  $^{235}\text{U}$  было в 2 раза больше, чем сейчас, 1440 млн лет назад — в 4 раза больше, 2160 млн лет назад — в 8 раз больше... Таким образом, в древних урановых месторождениях уран был обогащен ядерным «горючим» — изотопом  $^{235}\text{U}$ . Его называют ядерным горючим потому, что его атомные ядра легко расщепляются нейтронами небольшой энергии (медленными нейтронами), и при этом выделяется тепло. Ядра атомов тяжелого изотопа  $^{238}\text{U}$  расщепляются только при попадании в них быстрых нейтронов с энергией в миллионы раз большей. Вероятность такой реакции мала. К тому же при промежуточной энергии атомные ядра  $^{238}\text{U}$  обладают способностью захватывать, поглощать нейтроны без последующего деления<sup>2</sup>.

Очень важная особенность процесса деления состоит в том, что при каждом расщеплении ядра урана испускаются 2—3 нейтрона. Иными словами, деление вызывается одним нейтроном, а взамен появляются 2—3 новых. Казалось бы, так действительно может развиться цепная реакция. Но в расчете нужно было учесть еще, что часть нейтронов выходит из игры за счет бесполезного для реакции поглощения их ядрами атомов других элементов, входящих в состав урановой руды, например редкоземельных элементов. К тому же и сам  $^{238}\text{U}$  относится к таким

<sup>2</sup> Подробнее об этом см.: Шуклюков в Ю. А. Продукты деления тяжелых элементов на Земле. М., 1982.

<sup>1</sup> Kuroda P. K. — J. Chem. Phys., 1956, v. 25, p. 781.

«вредным» поглотителям. Мало того, ядерное горючее  $^{235}\text{U}$  хорошо делится под действием медленных нейтронов и плохо — под действием быстрых. Следовательно, цепной реакции благоприятствует замедление нейтронов. Главный природный замедлитель нейтронов — вода. Многократно ударяясь о молекулы воды, быстрые нейтроны постепенно растрачивают свою кинетическую энергию и в конце концов превращаются в тепловые, способные вызывать деление все новых и новых ядер  $^{235}\text{U}$ .



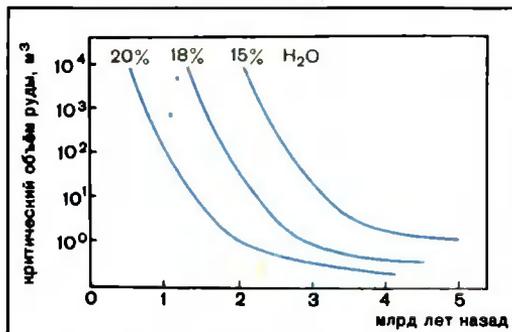
Коэффициент размножения нейтронов в бесконечно большом рудном теле, содержащем 50 % урана. При достаточной концентрации воды и древнем возрасте руды (коэффициент размножения в этом случае равен или больше единицы) начинает работать природный ядерный реактор — происходит цепная реакция деления урана.

В расчетах оценивают, сколько нейтронов получится после того, как нейтроны первого поколения будут частично поглощены ядрами атомов элементов-примесей и урана, а к ним добавится некоторое число новорожденных нейтронов от деления ядер  $^{235}\text{U}$  и  $^{238}\text{U}$ . Получившиеся после всех этих процессов нейтроны называются нейтронами второго поколения. Если число нейтронов второго поколения больше, чем первого (коэффициент размножения больше 1) — развивается цепная реакция. Если во втором поколении нейтронов меньше (коэффициент размножения меньше 1) — процесс затухает, цепная реакция невозможна.

Для простоты в расчетах пренебрегают утечкой нейтронов из урановых рудных тел. Это можно сделать потому, что за свою «жизнь» нейтрону удается пробежать в руде несколько десятков сантиметров. Следовательно, из рудного тела «утекают» нейтроны, начавшие свой путь на глубине

не более нескольких десятков сантиметров, т. е. нейтроны испускаются из наружного слоя рудного тела, который имеет такую толщину. Из внутренних частей рудного тела нейтроны не могут вылететь. Поэтому при достаточно большом рудном теле, скажем, с линейными размерами в десятки метров, наружный слой составляет мизерную часть объема. Соответственно, и число утекающих нейтронов пренебрежимо мало.

Расчеты Куроды полностью подтвердились! При большой концентрации урана, большом обогащении горючим  $^{235}\text{U}$  (что



Зависимость критического объема рудного тела, при котором начинается цепная реакция, от времени его образования и концентрации воды в руде. При исходном содержании урана в руде, близком к 50 %, и высоком содержании воды (15—20 %) достаточно было в древнем урановом месторождении сформироваться рудному телу объемом в несколько кубометров, чтобы в нем заработал природный ядерный реактор.

характерно для древних месторождений), при достаточном количестве замедлителя — воды — в урановых месторождениях должны были функционировать природные ядерные реакторы.

Мы пошли дальше и рассчитали коэффициенты размножения нейтронов для рудных тел небольшого объема, учтя утечку нейтронов из них. Каково же было наше удивление, когда оказалось, что в древние геологические эпохи достаточно было на Земле образоваться рудному урановому телу объемом всего в несколько кубометров, чтобы в нем самопроизвольно началась цепная реакция деления! Можно было ожидать следы этого процесса во многих месторождениях. Мы немедленно начали их поиски, выбрав самый чувствительный метод — ксеноновый. При делении одно ядро атома  $^{235}\text{U}$  может расщепиться на две частицы примерно пятидесятью разными способами. Осколки могут иметь массовое число в пределах от 70 до 170 и

являться ядрами атомов разных элементов. В 20 случаях из 100 осколками деления оказываются атомные ядра ксенона. Преимущество ксенонового метода поисков следов цепной реакции состоит в том, что природный фон ксенона в миллионы раз меньше фона других элементов. С помощью масс-спектрометров в те годы мы могли обнаружить примерно  $10^{-11}$  см<sup>3</sup> ксенона, т. е. около  $10^{-14}$  г.

Были исследованы образцы из десятков урановых месторождений СССР и других стран. Но ни в одном из них не было найдено избытка ксенона, который мог бы указывать на прошедшую цепную реакцию деления<sup>3</sup>. Более 10 лет вели мы поиски, но ответ был неутешительным: несмотря на возможность, цепная ядерная реакция, видимо, не была реализована в природе.

США, 60-е годы...

В то же время Комиссия по атомной энергии США также предприняла широкие поиски возможных следов природных ядерных реакторов. Но американские исследователи избрали иной метод: они пытались обнаружить не продукты цепной реакции в виде ксенона, а признаки «выгорания» изотопа <sup>235</sup>U. Для этого были разработаны очень точные методы изотопного анализа урана. Достаточно было дефицита изотопной распространенности <sup>235</sup>U всего в 0,05 %, чтобы он был тотчас обнаружен. Американцы засекретили эти работы и на протяжении почти 10 лет выполнили многие тысячи изотопных анализов природного урана. К 1963 г. Комиссия уже располагала многочисленными данными, из которых следовало, что в природе есть, хотя и небольшие, но измеримые сдвиги изотопного отношения <sup>238</sup>U/<sup>235</sup>U. Эти данные были извлечены из секретных сейфов и опубликованы американцами в 1976 г.<sup>4</sup> Но увы! Небольшие вариации изотопного состава урана легко объяснялись масс-фракционированием, т. е. разделением изотопов при растворении, осаждении, миграции урана. Не было только никаких признаков цепной реакции деления...

Франция — Республика Габон, 1972 г...

Июньский день, такой же как и многие другие для инженеров одной из лабораторий Комиссариата по атомной энергии Франции: скучные рутинные анализы... Инженеры-химики определяют изотопный состав урана, чтобы приготовить стандартный

раствор. И вдруг вместо нормальной величины концентрации <sup>235</sup>U, равной 0,7202 %, получилось чуть-чуть иное значение: 0,7171 %. Выяснили, откуда попал в лабораторию этот уран. Оказалось, с завода, где получали полуфабрикат для атомной промышленности — летучее соединение UF<sub>6</sub>. Проверили изотопный состав этого полуфабриката — а в нем дефицит изотопа <sup>235</sup>U еще больше! Организовали целое химическое «следствие». За две недели сделали 350 изотопных анализов урана и обнаружили обедненный уран сначала в концентратах, а затем и в сырой руде, поставляемой во Францию из Африки. Источником обедненного урана оказалось месторождение Окло в Республике Габон, крупные рудные тела которого толщиной в 0,5—1 м и протяженностью в десятки метров содержали до 60 % урана<sup>5</sup>. Уж не природные ли реакторы скрыты в них?! Обеднение изотопом <sup>235</sup>U достигало в некоторых точках этих тел 50 %. Французская атомная промышленность за годы эксплуатации месторождения Окло недополучила 200 кг изотопа <sup>235</sup>U. Но если <sup>235</sup>U «выгорел» столь сильно, должны были накопиться такие же количества продуктов деления урана. Срочно сделали изотопные анализы других элементов. Обнаружились невиданные изотопные сдвиги — в сотни и тысячи процентов относительно нормального изотопного состава. Оказалось, что особенно велики избытки как раз тех изотопов, которые должны образоваться при цепной реакции деления <sup>235</sup>U, например некоторых изотопов неодима, самария, рутения и, конечно, ксенона.

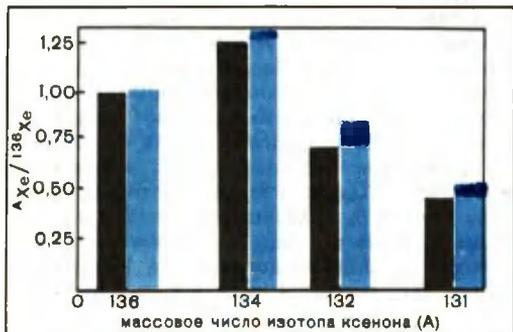
«Ураганские» избытки некоторых изотопов и одновременно дефицит других явно указывали на облучение огромным потоком нейтронов месторождения Окло. Под действием такого потока одни изотопы «выгорели», но зато образовались другие:  $^{143}\text{Nd} + n \rightarrow ^{144}\text{Nd}$ ;  $^{147}\text{Sm} + n \rightarrow ^{148}\text{Sm} \dots$  (n — нейтрон). Это дало возможность считать поток нейтронов в месторождении Окло: каждый кубический сантиметр руды был «протрелен» примерно  $10^{21}$  нейтронами. Во всем месторождении при работе природного реактора было выделено столько тепла, сколько его дает за год современная мощная атомная электростанция. Но не следует думать, будто в месторождении Окло шла очень бурная цепная реакция — с гулом, шипением пара и т. п.

<sup>3</sup> Шуколоков Ю. А. Деление ядер урана в природе. М., 1970.

<sup>4</sup> Cowan G. A., Adler H. H. — Geochim. et cosmochim. acta, 1976, v. 40, № 12, p. 1487.

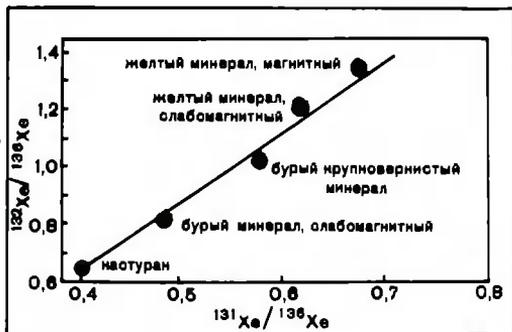
<sup>5</sup> Эклунд З. Окло — ядерный реактор, запущенный за 18 млн веков до нашей эры. — Природа, 1975, № 11, с. 72.

Вовсе нет, реакция скорее «тлеет». Началась она 2 млрд лет назад и длилась примерно 0,5 млн лет. Температура никогда не превышала 300—600 °С, потому что природный реактор был саморегулирующейся системой. Повысится температура — и из зоны реакции удаляется вода. Но это уменьшает число замедленных нейтронов, особенно эффективно вызывающих деление атомных ядер  $^{235}\text{U}$ . Реакция затухает, рудное тело остывает. В него снова набирается вода — замедлитель нейтронов. Создаются благоприятные условия для возобновления



Диаграмма, иллюстрирующая избыток некоторых изотопов ксенона в пробах урановой руды из месторождения Оило. Цветные столбики показывают аномальное соотношение изотопов ксенона, черные — соответствуют нормальному соотношению изотопов ксенона, возникающему при делении  $^{235}\text{U}$ .

возобновления в один из научно-исследовательских институтов СССР. Я внимательно следил за советской научной литературой и выбрал Ленинград, Институт геологии и геохронологии докембрия АН СССР, где изучали природные ядерные процессы. И когда мне предложили исследовать вещество из эпицентра цепной ядерной реакции деления урана в месторождении Окло, я не колеблясь согласился. В этом веществе (почти чистой урановой смоляной руде — настуране) изотопный состав ксенона в общем был таким, каким ему полагается



Отклонение изотопных соотношений ксенона от нормальной величины. Аномальный по изотопному составу ксенон сконцентрирован не в основном урановом минерале — настуране, а в особой минеральной фазе — диоктаэдрической слюде, составляющей ничтожную часть руды и названной нами «желтым минералом».

и «разгорания» реакции. Температура начинает снова возрастать. Но при достижении определенной температуры снова удаляется вода, реакция замедляется и т. д. Теория Куроды торжествовала: цепная реакция деления урана в природе действительно происходила!

Таким образом, судьба распорядилась по-своему: хотя и в СССР, и в США исследователи проводили многолетние целенаправленные интенсивные поиски природных реакторов, обнаружить их довелось совершенно случайно французским техническим специалистам... Но, как выяснилось, точку на этом ставить еще рано.

Ханой — Ленинград, 1975—1979 гг...

Известный ныне вьетнамский радиохимик Данг Ву Минь рассказывает: «После учебы в Московском государственном университете и нескольких лет работы на родине мне предложили поехать для дальнейшего профессионального совершенст-

вать при делении  $^{235}\text{U}$ , вызванном медленными нейтронами. Однако советские ученые<sup>6</sup> зафиксировали и небольшой, но несомненный избыток изотопов ксенона —  $^{132}\text{Xe}$ ,  $^{131}\text{Xe}$ ,  $^{134}\text{Xe}$ . Откуда бы ему взяться? Мы должны были понять это.

Сначала обнаружилось, что необычный ксенон выделяется из нагреваемой руды только при определенной температуре 500—800 °С. Мы заподозрили, что он содержится не собственно в настуране, а в каком-то другом минерале, входящем в состав руды. Но в каком и, главное, почему?

Разделили руду на фракции по магнитным свойствам, цвету, плотности — и предположения подтвердились: действи-

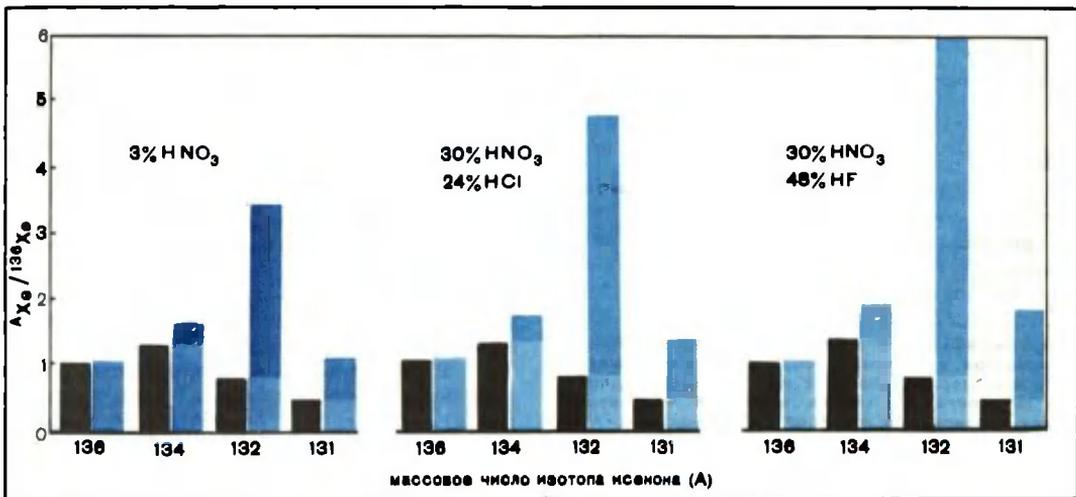
4

<sup>6</sup> Шуколюков Ю. А., Ашкинадзе Г. Ш., Верховский А. Б. и др. — Геохимия, 1977, № 7, с. 976.

тельно, аномальный ксенон сконцентрирован не в урановом минерале, а в какой-то иной минеральной фракции. По мере удаления настурана, содержащего обычный ксенон деления  $^{235}\text{U}$ , в остатках ксенон становился все более необычным. Чтобы устранить даже следы настурана, применили метод селективного растворения: действовали на руду растворами такого состава, что настуран растворился, а минерал — носитель аномального ксенона — сохранился в целости<sup>7</sup>. В этом минерале (рентгеновский анализ показал, что это, вероятно,

элементами могли бы быть барий и теллур. Облучили образцы бария и теллура в техническом реакторе потоком нейтронов, выделили из образцов ксенон и сравнили его изотопный состав с составом аномального ксенона. Оказалось, что они совершенно разные. Следовательно, такими реакциями аномальный ксенон не объяснить.

Не возникли ли аномальные изотопные соотношения в ходе диффузии ксенона из вещества природного ядерного реактора? Атомы изотопов ксенона могли оказаться в результате радиоактивных



Сравнение нормальных изотопных соотношений ксенона (черные столбики) и аномальных его соотношений (цветные столбики), полученных в результате частичного селективного растворения настурана. По мере растворения этого основного уранового минерала в кислотах, в оставшейся минеральной фазе обнаруживается все более аномальный по изотопному составу ксенон.

но, диоктаэдрическая слюда) аномалии достигли прямо-таки чудовищных размеров! Так, изотопные отношения  $^{132}\text{Xe}/^{130}\text{Xe}$  в 10 раз больше, чем в нормальном ксеноне, образуемом при делении  $^{235}\text{U}$  в техническом реакторе. Никто ни в одном земном или внеземном веществе не встречал такого странного ксенона.

Не образовался ли он под действием нейтронов на элементы-мишени? Такими

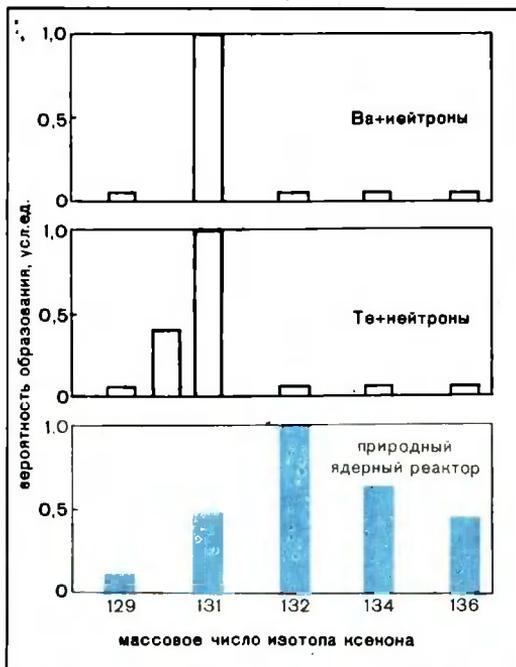
превращений их предшественников в несколько различных энергетических состояниях в структуре минерала. При прогреве поэтому некоторые из них могли диффундировать из минерала быстрее, некоторые — медленнее. А это могло бы привести к аномальным соотношениям оставшихся в минерале изотопов ксенона. Однако, когда исследовали обычные урановые минералы, из которых также диффундировал ксенон, никаких аномалий не обнаружили. Значит, и это объяснение неприемлемо.

Таким образом, мы открыли необычайные изотопные аномалии ксенона в природном ядерном реакторе в месторождении Окло в Африке, но объяснить их не могли. А мне, между тем, пришлось время возвращаться в Ханой», — заключил свой рассказ Данг Ву Минь.

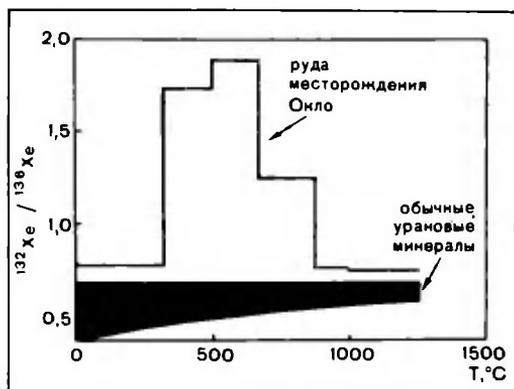
Москва, 1983 г...

Прошло несколько лет, и, к нашей взаимной радости, нам с Данг Ву Минем довелось снова встретиться. На этот раз — в Москве, в Институте геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского

<sup>7</sup> Шуколюков Ю. А., Данг Ву Минь, Павшук В. В. и др. — Геохимия, 1979, № 3, с. 427.



Сравнение аномального ксенона природного ядерного реактора с ксеноном, образующимся в искусственном ядерном реакторе при действии медленных нейтронов на мишени из бария и теллура. Разное соотношение изотопов свидетельствует, что этими ядерными реакциями нельзя объяснить происхождение аномального ксенона.



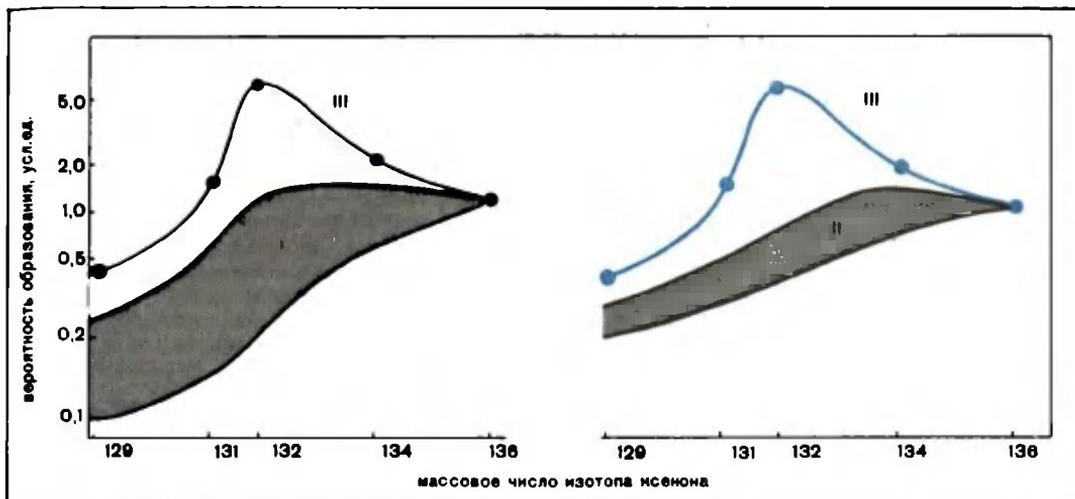
Сравнение изотопного состава ксенона из природного реактора и обычных урановых минералов. При диффузии ксенона из подвергаемых термической обработке урановых минералов не наблюдается таких аномальных изотопных соотношений, как в руде месторождения Окло. Следовательно, происхождение аномального ксенона нельзя объяснить процессами диффузии.

АН СССР. Данг Ву Миня направили в СССР для подготовки докторской диссертации, а я уже постоянно работал в этом институте. И конечно, одна из первых наших работ, в которой активно участвовал и физик А. П. Мешик, снова касалась эффекта Окло, нашего аномального ксенона. Насколько часто он встречается в рудных телах в месторождении Окло? Не случайное ли это отклонение? Были исследованы и другие образцы вещества, полученные из других скважин, прошедших сквозь разные рудные зоны. И снова мы обнаружили такой же аномальный ксенон с огромным избытком  $^{132}\text{Xe}$ ! Нет, это не случайность, природная цепная реакция деления, видимо, всегда генерирует такой необычный ксенон.

Что же за процесс привел к одновременному избытку сразу нескольких изотопов ксенона —  $^{134}\text{Xe}$ ,  $^{132}\text{Xe}$ ,  $^{131}\text{Xe}$ ,  $^{129}\text{Xe}$  — в рудном теле, где шла ядерная реакция? Таким процессом может быть только деление тяжелых ядер. Но ни один из известных химических элементов, способных к делению, не образует ксенон с такими необычными изотопными соотношениями, как в аномальном ксеноне в природном ядерном реакторе в Окло.

В аномальном ксеноне очень велик «всплеск» (физики говорят «тонкая структура») на изотопе  $^{132}\text{Xe}$ . Но вот что удивительно: как раз именно такой «всплеск» должен наблюдаться при делении очень тяжелых, далеких заурановых элементов. Дело в том, что энергетически очень выгодно образование так называемых «магических» ядер-осколков при делении. Они обладают особо прочными структурами, «скелетами» из протонов и нейтронов. Такая особая прочная структура образуется из «магических чисел» 50 или 82 нейтронов или протонов, или из 126 или 184 нейтронов при 114 протонах. А уж особенно энергетически выгодны сочетания «магического» числа нейтронов и протонов в одном ядре. Получаются «дважды магические» ядра. Так вот, образование изотопа  $^{132}\text{Xe}$  при делении идет как раз через дважды магическое ядро олова  $^{132}_{50}\text{Sn}$ : сначала образуется ядро олова, а затем оно превращается в ядро  $^{132}\text{Xe}$ . Именно этим и можно было бы объяснить «всплеск» на  $^{132}\text{Xe}$ .

Наша рабочая гипотеза состоит в том, что при действии природного ядерного реактора образовался радиоактивный, возможно, сверхтяжелый изотоп с относительно большим временем жизни. В ходе геохимических процессов уже после прекращения цепной реакции деления этот изотоп был сконцентрирован во вторичном,



Сравнение вероятности образования изотопов ксенона при делении самопроизвольном (I), нейтронно-индуцированным (II) и в природном ядерном реакторе (III). Ни в первом, ни во втором случае не получается ксенона с таким изотопным составом, как в руде месторождения Окло. Следовательно, делением известных изотопов происхождения аномального ксенона не объяснить.

новообразованном, слюдоподобном минерале. Последующее спонтанное (самопроизвольное) деление этого изотопа привело к накоплению загадочного аномального ксенона.

Но что за процесс мог привести к образованию такого зауранового долгоживущего изотопа? — вот вопрос, на который пока нет ответа...

Известно, что в потоке нейтронов действительно возможно «обрастание» атомных ядер нейтронами с образованием все более тяжелых элементов. Но время жизни этих элементов по мере их удаления от урана становится все короче. Правда, физики-теоретики не исключают существования «острова стабильности» где-то в области элемента № 114. Тем не менее сомнительно, что путем простого присоединения нейтронов к ядрам урана и следующих за ним элементов в природном ядерном реакторе мог быть достигнут этот самый остров: изотопы промежуточных элементов № 102, 103, 104 распадаются столь быстро, что не успевают захватывать нейтроны. Цепочка превращений прерывается.

Нельзя исключить, что аномальный ксенона образовался при делении каких-то новообразованных нейтронно-избыточных

аномальных атомных ядер легче урана. Например, тория, протактиния, актиния... Возможно, придется рассматривать совсем другие ядерные процессы. Но я надеюсь, что читателю осталось ясным главное: далеко не все загадки природной цепной реакции деления — эффекта Окло — разгаданы.

#### РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Ранкава К. ИЗОТОПЫ В ГЕОЛОГИИ. М.: ИЛ, 1956.

Шуклюков Ю. А. ДЕЛЕНИЕ ЯДЕР УРАНА В ПРИРОДЕ. М.: Атомиздат, 1970.

Шуклюков Ю. А., Данг Ву Минь, Ашкинадзе Г. Ш. САМОПРОИЗВОЛЬНАЯ ЦЕПНАЯ РЕАКЦИЯ ДЕЛЕНИЯ В МЕСТОРОЖДЕНИЯХ УРАНА.— В кн.: Проблемы геохронологии и геохимии изотопов. Л.: Наука, 1977.

Шуклюков Ю. А., Малышев В. И. и др. ПОИСКИ ПРОЯВЛЕНИЙ ЦЕПНОЙ ЯДЕРНОЙ РЕАКЦИИ ДЕЛЕНИЯ В ПРИРОДЕ.— Геохимия, 1980, № 1, с. 15.

Шуклюков Ю. А. ЧАСЫ НА МИЛЛИАРД ЛЕТ. М.: Энергоатомиздат, 1983.

## Слоистая структура алмаза

В. М. Мельниченко

Ю. Н. Никулин

А. М. Сладков

доктор химических наук

Москва

Две классические кристаллические формы углерода — алмаз и графит — знакомы человеку издавна. Третья аллотропная форма с цепочечным (линейным) строением углеродных макромолекул была синтезирована свыше 20 лет назад известным советским химиком, профессором А. М. Сладковым (1922—1982) с соавторами и названа ими карбином.

Предлагаемая вниманию читателей «Природы» статья интересна прежде всего с точки зрения единого подхода к рассмотрению всех углеродных структур. В ней предпринята попытка представить существующие в природе формы конденсированного углерода как системы, построенные из первичных структурных элементов двух типов: углеродных цепочек

История науки не знает имен первооткрывателей лишь десяти элементов из 105. К их числу относится и углерод. Он известен с глубокой древности — древесный уголь служил для восстановления металлов из руд, алмаз использовался как драгоценный камень. Позднее нашли применение и графиту — из него стали изготавливать тигли и стержни для карандашей. Химическая тождественность алмаза, графита и угля была окончательно установлена в 1797 г., однако еще за 10 лет до этого А. Лавуазье рассматривал углерод как отдельный химический элемент.

Углерод взаимодействует почти со всеми элементами таблицы Менделеева, образуя необъятное множество сложных веществ: углеводородов, органических соединений, полимеров, минералов и т. д. Число известных в настоящее время соединений углерода превышает 4 млн, а все остальные элементы образуют лишь около 250 тыс. соединений. Углерод — наиболее реакционно-способный элемент на Земле. Его атомы столь «общительны», что легко соединяются и между собой при повышенных температурах, образуя сложные системы.

Сейчас, пожалуй, нет такой отрасли народного хозяйства, где бы не исполь-

определенной длины и атомных слоев, «сшитых» между собой. Такой подход приводит к нетрадиционному взгляду на структуру алмаза. Он позволяет объяснить многообразие известных полиморфных модификаций углерода различием «упаковки» атомных слоев и наглядно описать фазовые переходы одних его форм в другие. Отличие от общепринятых кристаллографических представлений об алмазе оправдано в известной мере проблемным (а в ряде мест и дискуссионным) характером статьи и желанием авторов подчеркнуть основную идею подхода — общность, взаимосвязь и многообразие конденсированных форм углерода.

Академик Г. А. Разуваев

зовались те или иные формы углерода. Разработаны и осваиваются различные методы синтеза необычных углеродных материалов с особыми электрическими, магнитными, оптическими и механическими свойствами, которые находят разнообразные применения в электронике, медицине, космонавтике и других областях науки и техники. В принципе можно построить самолет или космический корабль из одного только углерода.

И тем не менее далеко не все возможности углерода еще раскрыты. Сейчас области науки, имеющие отношение к конденсированному углероду, переживают в некотором роде свое второе рождение. Идет становление новых технологий синтеза и применения экзотических форм углерода — карбинов<sup>1</sup>. С теоретической точки зрения, современный этап характеризуется критическим анализом установившихся представлений структурной химии углерода и развитием новых концепций — фундамента единой, интегрированной науки о конденсированном углероде как слож-

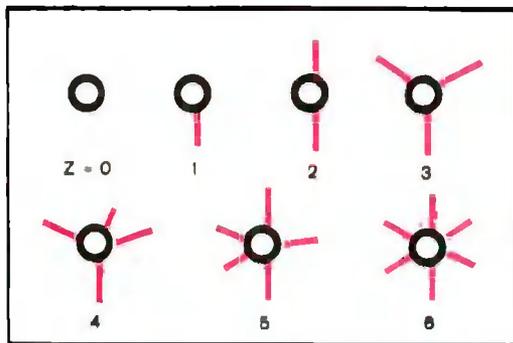
<sup>1</sup> Карбином принято называть кристаллическую форму углерода с цепочечной структурой. Подробнее об этом см.: Коршак В. В., Кудрявцев Ю. П., Сладков А. М. — Вестник АН СССР, 1978, № 1, с. 70.

ной системе. Этот объект все чаще рассматривается как высокомолекулярное соединение, построенное, вообще говоря, из химически нетождественных атомов сложной, неоднотипной природой макромолекулярных фрагментов, а также структурных единиц более высокого ранга. Различные формы углерода — на первый взгляд, столь простые вещества, состоящие, казалось бы, из одинаковых атомов, — фактически оказываются химическими соединениями переменного и неоднородного состава как в отношении отдельных атомов, так и макромолекулярных фрагментов, а также надмолекулярных образований всех уровней, вместе образующих многоступенчатую иерархию структур. Их изучение в целом находится еще на зачаточной стадии развития, и предстоит выполнить большой объем исследований, прежде чем будет достигнут необходимый уровень знаний.

### КООРДИНАЦИОННАЯ ХИМИЯ УГЛЕРОДА

Возможные электронные состояния связанного атома углерода определяются прежде всего так называемым координационным числом  $Z$ , т. е. числом присоединенных к нему атомов, которое, по современным данным, может изменяться от 0 до 6. Существует достаточно четкий критерий для решения вопроса о наличии либо отсутствии химической связи между атомами углерода, а следовательно, и об их принадлежности к одной и той же молекуле. Это — расстояние  $l$  между их ядрами. Для связанных атомов значения  $l$  укладываются в интервал 120—170 пм ( $1 \text{ пм} = 10^{-12} \text{ м}$ ), называемый зоной валентных расстояний. Меньшие расстояния не реализуются в обычных условиях из-за действия сил отталкивания. Интервал значений  $l$  от 170 до 280 пм представляет собой запрещенную область, большие же значения принадлежат уже зоне межмолекулярных взаимодействий.

Полимерный (конденсированный) углерод — это, вообще говоря, химическое соединение атомов с различными электронными конфигурациями (в основном с двумя, тремя и четырьмя связями). Распределение электронного облака вокруг связанного атома и, в частности величина углов между  $C-C$  связями, определяется, главным образом, расположением ядер. Так, в молекуле циклопропана ( $C_3H_6$ ) атомы углерода находятся в вершинах правильного треугольника и угол между  $C-C$  связями составляет всего  $60^\circ$ , а в алмазе он равен



Возможные координационные состояния атома углерода. Они определяются числом  $Z$  ближайших «соседей», с которыми данный атом образует химические связи (показаны цветными линиями). Соседние атомы не обязательно вводятся на одинаковых расстояниях от рассматриваемого. Чаще всего реализуются значения  $Z=2, 3, 4$ .

$109^\circ 28' 16''$ , хотя и в том, и в другом случаях атомы углерода имеют четырех соседей. Необходимо, однако, учитывать, что электронное состояние данного атома зависит не только от числа связанных с ним атомов, но и от их электронных состояний, геометрии окружающих фрагментов, межмолекулярных взаимодействий, в конце концов, от ядерной и электронной конфигурации всей системы.

### КРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ФОРМЫ УГЛЕРОДА

Сколько же существует кристаллических, точнее, регулярных<sup>2</sup> форм полимерного углерода? Современный ответ гласит — бесконечно много. Не две (графит

<sup>2</sup> Регулярность — термин зарождающейся обобщенной кристаллографии, означающий закономерное, чаще всего периодически повторяющееся расположение каких-либо автономных структурных единиц (не обязательно атомов) в одном из направлений или вдоль определенной кривой. Структура вещества на рассматриваемом уровне может быть регулярной в одних направлениях и нерегулярной (аморфной) — в других. Более того, структура может оказаться регулярной на одном уровне и аморфной — на другом. Например, в системе «порошок — крупинка — кристаллик — монослой — молекула» крупинки могут быть упакованы упорядоченным образом, а сами — обладать аморфной структурой, либо, наоборот, кристаллические крупинки можно расположить нерегулярно. Кристаллическость — более узкое понятие, означающее регулярность одноуровневой (атомной) системы сразу в 3-х измерениях. Подробнее об этом см.: Бернал Дж. Д., Карлайл С. Х. — Кристаллография, 1968, т. 13, № 5, с. 927.

и алмаз), как считали раньше, и не три (с учетом карбина), а неограниченное количество. Долго и трудно шли исследователи к этому выводу, но, хотя не все здесь еще ясно до конца, в своей основе он, вероятно, соответствует действительности.<sup>3</sup>

Новые кристаллические формы углерода открывались с большим трудом и через значительные промежутки времени. Структура алмаза была установлена в 1913 г., графита — в 1917 г. и лишь в 1942 г. открыл ромбоэдрический графит, а в 1967 г. — гексагональный алмаз, названный лонсдейлитом в честь известной английской исследовательницы К. Лонсдейл. В 1971 г. (с приоритетом за 1960 г.) в Государственном Реестре СССР под № 107 зарегистрировано открытие карбина. Правильнее, однако, рассматривать графиты, алмазы и карбины как предельные, частные случаи бесконечного множества регулярных углеродных структур и все их также обозначать термином «карбины», т. е. расширить это понятие, уже успевшее прочно войти в научный лексикон.

Чем же обусловлено такое многообразие «карбинов»? Разнообразием способов сочетания различных элементов <sup>12</sup>C, возможностью их поворотов вокруг одной из C—C связей, иными словами, лабильностью электронных состояний атома углерода.

В классической структурной химии углерода также предполагалось существование в так называемых переходных (не чисто алмазных или графитовых) формах разнотипных C-атомов, характеризующихся разными состояниями внешних валентных электронов. Но в качестве неоспоримой аксиомы господствовало утверждение, что регулярные формы углерода могут быть построены лишь из химически однотипных атомов. Именно поэтому сначала постулировалось наличие всего двух, а затем трех кристаллических форм углерода. Только сейчас специалисты стали понимать, что эта, казалось бы, логически стройная и последовательная картина далеко не полна, ограничена и не согласуется со всем множеством накопленных фактов. Возникло предположение о бесконечности множества регулярных форм углерода, которое, таким образом, пришло на смену представлению о неограниченном многообразии его переходных форм. По существу,

был регуляризован («закристаллизован» в микромасштабах) этот неупорядоченный углерод. В результате исследователи столкнулись с необходимостью идентифицировать структуру и свойства не одной-двух новых фаз вещества, а сразу целого их семейства. Отсюда проистекают и трудности их познания, и интерес к ним, и их актуальность для многих областей народного хозяйства. По-видимому, можно говорить о становлении новой отрасли промышленности, связанной с исследованием и использованием новых форм углерода.

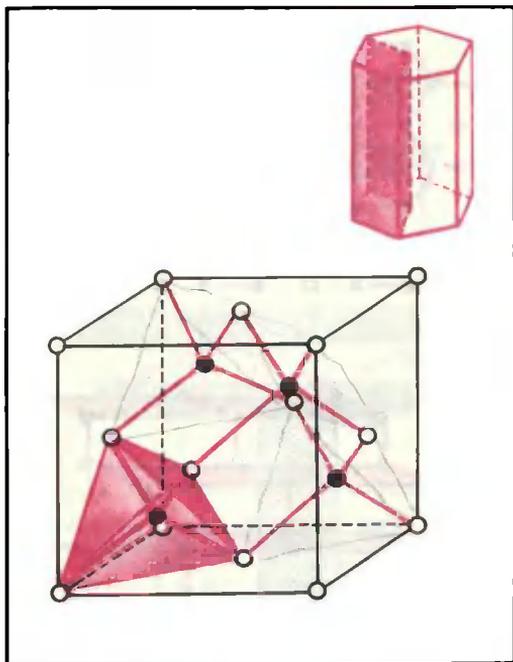
### НЕДОСТАТКИ КУБИЧЕСКОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ АЛМАЗА

В качестве модели атомной структуры алмаза в кристаллографии, начиная с 1913 г., принята кубическая гранецентрированная решетка, характеризующаяся наиболее высокой симметрией. Все 8 атомов элементарной ячейки оказываются при этом симметрично эквивалентными<sup>4</sup>. Длина а ее ребра около 357 пм. Кубическая решетка алмаза служит эталоном при описании и классификации структур многих других веществ и породила самостоятельную подгруппу кристаллографических пространственных решеток. Все свойства таких веществ в макро- и даже микрообъеме должны быть сферически изотропными. Другая алмазная форма углерода — лонсдейлит — характеризуется гексагональной элементарной ячейкой (именной вид прямой призмы высотой  $c=412$  пм, в основаниях которой — правильные шестиугольники со стороной  $a=252$  пм).

Таким образом, исторически сложилась ситуация, при которой две известные алмазные формы углерода описываются по-разному: одна — как кубический кристалл, другая — как гексагональный. Это

<sup>4</sup> На первый взгляд может показаться, что кубическая ячейка алмаза содержит 18 атомов углерода (8 — в вершинах куба, 6 — в центрах его граней и 4 — внутри). Но нетрудно видеть, что каждый из первых 8 атомов на самом деле одновременно принадлежит 8 соприкасающимся в этой вершине элементарным кубикам. Иными словами, к данной ячейке относится лишь  $1/8$  часть этих атомов. Точно так же, атомы, находящиеся в центрах граней, одновременно принадлежат двум смежным ячейкам, для которых эта грань — общая, т. е. к данной ячейке относится только половина атомов, лежащих на гранях куба. Внутренние же атомы все целиком содержатся в рассматриваемой ячейке. Таким образом, каждая ячейка содержит:  $8 \times 1/8 + 6 \times 1/2 + 4 = 8$  атомов. Аналогично можно показать, что в гексагональной элементарной ячейке лонсдейлита насчитывается 4 атома.

<sup>3</sup> Мельниченко В. М., Сладков А. М., Никулин Ю. Н.— Усп. химии, 1982, т. 51, № 5, с. 736.



Кубическая элементарная ячейка алмаза и схематическое изображение элемента гексагональной структуры лонсдейлита. В алмазе атомы С расположены в вершинах и центрах граней куба (светлые кружки), а также в центрах 4 несмежных октантов (темные кружки). Вокруг каждого атома можно построить тетраэдр (один из них отмечен цветом), в 4 вершинах которого находятся ближайшие «соседи» рассматриваемого атома. Именно это «тетраэдрическое окружение» любого из атомов является отличительной особенностью всех алмазных структур. Грани тетраэдров перпендикулярны направлениям С—С связей (пространственным диагоналям куба). Гексагональная решетка лонсдейлита состоит из соприкасающихся правильных прямых шестигранных призм. Однако в качестве элементарной гексагональной ячейки лонсдейлита принято рассматривать прямую четырехгранную призму (показана цветом) с ромбом в основании, объем которой составляет  $1/3$  объема шестигранной призмы. Параметрами этой ячейки служат длина стороны шестигольника и высота призмы.

различие в способах описания затрудняет выявление признаков действительного различия и сходства строения как самих алмазов, так и их структур со структурами графитов, для которых общепринято гексагонально-слоистое представление. Кроме того, оно затрудняет понимание механизма структурных превращений алмаз ↔ графит, исключает возможность предсказания новых форм углерода, в частности алмазных, а также склывает развитие представлений о строении карбиновых форм (и вообще об углероде) как сложнейшем пространственно-сшитом полимере. Упо-

мянутое различие вызывает необходимость проведения дополнительных исследований для определения ориентационных соотношений между отдельными кристаллографическими направлениями в решетках лонсдейлита и алмаза. Ось «с» в лонсдейлите оказалась при этом эквивалентной пространственной диагонали кубической ячейки алмаза, что указывает на идентичность соответствующих атомных плоскостей в обеих структурах.

Кубическая модель решетки алмаза представляет собой, пожалуй, единственное исключение среди всех расшифрованных (и возможно, еще нерасшифрованных) регулярных структур углерода. Внешняя самоочевидность, незыблемость, эталонный статус ее подспудно заставляют исследователей описывать структуру и новых форм углерода в рамках кубических решеток без особых на то оснований. И подчас такой путь ведет к ошибочным заключениям. Это произошло с «кубическим графитом» ( $a=554,4$  пм) и, по-видимому, со «сверхплотным углеродом» (плотность  $4,1$  г/см<sup>3</sup><sup>5</sup>).

В будущей интегрированной науке о полимерном углероде все его формы должны описываться единообразно и непрерывно переходить одна в другую через промежуточные или гибридные системы «полуалмаз — полуграфит — полукарбин». Но в настоящее время трудно перекинуть мост между отдельными формами углерода. Они существуют сами по себе и изучаются отдельно друг от друга.

Неудовлетворенность кубическим описанием структуры алмаза ощущали многие исследователи. Однако оспаривать или просто подвергать его сомнению могли только выдающиеся ученые. Мешали консервативные начала в развитии науки и высокий авторитет первых законодателей представлений о структуре алмаза — отца и сына Г. и Л. Брэггов, лауреатов Нобелевской премии 1915 года. Позднее Н. В. Белов развил представление об алмазе как о структуре, состоящей из двух сортов ионов  $C^{4+}$  и  $C^{4-}$  с радиусами 15 и 150 пм соответственно. Однако предложенная им модель носила скорее гипотетически абстрактный характер, далеко не адекватный реальному алмазу.

Проблема эквивалентности С-атомов в алмазе, его истинной симметрии активно

<sup>5</sup> Матюшенко Н. Н., Стрельницкий В. Е., Гусев В. А. — Письма в ЖЭТФ, 1979, т. 30, № 4, с. 218; Они же. Кристаллография, 1981, т. 26, № 3, с. 484.

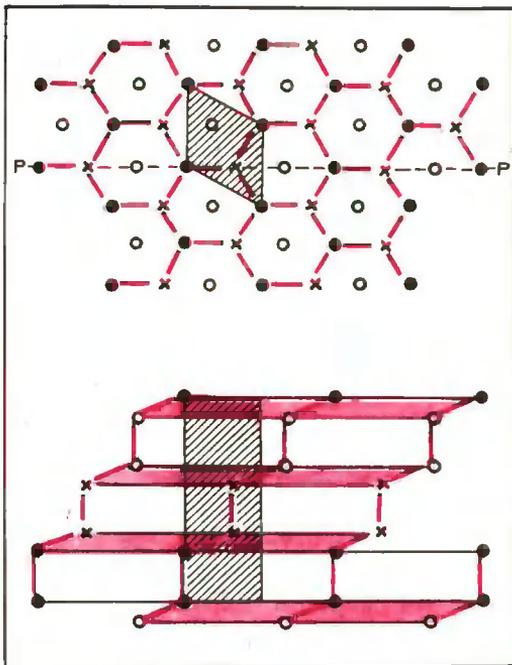
обсуждалась и в последние годы<sup>6</sup>. Но рассмотрение по-прежнему велось в рамках кубической решетки. Истинность последней в литературе, по-видимому, нигде даже не подвергалась сомнению.

Заметим, наконец, что если в кристаллографии при описании симметрии алмазной решетки за основу принимается кубическая гранецентрированная ячейка, содержащая 8 атомов, то при квантовохимических расчетах электронных состояний, как правило, рассматривают ромбоэдрическую ячейку, содержащую 2 атома углерода. Это несоответствие отражает неадекватность кубического (модельного) и реального алмазов.

### АЛМАЗ — СИСТЕМА СШИТЫХ СЛОЕВ АТОМОВ УГЛЕРОДА

Неоднократно высказывалась мысль о том, что гексагональный лонсдейлит и кубический алмаз, как и графиты, представляют собой двух- и трехслойные периодические последовательности одних и тех же гексагональных слоев, ячеисто-гофрированных в алмазах и плоских — в графитах<sup>7</sup>. Различие между графитами и алмазами заключается лишь в том, что в первом случае атомные слои химически не связаны между собой, а во втором — сшиты поперечными С—С связями. Чтобы получить такую структуру, необходимо, естественно, выявить в алмазе главные атомные слои, проанализировать их внутреннюю структуру и связи между ними. Это легко достигается, если перейти от прямоугольной (кубической) декартовой системы координат к косоугольной (гексагональной), направив ее ось «с» вдоль одной из четырех пространственных диагоналей кубической ячейки алмаза, и рассмотреть расположение атомов в направлении этой оси и в перпендикулярных ей плоскостях.

При таком подходе кристалл алмаза выглядит как совокупность слоев, похожих на подставки, в которых перевозят куриные яйца. Слои перпендикулярны оси «с», а расстояние между ними равно 206 пм. Каждый четвертый слой повторяет первый: структура алмаза является, следовательно, трехслойно-периодической, типа ABCABC. Этим алмаз отличается от лонсдейлита, построенного из таких же слоев с двухслойно-периодической структурой (ABAB).

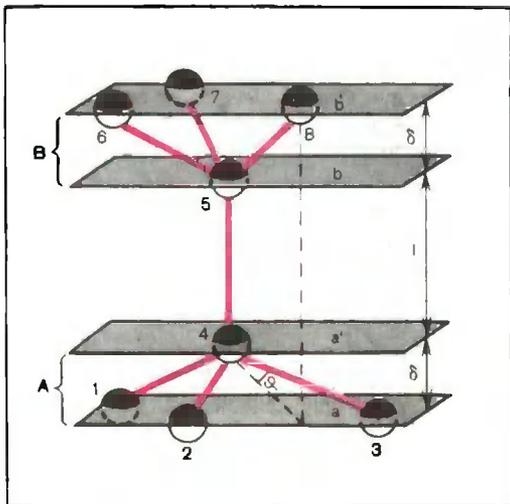


Слоисто-гексагональная структура алмаза. Вверху показана гексагональная сетка [система правильных шестиугольников], образующаяся в результате проектирования кристаллической решетки на плоскость, перпендикулярную одной из С—С связей. Внизу — сечение решетки плоскостью Р—Р, проведенной перпендикулярно этой грани через 2 пересекающиеся С—С связи. Цветом выделены сечения ячеисто-гофрированных слоев, связанных между собой вертикальными [поперечными] химическими связями. Атомы, осуществляющие связи между разными слоями, изображены крестиками, а также светлыми и темными кружками. Видно, что расположение атомов в решетке через 3 слоя в точности повторяется. Штриховкой отмечены проекция и сечение элементарной гексагональной ячейки.

Если плоские слои в графите не связаны между собой, то в алмазе они — объемные, состоят из двух подслоев и идеально (поатомно) сшиты друг с другом поперечными химическими связями. Каждая такая связь окружена шестью другими, расстояние между ними составляет 252 пм. Эти связи перпендикулярны плоскости слоя и играют роль своего рода цепочек, оттягивающих атомы в стороны от нее, в результате чего плоский атомный слой превращается в ячеисто-гофрированный (двойной). Системы из трех атомов углерода на концах такой цепочки в алмазе повернуты одна относительно другой вокруг ее оси на угол  $60^\circ$ , а в лонсдейлите — на угол  $0^\circ$ , т. е. находятся точно друг над другом. Этим, по-видимому, и объясняется более низкая распространен-

<sup>6</sup> См., напр.: Донней Г., Донней Дж. Д. Г. — Кристаллография, 1981, т. 26, № 6, с. 1282.

<sup>7</sup> Курдюмов А. В., Пиланкевич А. М. — Фазовые превращения в углероде и нитриде бора. Киев, 1979.



Расположение атомов в соседних слоях алмазной решетки. Атомы 1, 2, 3 лежат в горизонтальной плоскости «а», атом 4 — в плоскости «а'», 5 — в плоскости «а'», 6, 7, 8 — в плоскости «а'». Система атомов 6, 7, 8 повернута относительно системы атомов 1, 2, 3 на угол  $\varphi$  вокруг C—C связи 4—5. В лонсдейлите  $\varphi=0^\circ$ . В алмазе  $\varphi=60^\circ$ , т. е. проекция атома 8 оказывается точно посередине между атомами 2 и 3 и т. д. Плоскости «а» и «а'» ограничивают атомный слой А, «а» и «а'» — слой В. Толщина этих слоев  $\delta=1/3l$ . Расстояние между слоями  $d=|1|+\delta=206$  пм.

ность и меньшая устойчивость лонсдейлита по сравнению с алмазом. Наличие химических связей вызывает уменьшение расстояния между слоями с 336 пм у графита до 206 пм у алмаза.

Таким образом, гексагональная элементарная ячейка «кубического» алмаза по форме напоминает ячейку лонсдейлита. Она меньше кубической ячейки и содержит лишь 6 атомов — по 2 от каждого слоя (напомним, что в ячейке лонсдейлита — 4 атома). Ее параметр «а» (252 пм) точно такой же, как у лонсдейлита, и лишь незначительно (на 2,4 %) больше, чем у графитов (246 пм). Высота элементарной ячейки «с» в алмазе равна  $206 \cdot 3=618$  пм, а в лонсдейлите  $206 \cdot 2=412$  пм, что отражает трехслойную периодичность алмаза и двухслойную — лонсдейлита.

В гексагональном представлении все реальные структурные периоды кристаллической решетки алмаза сохраняются — происходит только их переобозначение, никаких дополнительных периодов не возникает. Так что с этой точки зрения наблюдается полное согласие с экспериментальными данными дифракционных исследований.

Представление об алмазе как о си-

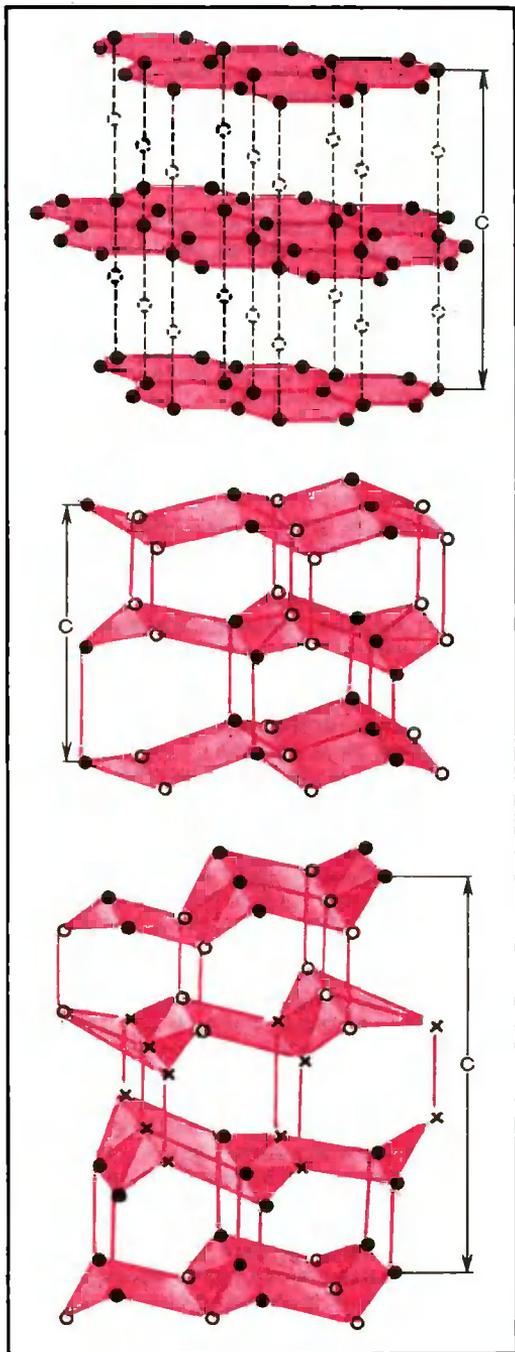
стеме химически сшитых слоев атомов углерода было предложено почти полвека назад<sup>8</sup>. Хотя в некоторых работах оно и использовалось, всеобщего признания все же пока не получило.

## СИММЕТРИЯ АЛМАЗА

Может сложиться впечатление, что при переходе от одного представления к другому симметрия алмаза снижается. Если бы дело обстояло так, получилось бы, что симметрия объекта зависит от способа его описания. На самом деле это, конечно, не так. Симметрия сохраняется, если учесть возможность ориентации гексагональной ячейки четырьмя различными способами (по числу связей каждого атома). Это означает четырехкратное вырождение гексагональной симметрии. Итак, кубическая и гексагональная (с учетом вырождения) симметрии оказываются эквивалентными. Но, может быть, в таком случае сама слоистость алмаза фиктивна и возникает в результате выбора способа описания? Наша задача и заключается как раз в том, чтобы показать, что слоистость алмаза реальна, а гексагональное представление его структуры — просто-напросто ее адекватная модель. Более того, исходя из наличия алмазов с периодически повторяющимся расположением атомных слоев (через 2 слоя — лонсдейлит и через 3 — «кубический» алмаз), естественно предположить существование и других многослойных алмазов с периодами решетки 4, 5, 6 и т. д. слоев. Это связано с тем обстоятельством, что каждый из атомных слоев может быть расположен относительно других двумя способами (что соответствует поворотам вокруг поперечных связей на угол  $0^\circ$  либо  $60^\circ$ ). В реальных структурах слоистость обнаруживается экспериментально, а симметрия оказывается гексагональной. Идеальный же (кубический) алмаз — не более чем абстракция.

Постепенно специалисты осознали, что изменение закона чередования атомных слоев в той или иной мере характерно для любых кристаллов алмаза, причем симметрия соответствующих областей вместо кубической становится гексагональной. Было показано, что взаимодействие кубической и гексагональной структур всегда носит характер двумерной эпитаксии — взаимно согласованного расположения и ориентации их атомных слоев.

<sup>8</sup> Nath N. S. N.— Proc. Ind. Acad. Sci., 1935, v. A2, p. 143.



Сверху вниз: слоистые структуры графита или карбино-графита (в этом материале между слоями расположены дополнительные атомы, изображенные пунктирными кружками), лонсдейлита и алмаза. C — период решетки.

В заключение этого раздела подчеркнем, что к основным преимуществам слоисто-гексагонального представления структуры алмаза относятся его широкие предсказательные возможности и единообразие в описании всех известных форм углерода.

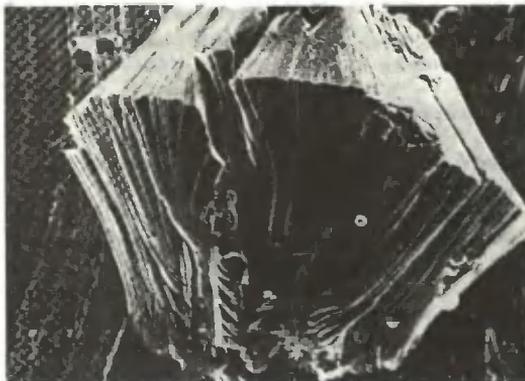
### РЕАЛЬНЫЙ АЛМАЗ

Целесообразно различать модельный (кубический), реальный (гексагональный) и дефектный алмазы. Реальный алмаз — это система атомов углерода, в которой каждый атом химически связан с 4 ближайшими соседями. Различие между кубическим и реальным алмазами заключается в том, что в первом существует и ближний, и дальний порядки во всех направлениях, а во втором — только ближний (тетраэдрическое окружение каждого атома); дальний же порядок сохраняется лишь вдоль слоев.

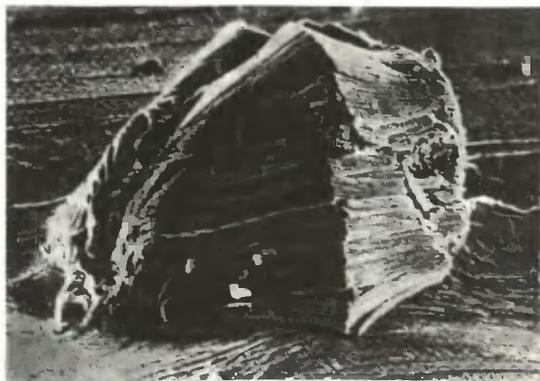
В настоящее время структуру реальных алмазов все еще пытаются втиснуть в узкие рамки кубических решеток. Между тем множество экспериментальных фактов указывает на то, что кубическое представление, несмотря на его кажущуюся простоту и обоснованность, не совсем адекватно отражает все структурные особенности реальных алмазов, в частности особую роль «гофрированных» слоев атомов, ориентированных перпендикулярно сшивающим C—C связям. Как правило, вдоль этих слоев легче всего происходит раскалывание и расслоение кристалла, согласованное срастание разных кристалликов в процессе синтеза алмаза, и так называемое двойникование — образование областей с измененной ориентацией кристаллической структуры.

Слоистое строение алмаза подтверждается также заметной анизотропией многих его физических свойств, распространенностью плоских дефектов, присутствием в кристаллах алмаза тончайших, структурно несовершенных чешуек лонсдейлита. Практически все кристаллы алмаза состоят из множества отдельных зон двойникования, т. е. являются, по существу, мозаичными. Некоторые исследователи полагают, что окраска кристаллов алмаза определяется прежде всего самой их структурой, а не наличием примесей.

При рентгеноструктурном анализе кристаллов алмаза на рентгенограммах часто наблюдаются дополнительные отражения в форме пятен и штрихов. По-видимому, они обусловлены тончайшими двумерными нарушениями регулярной струк-



Слоистая структура алмазных кристаллов в стекловидной пленке из поливинилпирролидного кокса. Фотографии получены с помощью сканирующего электронного микроскопа.



туры, присущей идеальным алмазам, т. е. их реальной слоистостью.

Слоистая структура алмаза отчетливо проявляется также при исследованиях в поляризованном свете и с помощью сканирующего электронного микроскопа<sup>9</sup>.

Все эти и многие другие факты, например, изменение цвета и прозрачности от образца к образцу, приводят к выводу о неравновесности алмазных форм углерода, т. е. возможности превращений алмаз ↔ лонсдейлит.

Слоистость характерна и для карбинов<sup>10</sup>. Заметна она также в графитах, антрацитах, коксах, причем на всех уровнях (от молекул до пластовой структуры природных залежей). Вероятно, это структурная особенность, общая для всех форм конденсированного углерода.

## СЛЕДСТВИЯ СЛОИСТОСТИ АЛМАЗА

**Структурные переходы графит ↔ алмаз.** Таким образом, все известные кристаллические формы углерода, как графитовые, так и алмазные (а также, по-видимому, и карбиновые), можно считать слоистыми системами с гексагональной структурой. Основное различие между графитами и алмазами, с этой точки зрения, состоит в том, что у первых слои химически не связаны между собой, а у вторых — сшиты поперечными связями. Следовательно, переход графита в алмаз означает образование таких дополнительных связей, а обратный

переход — их разрыв. На первый взгляд, представляется, что из двухслойного графита должен образоваться двухслойный алмаз, т. е. лонсдейлит, а из трехслойного (ромбоэдрического) графита — трехслойный (кубический) алмаз и наоборот. Но для образования алмаза или лонсдейлита путем прямого сближения и сшивания графитовых слоев необходимо еще, чтобы в нормальном к их плоскостям направлении каждый атом углерода поочередно соседствовал с будущим партнером по C—C связи с одной стороны и с центром шестиугольника — с другой. Подобная ситуация имеет место в ромбоэдрическом графите, но не реализуется в обычном, двухслойном: ни алмаз, ни лонсдейлит из него таким путем образоваться не могут.

Этот механизм естественным образом объясняет многие хорошо известные, но казавшиеся малопонятными и даже загадочными факты, относящиеся к синтезу искусственных алмазов. Установлено, например, что из кристаллического двухслойного графита труднее получают алмазы, чем из структурно менее упорядоченного углеродного материала. Так, ударное сжатие двухслойного графита, несмотря на высокие давления (50 ГПа ≈ 500 кбар), вообще не приводит к образованию алмаза. Легче всего, как замечено, алмазы получают из ромбоэдрического графита.

При синтезе алмаза из обычного графита исследователи, как правило, наблюдали образование ромбоэдрического графита на промежуточной стадии, т. е. процесс протекал по схеме «обычный графит → ромбоэдрический графит → алмаз».

Примечательно и то, что атомные слои в образовавшемся алмазе ориентированы параллельно графитовым слоям. Обратный переход алмаз → графит характеризуется таким же ориентационным соотношением. Это убедительно подтверждает

<sup>9</sup> Walker N., Hay J. N., Haward R. N.— J. Material Sci., 1980, v. 15, № 4, p. 1059.

<sup>10</sup> Melnitchenko V. M., Nikulin Yu. N., Sladkov A. M.— Carbon, 1983, v. 21, № 2, p. 131.

механизм прямого сшивания графитовых слоев при их сближении в условиях синтеза алмазов (высокие давления и температуры) и, соответственно, разрыв поперечных химических связей при превращении алмаза в графит.

**Карбино-графиты.** Итак, при высоких давлениях и температурах ромбоэдрический графит сравнительно легко превращается в алмаз. А что же в этих условиях происходит с двухслойным графитом, если он на промежуточном этапе не переходит в ромбоэдрический? Этого пока никто не знает. Но можно предположить, что сначала атомы, имеющие двух потенциальных партнеров для создания поперечных связей, действительно связываются с ними, сшивая слои в единую систему. Это сопровождается частичным переносом электрического заряда от несвязанных атомов ( $z=3$ ) к связанным ( $z=5$ ). Образовавшаяся система фактически состоит из длинных цепочек связанных атомов и плоских слоев. Цепочки и слои взаимно сшивают друг друга. Однако эта структура оказывается слишком напряженной и неустойчивой из-за малых расстояний между цепочками (250 пм) и особенно между слоями (150—160 пм). Ее правильнее рассматривать даже не как обычную структуру, а как переходный комплекс. Затем, вероятно, происходит «растворение» половины слоев (через один) за счет удаления из них несвязанных атомов. В результате образуется структура, которую можно назвать карбино-графитом. Расстояние между слоями в ней примерно 310 пм.

Весьма примечателен такой, пока необъясненный, факт. На рентгенограммах образцов графита, испытавших частичное превращение в лонсдейлит, наблюдалась<sup>11</sup> сильная дифракционная линия, соответствующая периоду  $d=310$  пм. По-видимому, она относится к новой неизвестной кристаллической форме углерода (возможно, к карбино-графиту).

**Карбино-алмазы.** Если удлинить в алмазной решетке поперечные связи, разместив между слоями дополнительные атомы, то все связи сохранятся и атомные слои останутся практически такими же, как и в алмазе, но расстояние между слоями возрастет, поскольку длина сшивающих цепочек будет равна длине уже не одной, а нескольких C—C связей. В результате образуется другое семейство слоисто-цепочечных форм углерода, названное карби-

но-алмазами<sup>12</sup>. Оно отличается от карбино-графитов формой слоев и характером их соединений с цепочками. Карбины и алмазы — предельные структуры из этого семейства.

Квантовохимические расчеты показывают, что карбино-алмазы намного устойчивее, чем химически не сшитые углеродные цепочки (идеальный карбин) — по энергии связи они вплотную приближаются к графитам и алмазам.

Карбино-графиты и карбино-алмазы, построенные из первичных структурных элементов двух типов: углеродных цепочек регулируемой длины и атомных слоев, взаимно сшивающих друг друга, — чрезвычайно интересные объекты с заранее непредсказуемыми свойствами.

Итак, еще совсем недавно наличие в природе всего трех кристаллических форм углерода казалось столь же естественным, как то, что Земля вращается вокруг Солнца. Авторам хотелось бы надеяться, что им удалось разубедить читателей в этом. В действительности результаты многочисленных экспериментов и наблюдений не укладываются в прокрустово ложе схемы «кубический алмаз — слоистый графит — цепочечный карбин». Они указывают скорее на существование великого множества регулярных форм углерода, которое, в известной мере, обусловлено уникальностью этого элемента. Ведь не случайно и сама жизнь на Земле представлена именно соединениями углерода.

Может оказаться, что некоторые регулярные формы углерода обладают свойствами, которые кажутся нам сегодня фантастическими, — скажем, сверхпроводимостью при высоких температурах. Способность углерода к самосвязыванию (полимеризации), возрастающая с увеличением температуры, разительно отличает его от других веществ, разрушающихся при нагревании. Разработка принципиальных основ системного подхода, единой науки о конденсированном углероде, познание строения и управляемый синтез его форм с требуемыми свойствами — таковы основные стратегические задачи исследований, проводимых в последнее время. Дальнейшее расширение и углубление этих исследований, а также развитие тонких технологий в производстве углеродных материалов, несомненно, откроют новые перспективы применения углерода практически во всех областях науки и техники.

<sup>11</sup> Bundy F. P., Kasper J. S. — J. Chem. Phys., 1969, v. 46, № 9, p. 3437.

<sup>12</sup> Мельниченко В. М., Никулин Ю. Н., Сладков А. М. — Доклады АН СССР, 1982, т. 267, № 5, с. 1150.

## От мобилизма Вегенера к неомобилизму

В. Е. Хаин



Виктор Ефимович Хаин, член-корреспондент АН СССР, профессор Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, заместитель председателя Комиссии по международным тектоническим картам. Специалист по общей и региональной геотектонике. Член редколлегии журнала «Природа».

Четырнадцать лет назад автор этих строк выступил на страницах «Природы» со статьей, в заглавии которой был вынесен вопрос: «Происходит ли научная революция в геологии?»<sup>1</sup> В настоящее время положительный ответ на этот вопрос уже ни у кого не вызывает сомнений. Наиболее ярко революция в геологии воплотилась в смене традиционных представлений о причинах движений и деформаций земной коры новыми мобилистскими представлениями. Сегодня даже противники этих новых идей признают, что они всколыхнули всю атмосферу теоретической геологии и стимулировали невиданный подъем разнообразных исследований в этой области<sup>2</sup>. Проведенные исследования привели, в свою очередь, к значительному пересмотру исходных положений мобилистской концепции, современное состояние которой и является предметом настоящей статьи. Но сначала небольшой экскурс в прошлое.

### ВСЕ НАЧАЛОСЬ С ВЕГЕНЕРА

На протяжении более чем двухсотлетней истории геологии как науки она по-разному отвечала на свой центральный вопрос: в чем состоит причина движений земной коры? Вплоть до начала XX в. эти ответы не выходили за рамки фиксизма — учения, согласно которому земная кора тесно связана в своем развитии с непосредственно подстилающей ее мантией и не способна на сколь угодно значительные горизонтальные перемещения. И лишь во втором десятилетии нашего века была предпринята смелая попытка, связанная прежде всего с именем немецкого геофизика А. Вегенера<sup>3</sup>, выйти за рамки этих представлений и допустить, что современные океаны образовались благодаря распаду некогда единого суперконтинента с смещением отдельных материков на тысячи километров относительно друг друга.

<sup>1</sup> Хаин В. Е. Происходит ли научная революция в геологии? — Природа, 1970, № 1, с. 7.

<sup>2</sup> Белоусов В. В. О некоторых тенденциях в современных науках о Земле. — Природа, 1984, № 6, с. 3.

<sup>3</sup> В 1980 г. научная общественность ГДР и ФРГ, а также нашей страны отмечала 100-летие со дня рождения А. Вегенера и 50-летие его гибели во льдах Гренландии. См., напр.: Милановский Е. Е. Альфред Вегенер и его идеи. — Природа, 1980, № 11, с. 52.

Эти взгляды, получившие название «мобилизм», первоначально имели довольно большую успех и за рубежом, и в нашей стране. Но затем как геологи, так и геофизики обнаружили в них существенные изъяны (недоучет учения о геосинклиналях и глубинных разломах, недостаточность сил, связанных с вращением Земли, для перемещения материков и др.), и к концу 30-х годов гипотеза Вегенера почти полностью потеряла своих сторонников. Начался почти четвертьвековой период господства фиксизма, продолжавшийся до середины 50-х годов, когда в распоряжение геологов и геофизиков неожиданно стали поступать факты, добытые с помощью новых технических средств. Наибольшее значение имели данные палеомагнетизма, свидетельствовавшие об изменении взаимного расположения материков в прошлые геологические эпохи, а также открытие мировой системы срединно-океанических хребтов и осложняющих их щелей — рифтов. Эти данные вновь пробудили интерес к идеям мобилизма и позволили в начале 60-х годов сформулировать концепцию образования океанов путем разрастания их коры от осевых рифтов срединных хребтов — концепцию, которая теперь известна под названием «спрединг».

Новые данные, подтверждающие идею спрединга, продолжали во все возрастающем объеме поступать и на протяжении следующих лет. В океане были обнаружены линейные магнитные аномалии, параллельные и симметричные относительно осей хребтов, что вместе с открытием явления периодической инверсии (обращения) магнитного поля Земли привело к разработке магнитной стратиграфии базальтового ложа океанов. Уточнив распределение в земной коре очагов землетрясений, сейсмологи обнаружили их концентрацию в определенных узких зонах: в океанических рифтах, вдоль глубоководных желобов и островных дуг по периферии океанов, а также в альпийском поясе Евразии и северо-западной части Африки. Сейсмологи научились также определять характер напряжений в очагах землетрясений, благодаря чему был подтвержден вывод о преобладании растяжения в рифтовых зонах срединных хребтов и господстве сжатия на периферии океанов и в альпийском Средиземноморско-Гималайском поясе. Эта и другая новая информация привела к появлению в 1968 г. серии статей, в которых излагалась уже более широкая, касающаяся

Земли в целом, концепция тектогенеза, получившая название «новой глобальной тектоники», или «тектоники плит». И хотя в дальнейшем второе название вытеснило первое, ни то, ни другое не передает достаточно точно суть концепции, и их приходится рассматривать как условные.

Несмотря на то что становление концепций спрединга и тектоники плит произошло на американской почве, при их создании были использованы материалы советских ученых. С конца 50-х — начала 60-х годов поворот в сторону мобилизма и признания существенной роли горизонтальных движений в развитии земной коры обозначился и в нашей стране. Советским ученым принадлежит открытие срединного хребта Геккеля в Северном Ледовитом океане. Линейные магнитные аномалии в северо-западной части Тихого океана были установлены нашими геофизиками одновременно с аналогичным открытием, сделанным американцами в северо-восточной части того же океана. С работами мобилистского направления в 60-е годы у нас выступили П. Н. Кропоткин и П. С. Воронов. В 1963 г. Геологическим институтом АН СССР под редакцией А. В. Пейве был выпущен сборник «Разломы и горизонтальные движения земной коры». В Ленинграде, во Всесоюзном научно-исследовательском нефтяном геологоразведочном институте в те же годы возникла лаборатория палеомагнетизма, возглавленная А. Н. Храмовым, где в дальнейшем был накоплен очень важный материал для мобилистских реконструкций. Таким образом, советские ученые внесли свой вклад в становление нового направления, который в последующие годы стал еще более весомым.

Возвращаясь к работам 1968 г., напомним сформулированные в них основные положения новой теории:

верхние оболочки твердой Земли представлены относительно хрупкой и вязкой литосферой и подстилающей ее более пластичной и менее вязкой астеносферой;

литосфера сложена из относительно небольшого числа крупных плит, монолитных и жестких, разделенных швами, в которых сосредоточена основная сейсмическая (и вообще эндогенная) активность;

плиты испытывают вдоль своих границ смещения трех типов: раздвиг в рифтовых зонах срединно-океанических хребтов, схождение, в частности подвиг океанической коры под островодужную и континентальную вдоль глубоководных

желобов, и смещение по горизонтали вдоль вертикальной плоскости; соответственно эти три типа межплитных границ называются дивергентными (или конструктивными), конвергентными (или деструктивными) и трансформными;

перемещение плит подчиняется законам сферической геометрии (теорема Эйлера), а именно: траектория перемещения сопряженных точек представляет окружность, проведенную из «полюса разрастания», который не совпадает с полюсом вращения Земли;

расширение ложа океанов, связанное со спредингом, полностью компенсируется поглощением океанической коры, ее субдукцией в зонах конвергенции плит таким образом, что объем Земли остается постоянным;

причина перемещения плит — тепловая конвекция в мантии Земли.

Что же отличает тектонику плит — неомобилизм — от классического мобилизма? Во-первых, в плитовой тектонике в качестве поверхности смещения верхней оболочки относительно нижней принимается не граница между гранитным и базальтовым слоями коры и даже не ее подошва, а граница раздела между астеносферой и литосферой, причем последняя обычно включает и самый верхний слой мантии толщиной в несколько десятков километров. Во-вторых, горизонтальное перемещение испытывают не континентальные глыбы, а литосферные плиты, которые могут включать как континентальную, так и океаническую литосферу. В-третьих, перемещение плит подчиняется законам сферической геометрии, что открыло путь к расчету на ЭВМ движений плит и реконструкции их прежнего положения. В-четвертых, силы, заставляющие плиты перемещаться, стали связывать не с вращением Земли, а с конвекцией в мантии, которая также поддается расчетам. Все это придало неомобилизму достаточно строгую форму и предсказательную (точнее, «ретросказательную») силу, позволив восстановить план расположения плит вплоть до 180—160 млн лет назад. Этому способствовало использование в качестве реперов линейных магнитных аномалий, по которым можно было предсказать и возраст отдельных участков океанического ложа. В дальнейшем, с открытием закона, связывающего простым отношением глубину океана с возрастом коры, удалось подойти к определению этой глубины в прошлые геологические эпохи, т. е. к восстановлению

батиметрии океанов. Эти расчеты нашли подтверждение в материалах глубоководного бурения. Таким образом, в тектонике плит геология получила первую научную теорию тектогенеза, в то время как раньше ей приходилось довольствоваться тектоническими гипотезами.

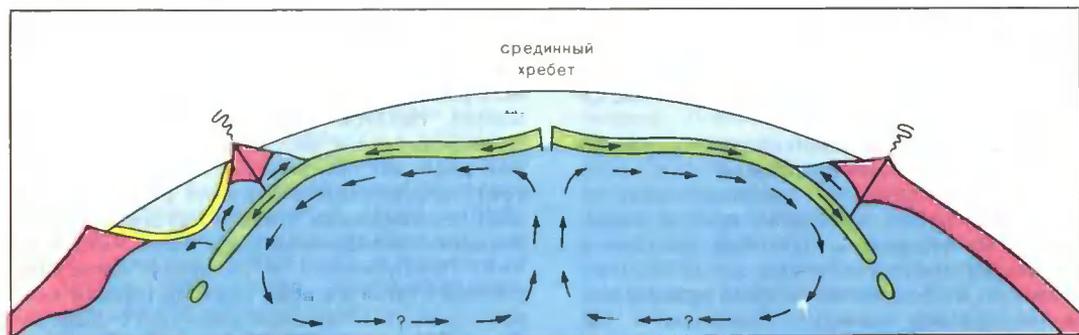
## ПРОВЕРКА ОСНОВНЫХ ПОЛОЖЕНИЙ МОБИЛИЗМА

Появление плитовой тектоники стало мощным стимулом для исследований, в первую очередь, в области теоретической тектоники, а вскоре и в других областях геологии, для постановки специальных работ по проверке отдельных ее положений. Начатое в том же 1968 г. и продолжающееся в настоящее время (в течение ряда лет при участии советских геологов) глубоководное бурение с судна «Гломар Челленджер» стало по существу грандиозным экспериментом в этом направлении. Пробуренные к моменту написания данной статьи во всех океанах (кроме скованной льдом площади Северного Ледовитого океана) более 600 скважин полностью подтвердили предложенную на основе использования магнитных аномалий датировку базальтового ложа океана и позволили за короткий срок создать карту его возрастного членения, наглядно рисующую разрастание этого ложа, начиная со времени 180—160 млн лет назад, т. е. юрского периода. Наряду с данными драгирования уступов дна океана, связанных с разломами, и сейсмического профилирования, бурение убедительно подтвердило коренное отличие состава и строения океанической коры от континентальной, а также сходство океанической коры с офиолитовой ассоциацией пород, встречающейся на континентах во внутренних зонах древних геосинклинальных систем и образующейся на самой ранней стадии их развития.

Богатый материал, собранный при бурении, наиболее полно осветил строение осадочного слоя океана и позволил наметить основные закономерности изменения мощности, возраста, литологии и состава органических остатков в нем. Выяснилось, что максимальная мощность осадков (до 12—15 км и более) наблюдается на периферии континентов; она резко уменьшается в направлении осей срединных хребтов, где осадки отсутствуют. Это изменение мощности происходит в основном за счет появления в основании осадочного слоя в направлении континентов

все более древних осадков, до юрских включительно. Закономерные изменения испытывают океанические осадки и в вертикальном разрезе: снизу вверх менее глубоководные (хотя и возникшие в условиях открытого моря) осадки сменяются все более глубоководными, подтверждая углубление ложа океана по мере продвижения новообразованной коры от оси срединного хребта. В Тихом океане литологическая особенность, состав ископаемого планктона и намагниченность осадков указывают на перемещение места их накопления из Юж-

ского залива, а также в Красном море экспедицией Института океанологии им. П. П. Ширшова АН СССР. Эти экспедиции провели уникальный комплекс визуальных наблюдений с отбором проб донных пород и осадков — наблюдений, полностью подтвердивших представления об океанических рифтах как зонах раздвига (были обнаружены зияющие трещины) и молодого базальтового вулканизма, а также о пересекающих их особых сдвигах — трансформных разломах. Сенсационным было открытие в Тихом океане мощных горячих



Принципиальная схема перемещения литосферных плит.

- Верхняя мантия
- Океаническая кора
- Континентальная кора
- Осадки
- Океан
- Направление конвективных течений в мантии и движения океанических плит

ного полушария в Северное, что согласуется с дрейфом Тихоокеанской плиты в северо-западном направлении. Результаты изучения осадочного чехла океанов наиболее полно обобщены в монографиях А. П. Лицины.

Еще один замечательный эксперимент по проверке тектоники плит начался в 1975 г., когда была организована франко-американская экспедиция на подводных лодках-малютках в рифтовую долину Срединно-Атлантического хребта в районе Азорских о-вов. В дальнейшем аналогичные работы были выполнены на Восточно-Тихоокеанском поднятии между Галапагосскими о-вами и устьем Калифорний-

(до 350 °С) струй, выносящих из трещин базальтового ложа сульфиды и гидроокиси тяжелых металлов (Fe, Mn, Ti, Cu, Pb, Zn). Подобные, но менее горячие струи довольно давно известны в Красном море и обследованы советской экспедицией. Они, очевидно, и ответственны за образование широко распространенного в основании осадочного чехла океанов слоя металлоносных осадков. Это открытие знаменательно в разных планах. Но прежде всего, оно свидетельствует об огромной роли гидротермальной циркуляции и конвективного теплопереноса в океанических рифтах, что повышает оценки теплового потока из недр Земли, подтверждает представление геологов-рудников о так называемом эксгальвационно-осадочном происхождении месторождений колчеданных руд на современных континентах, указывает новый перспективный источник металлов для человечества<sup>4</sup>.

## РЕАЛЬНОСТЬ СПРЕДИНГА

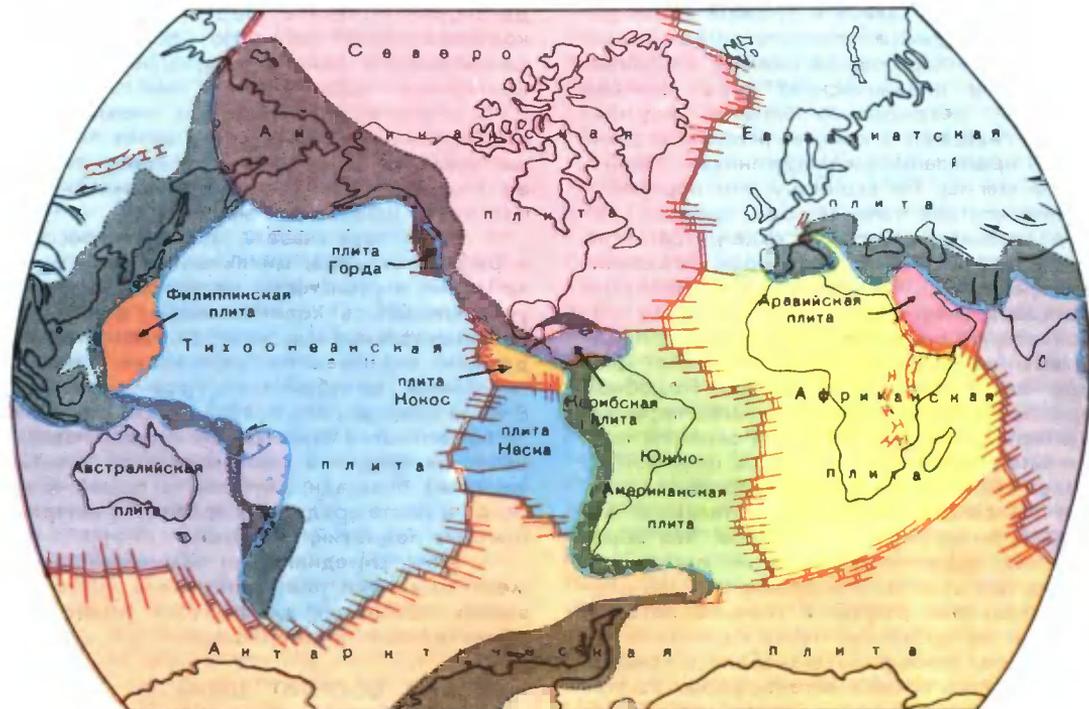
В результате бурения и различных геофизических исследований обнаружилась удивительно закономерная картина сопря-

<sup>4</sup> Смирнов В. И. Металлогения океана. — Природа, 1976, № 1, с. 46.

женного изменения ряда важнейших параметров в направлении от осей срединно-океанических хребтов к периферии океанов: снижение теплого потока, увеличение мощности и плотности литосферы, понижение поверхности геоида (уровня океана), повышение скорости распространения сейсмических волн в верхней части базальтового слоя и стирание различий между верхней и нижней его частями, уменьшение амплитуды магнитных аномалий, возрастание глубины накопления осадков и мощности осадочного слоя, увеличение

возраста его подошвы и, соответственно, кровли базальтового слоя, уменьшение числа и высоты подводных вулканов. Только теория спрединга способна дать единое объяснение всем этим явлениям.

Глубоководное бурение и сейсморазведка прояснили также строение подводных окраин континентов атлантического типа — так называемых пассивных окраин. Оказалось, что в разрезе этих окраин повсеместно выделяются два принципиально отличных структурных комплекса. Верхний из них состоит из осадков, возрастающих



Распределение литосферных плит.

-  Зоны субдукции
-  Океанические рифты
-  Трансформные разломы
-  Сдвиги
-  Континентальные рифты
-  Мезозойско-кайнозойские подактивные пояса

по мощности и глубоководности и наклоненных сначала полого, а затем более круто в направлении от берега к подножию континентального склона. Глубина накопления осадков возрастает и вверх по разрезу, свидетельствуя о погружении их субстрата. Этот комплекс образовался еще на стадии расширения дна океана. В подстилающем его комплексе чередуются горсты консолидированного фундамента и грабены, заполненные в нижней части обломочными континентальными осадками, а в верхней — угленосными или соленосными лагунами отложениями. Горсты и грабены часто разграничены сбросами, наклоненными в сторону океана, вверху круто, затем все более полого, вплоть до слияния на

глубине в единую субгоризонтальную поверхность смещения. В итоге образуется рифтовый комплекс наподобие осадков современных восточноафриканских рифтов и рифта Красного моря.

Мощность коры закономерно убывает от континента к океану. В основании континентального склона и его подножии нормальная двухслойная консолидированная континентальная кора сменяется значительно более тонкой корой, где скорости распространения сейсмических волн ниже, чем в базальтовом слое континентов, но выше, чем в верхней мантии. Бурение в Мексиканском заливе и прямые наблюдения на побережье Красного моря показали, что эта переходная (между континентальной и океанической) кора сложена глубоко метаморфизованными породами — гнейсами и кристаллическими сланцами, пронизанными внедрениями базальтовой магмы. По существу, это переработанная континентальная кора, процесс преобразования которой сходен, согласно предположениям В. В. Белоусова, с «океанизацией», или «базификацией». Белоусов распространяет данный процесс на все глубоководное ложе океанов, но такому представлению решительно противоречат данные петрологии и геохимии. Подобное преобразование континентальной коры характерно лишь для внешней окраины континентов, проявляясь в полосе шириной не более 100—120 км по обе стороны океана.

Исследование континентальных окраин и ложа океанов показало, что образование океанических впадин проходило через три стадии. Во-первых, стадию континентального рифта, в течение которой раздвиг не превышал первых десятков километров, литосфера становилась тоньше, поднималась кровля астеносферы. Во-вторых, стадию межконтинентального рифта с дальнейшим уменьшением толщины континентальной коры, внедрением в нее базальтовой магмы, т. е. с образованием коры переходного типа, а затем и с ее полным разрывом, растяжением на несколько сотен километров. В-третьих, стадию спрединга с образованием настоящего океана шириной в тысячи километров.

Погружение подводных окраин современных континентов на значительную глубину объясняется прогибанием коры в результате ее растяжения, охлаждением литосферы в связи с перемещением оси рифта (а точнее, приуроченного к нему максимума теплового потока) и, наконец, со все возрастающей нагрузкой осадков. Этот процесс довольно легко поддается

математическому моделированию, что было показано С. А. Ушаковым, а затем и зарубежными исследователями. Таким образом, вертикальные движения в океанах и на их окраинах тесно связаны с горизонтальными и порождаются единым глубинным механизмом. Это относится и к глубоководным впадинам окраинных и внутренних морей, а также к платформенным впадинам-синеклизам. Все эти структуры обязаны своим образованием рифтам и находящимся в их основании мантийным диапирам и представляют собой остановившиеся в своем развитии, не дошедшие до стадии спрединга продукты деструкции континентальной коры. Но некоторую дополнительную роль в разрушении континентальной коры может, как полагает Е. В. Артюшков, играть так называемая подкоровая эрозия — уменьшение толщины коры за счет преобразования пород ее нижней части в породы повышенной плотности (гранулиты, эклогиты).

Надо еще сказать, что трансгрессии и регрессии моря, цикличность осадконакопления и слоистость, по которым ранее устанавливались колебательные движения континентальных массивов, согласно новым данным, оказываются связанными с эвстатическими колебаниями уровня океана. В свою очередь, эти колебания скорее всего объясняются изменением емкости океанических впадин в зависимости от увеличения их площади, глубины, с одной стороны, и роста срединных хребтов и внутриплитных поднятий, с другой.

Итак, спрединг, этот важнейший элемент тектоники плит, получил в исследованиях последних десятилетий полное и убедительное подтверждение.

## КАК ОБСТОИТ ДЕЛО С СУБДУКЦИЕЙ?

Значительно сложнее обстоит дело со вторым элементом этой теории — субдукцией, т. е. пододвиганием, поглощением океанической коры на активных окраинах континентов, предположительно компенсирующем спрединг. Осевые части глубоководных желобов — выходы зон субдукции на поверхность дна океана — пока не доступны ни бурению, ни визуальным наблюдениям с подводных лодок, хотя такие эксперименты и планируются на ближайшие годы. Тем не менее глубоководное бурение и сейсмические исследования в Тихом и Атлантическом океанах уже сейчас дали большой и важный материал. Главное, что показали профили, построенные по данным

бурения,— это большое разнообразие конкретных видов субдукции и несоответствие многих из них традиционной модели, разработанной только по сейсмическим данным.

Согласно этой модели, внутренний (островодужный, континентальный) склон желоба представляет собой «аккреционную призму», которая сложена осадками, содранными с пододвигающейся океанической плиты. Наибольшее соответствие этой модели обнаружил Барбадосский профиль, отчасти Алеутский и Нанкайский, то же можно предположить для Зондской дуги и желоба. Напротив, в Марианском профиле и двух центральноамериканских, в районе Гватемалы, аккреционной призмы не обнаружено: в первом океаническая кора круто уходит вглубь вдоль оси желоба, в остальных внутренний склон желоба сложен надвинутыми на него породами континента. Во всех этих случаях океаническая плита вместе с перекрывающим ее осадочным слоем полностью проскальзывает под литосферу островной дуги. Промежуточный характер носят Японский и Мексиканский профили. Здесь аккреционные призмы присутствуют, хотя и имеют ограниченный объем. Но самое примечательное состоит в том, что они сложены материалом не океанического, а континентального происхождения. Иначе говоря, эти окраины не расширяются за счет океана, а в них происходит как бы самопожирание континентальной коры. Что же касается гватемальской окраины Центральной Америки, то здесь действительно можно говорить о «тектонической эрозии» континента, об обламывании континентальной коры и ее подмятии под континент. Вероятно, в наиболее крупном масштабе такая эрозия проявилась вдоль Перуанско-Чилийского желоба; именно она должна быть ответственна за то, что уже у самого берега здесь выходят на поверхность древние континентальные породы массива Арекипа.

Таким образом, процессы, происходящие на конвергентных границах плит, весьма разнообразны. Однако это не дает основания сомневаться, что активные окраины континентов развиваются в условиях сжатия океанической коры и ее поглощения. Разнообразие форм субдукции, очевидно, обусловлено изменчивостью ряда таких связанных между собой факторов, как активность надвигающейся и пододвигающейся плит, возраст океанической плиты, скорость субдукции, угол наклона сейсмофокальной поверхности и масштаб по-

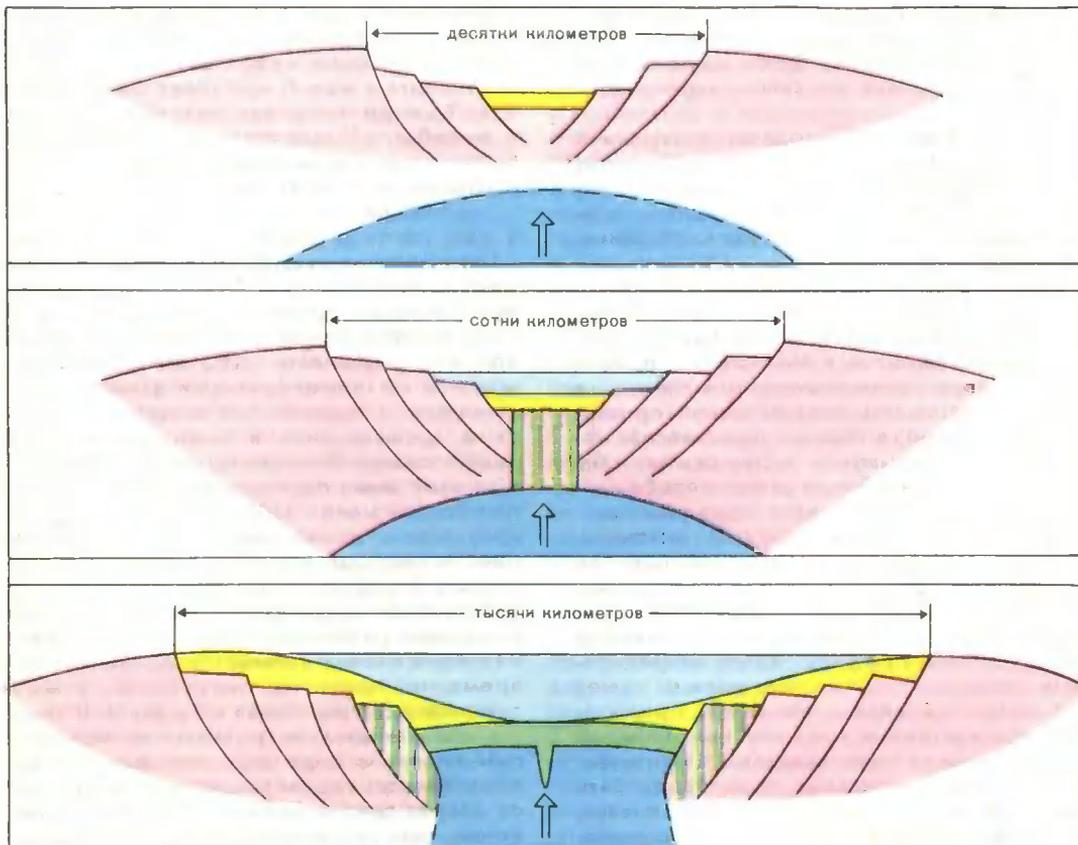
ступления осадков в глубоководные желоба. Ясно, например, что мощные аккреционные призмы развиваются там, где с континента в желоб поступает много осадков. Еще до того, как началось бурение в желобах, разные проявления субдукции были теоретически предсказаны О. Г. Сорхтиным и Л. И. Лобковским.

Между тем ряд исследователей, как у нас, так и за рубежом, пришли к отрицанию явления субдукции вообще, что наряду с признанием реальности спрединга автоматически привело их к концепции расширяющейся Земли. Легко показать, однако, что реальность субдукции подтверждается не только прямыми данными сейсмологии и бурения, но и другими фактами, касающимися, в частности, истории Тихого океана. Во-первых, известно, что существует явное противоречие между древностью (не менее 1700—1300 млн лет) Тихого океана, доказываемой всей информацией о породах его обрамления, и молодостью (не более 180—200 млн лет) его базальтовой коры. Это противоречие невозможно разрешить, допустив, что древняя кора океана залегает в основании современной коры, или погрузилась в мантию, или «растворилась» в базальте. К тому же мы находим ее реликты на периферии океана в виде офиолитовых поясов, закономерно удревняющихся с удалением от современного океана. Это однозначно доказывает аккрецию коры периферических континентов за счет коры океана. Во-вторых, как показали Дж. Гиллули и А. П. Лисицын, объем осадков, сохранившихся на дне Тихого океана, существенно меньше объема осадков, снесенных в океан с континентов. И, в-третьих, если бы Тихий океан, подобно Атлантическому, образовался путем раздвига, не сопровождавшегося субдукцией, следовало ожидать симметричного расположения на его дне зон коры разного возраста. В действительности же наблюдается резкая асимметрия.

Следовательно, нет необходимости искать альтернативу тектонике плит в виде гипотезы расширяющейся Земли, тем более что последняя сама наталкивается на ряд трудностей.

#### КОНЦЕПЦИЯ РАСШИРЯЮЩЕЙСЯ И ПУЛЬСИРУЮЩЕЙ ЗЕМЛИ

Одно из основных противоречий возможному расширению Земли связано с вопросом о происхождении водной массы современных океанов. Если океаны образовались лишь в последние 200 млн лет,

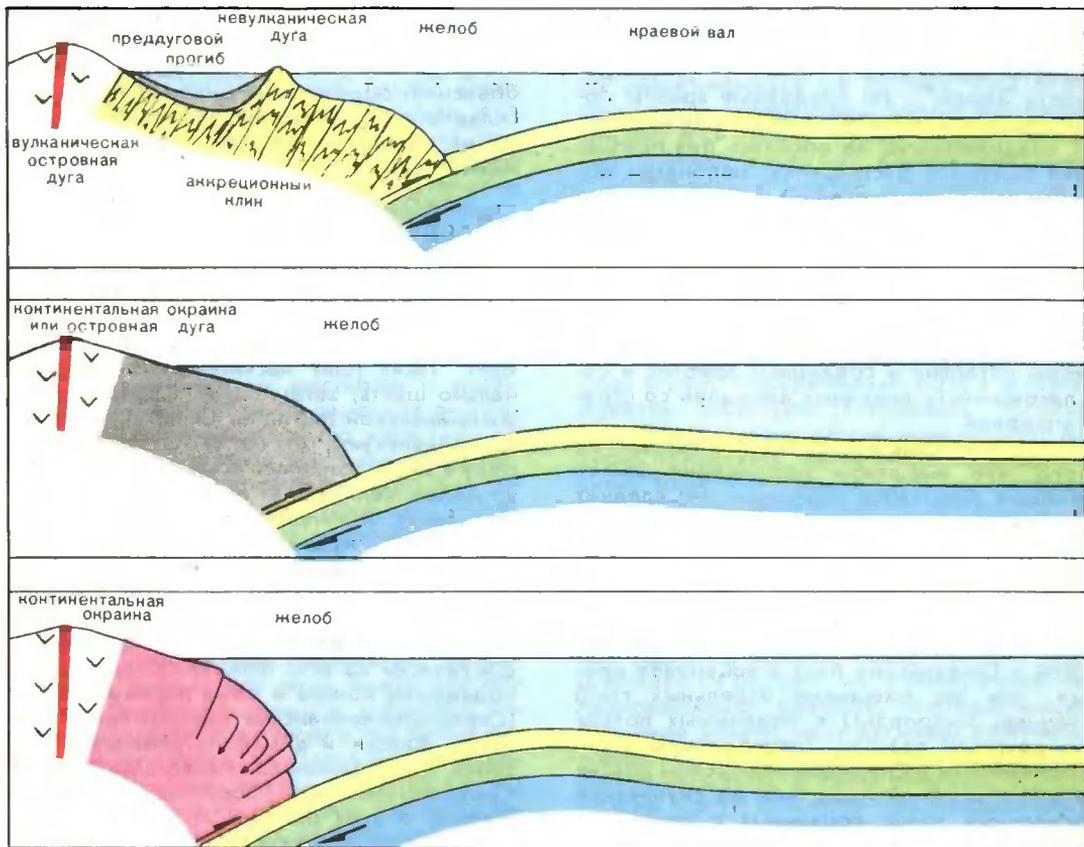


Три стадии развития рифтогенеза. Вверху — внутриконтинентальный рифтогенез; континентальная кора испытывает растяжение и утонение до нескольких десятков километров. В середине — межконтинентальный рифтогенез; континентальная кора в осевой зоне рифта пронизывается базальтовыми дайками, проникающими из астеносферы. Внизу — рифтогенез сменяется спредингом; в осевой зоне рифта происходит образование базальтовой океанической коры, возникает океанический бассейн. Стрелкой показан подъем мантийного дна при на протяжении всех трех стадий рифтогенеза.

- Осадки
- Континентальная кора
- Верхняя мантия
- Базальтовые дайки в утоненной континентальной коре
- Океаническая кора

то никакой процесс дегазации мантии не мог бы заполнить их за это время водой. А если Мировой океан существовал и раньше, то где он находился? Согласно тектонике плит, в древности существовали такие океаны, как Урало-Охотский, Тэтис, Палеоатлантический, которые исчезли в результате субдукции, а также обдукции (надвижения на континент) их коры. С позиций же расширяющейся Земли, этих океанов быть не могло, и вода должна была покрывать континенты. Но образованию современных океанов предшествовал как раз геократический период перми и триаса, т. е. период господства суши.

Гипотеза расширяющейся Земли не дает удовлетворительного объяснения и происхождению складчатых горных сооружений, которые, по данным структурной геологии и сейсмологии, сформировались в обстановке горизонтального сжатия, а не растяжения. Она не объясняет также факта повсеместного (исключая рифтовые зоны) присутствия значительных напряжений сжатия в горных выработках и оча-



Три варианта строения зон субдукции. Вверху — классическая схема строения активной континентальной окраины, разработанная по данным сейсмологи до начала глубоководного бурения в океанах и подтверждавшаяся на примере о-ва Барбадос в Атлантике, представляющего собой элемент палеовулканической островной дуги. Однако в ходе бурения выяснилось, что мощный аккреционный клин с невулканической островной дугой образуется преимущественно в тех случаях, когда в желоб поступает много осадков с континентов, в частности, в результате выноса обломочного материала крупными реками. В середине — субдукция без аккреции, обнаруженная в результате бурения у берегов Гватемалы. В этом варианте субдукции вся океаническая кора проскальзывает под сложенный древними породами континентальный силен, не наращивая его. Сходная картина обнаружена в Марианском желобе, но там наклон океанической коры значительно круче. Внизу — тектоническая эрозия склона континента, при которой силен подминается под континент. Этот вариант субдукции предполагается вдоль тихоокеанского побережья Центральной и Южной Америки.

-  Мантия
-  Древняя континентальная кора
-  Молодые континентальные породы
-  Океан
-  Вулканический пояс (дуга)

-  Осадки и породы аккреционного клина
-  Океаническая кора

гах землетрясений. Данные палеомагнетизма, полученные разными методами, указывают на возможность изменения радиуса Земли не более чем на 5 % за последние 400 млн лет. Наконец, плитотектонические реконструкции (в частности, определение мгновенной кинематики плит), основанные на постулате неизменности радиуса Земли, дают удовлетворительные результаты.

Сознавая трудности, связанные с признанием быстрого расширения Земли, некоторые исследователи стремятся дока-

зять, что спредингом создано не ложе океанов в целом, а лишь срединные хребты, занимающие только 14 % поверхности Земли<sup>5</sup>. Но срединные хребты образовались в течение последних 40 млн лет, и, следовательно, не обойтись без признания быстрого расширения, непонятно почему начавшегося столь поздно. Кроме того, нет никаких оснований считать, что абиссальные котловины океана созданы не спредингом, а простым погружением континентальной коры. Этому противоречат данные сейсмозондирования и драгирования, указывающие на тождественность коры котловин и срединных хребтов и согласованность линейных аномалий со стратиграфией.

Некоторые исследователи исходят из того, что масштабы расширения Земли меньше масштабов спрединга. Но следует заметить, что это спорно. Кроме того, субдукция в принципе — не единственный способ компенсации спрединга. Есть и другие. Например, корбление коры, в широком масштабе происходившее в Центральной Азии после столкновения Индостанской и Евразийской плит в эоценовое время, или же смещение отдельных глыб (точнее, микроплит) в подвижных поясах по крупным сдвигам, наблюдаемое в Тихоокеанском и Средиземноморском поясах и в Центральной Азии, или же скупивание осадочных толщ, сорванных с основания при сближении континентальных блоков без пододвигания одного под другой.

Отвергая гипотезу расширяющейся Земли как альтернативу тектоники плит, не следует отрицать возможности некоторых периодических изменений ее объема и формы, связанных с изменениями скорости вращения. Такие пульсации могут быть ответственны за ускорение спрединга в одни эпохи — эпохи преобладающего расширения — и его замедление (даже прекращение с перестройкой плана расположения осей спрединга) в другие эпохи — эпохи преобладающего сжатия. Таким образом, пульсационный механизм может служить лишь дополнением к основному механизму тектоники плит, ибо сам он не в состоянии дать полного объяснения тектогенезу, хотя бы потому, что нет эпох абсолютного преобладания сжатия или растяжения в истории Земли. Эти два процесса всегда сосуществуют, примером чему служит современная динамика Земли

с рифтовыми зонами и зонами субдукции. Кроме того, пульсационная гипотеза, как и ее предшественница — контракционная, не объясняет образования сложных покровно-складчатых сооружений, что было показано исследователями Альп еще в начале нашего века.

### СКОЛЬКО ЖЕ СУЩЕСТВУЕТ ЛИТОСФЕРНЫХ ПЛИТ?

Одно из основных положений «классической» (т. е. образца 1968 г.) тектоники плит предусматривало, что литосфера разделена на ограниченное число больших плит. Таких плит насчитывалось первоначально шесть, затем семь (с разделением Американской плиты на Северо- и Южно-Американскую), хотя с самого начала наряду с ними пришлось выделить и несколько более мелких плит — Наска, Кокосовая, Карибская, Филиппинская, к которым затем добавились Аравийская и Каролинская. Границы плит проводились и проводятся по сейсмическим поясам. Но карта сейсмичности Земли показывает, что в некоторых районах сейсмичность распространяется фактически на всю площадь современных подвижных поясов и даже перекрывает их (Северо-Американские Кордильеры в пределах Аляски и в районе Большого Басейна, Центральная Азия вплоть до Байкала, Средиземноморье, Восточная Африка). Именно в этих районах Л. П. Зоненшайн и другие исследователи в настоящее время выделяют мелкие плиты, микроплиты и субплиты. Обращает на себя внимание, что микроплиты в большинстве случаев отвечают обособившимся ранее в геосинклинальных поясах срединным массивам или эти массивы (микроконтиненты) составляют их ядра. Вполне понятно, что сейсмичность сосредоточивается в швах между глыбами древней континентальной коры, отвечающих замкнувшимся геосинклинальным системам. Крупные плиты вне подвижных поясов расчленяются на субплиты, например Африканская вдоль Восточно-Африканской рифтовой системы, Индо-Австралийская — вдоль Восточно-Индийского хребта.

Эта тенденция детализации деления литосферы на плиты по мере прогресса исследований представляется вполне естественной и приводит к сближению тектоники плит со ставшим уже традиционным для нашей геологии представлением о слоисто-блоковом строении земной коры, выявленном Л. И. Красным и другими тектонистами. Некоторые геологи считают, однако, что выделение большого числа мел-

<sup>5</sup> Милановский Е. Е. Расширяющаяся и пульсирующая Земля. — Природа, 1982, № 8, с. 46.

ких плит подрывает основы тектоники плит. С этим нельзя согласиться, ибо масштаб относительных смещений крупных плит, мелких плит и субплит несопоставим: для крупных плит он составляет тысячи километров, для мелких — первые сотни, для субплит — первые десятки. Поэтому при глобальных реконструкциях достаточно учитывать перемещения основных плит и наиболее крупных из числа второстепенных, а при детальном анализе развития подвижных поясов необходимо рассматривать и относительные смещения мелких плит.

С вопросом о пределе делимости литосферы на плиты связан и другой вопрос — о степени их жесткости и монолитности. Существование заметных внутриплитных деформаций, давно известных на континентах, а теперь все чаще встречаемых в океанах, закономерно ставит под сомнение этот постулат тектоники плит. Но нельзя забывать, что масштаб этих деформаций не идет в сравнение с масштабом деформаций между плитами, и, естественно, при глобальных построениях ими вполне можно пренебрегать. Отсюда и сходимость результатов глобальных реконструкций кинематики плит. Иначе обстоит дело с реконструкциями в масштабе отдельных подвижных поясов и тем более отдельных их сегментов. Здесь без допущения деформаций внутри и особенно по краям плит уже не обойтись. Но происхождение внутриплитных деформаций и связанного с ними магматизма — самостоятельная проблема, пока еще не нашедшая решения в рамках тектоники плит.

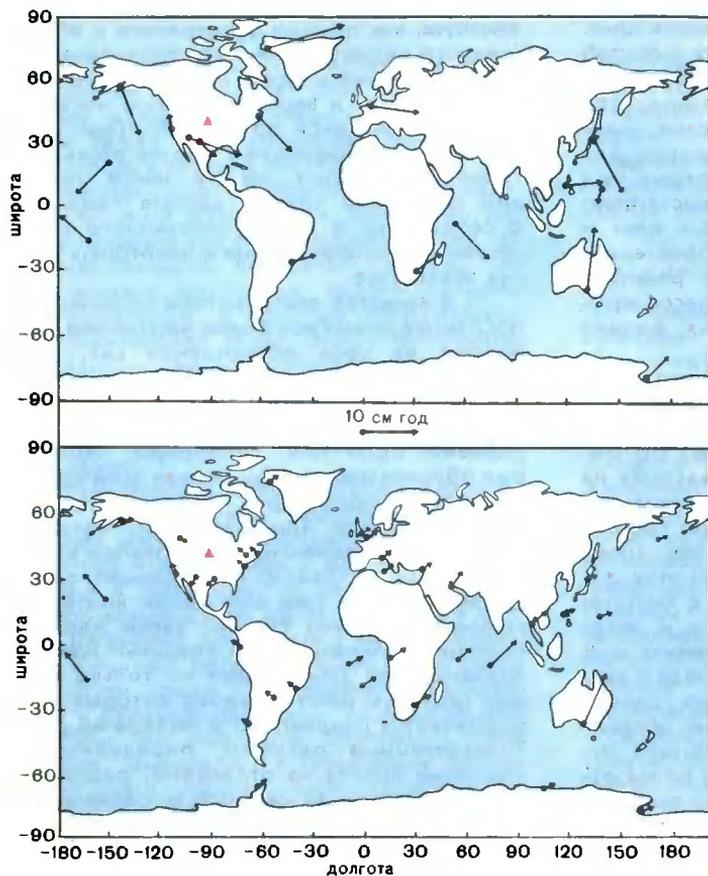
#### О ВЕРОЯТНЫХ МЕХАНИЗМАХ ТЕКТОГЕНЕЗА

Наиболее трудной для тектоники плит, как и для любой другой тектонической гипотезы, остается проблема механизма тектогенеза, проблема сил, управляющих перемещением плит. Разработка этой проблемы идет главным образом в двух направлениях. Одно из них развивает «классическую» идею мантийной конвекции, другое — стремится найти принципиально иные механизмы. На первом направлении намечились следующие тенденции: распространить конвекцию на всю мантию, начиная от границы между мантией и ядром, а основным «возбудителем» конвекции считать дифференциацию вещества на этой границе с дальнейшим ростом ядра; рассматривать конвекцию не как чисто тепловую, а как химико-плот-

ностную, как подъем разогретого и обогащенного легкоплавкими компонентами материала; принять идею отдельной конвекции в нижней и верхней мантии, несколько различающихся по составу. При этом серьезным возражением против общемантийной и к тому же не чисто тепловой конвекции служат данные геохимии о сохранении в мантии первичного соотношения изотопов свинца и некоторых других элементов.

В качестве альтернативы конвекции в последнее время все более настойчиво называют на роль ротационных сил, возвращаясь тем самым к исходной идее Вегенера. Представляется очевидным, что эти силы играют определенную роль в формировании структуры литосферы. Именно они обуславливают общий план этой структуры, проявляясь через общепланетарную сетку разломов. Тем разломам, которые закономерно ориентированы относительно оси вращения Земли, принадлежит определяющая роль при заложении континентальных рифтовых систем, затем перерастающих в океанические впадины. Важное значение при этом имеют не только осевые разломы рифтов, вдоль которых осуществляется раздвиг, но и поперечные им трансформные разломы, определяющие членение океана на отдельные, разновременно и с разной скоростью раскрывающиеся сегменты. В свою очередь, и те и другие могут оказаться унаследованными от более ранних океанических структур (например, Палеоатлантика или океан Япетус), замкнувшихся при образовании континентов. Так, сетка разломов служит средством консервации и возобновления древних структурных направлений, а ее устойчивость позволяет разрешить противоречие между мобилизмом и унаследованностью структурного плана Земли.

Напряжениями, возникающими в результате вращения Земли и особенно при изменении скорости вращения, можно объяснить и другие особенности глобальной структуры Земли. К ним относятся довольно малая подвижность приполярных областей и значительно более высокая — приэкваториальных, «растресканность» полярных шапок радиально расходящимися рифтами, существование гигантских систем однонаправленных сдвигов в области Средиземноморского пояса и в экваториальной зоне по обе стороны Тихого океана и т. д. Перераспределение масс на поверхности Земли может служить причиной смещения оси ее вращения, миграции полюсов, а это, в свою очередь, мо-



Современное смещение плит по отношению к штату Миннесота в США (красный треугольник): вверху — по данным доплеровских измерений со спутника «НАВСАТ», внизу — вычисленное по линиям магнитных аномалий.

жет вызвать дополнительное смещение континентальных и спаянных с ними океанических глыб. Представляется, однако, что главный мотив тектогенеза — не ротационные силы, а глубинные процессы в тепловой машине Земли, проявляющиеся в мантийной конвекции. Современные оценки теплового потока Земли показывают, что, если бы не было конвекции, верхние оболочки нашей планеты давно бы расплавились вследствие низкой кондуктивной теплопроводности.

Еще одна проблема касается уровня смещения верхней оболочки твердой Земли относительно основного ее тела. В тектонике плит за такой уровень была принята граница литосферы и астеносферы, проходящая в верхах мантии. Считалось, что эта граница выражена повсеместно достаточно резко и что она находится на глубине 50—60 км под океанами и 100—120 км под континентами. С накоплением фактического материала выяснилось, что и

уровень кровли астеносферы (как и ее вязкость) сильно колеблется: от 3—4 км под Восточно-Тихоокеанским поднятием до 250 км и больше под щитами древних континентальных платформ. Стали высказываться сомнения в существовании астеносферного слоя под платформами. Тем самым отрицалась возможность мобилизма в глобальном масштабе. Эти выводы представляются излишне поспешными, поскольку именно для щитов наличие астеносферы доказывалось изостатической уравновешенностью мощных ледниковых покровов Гренландии и Антарктиды интенсивным подъемом Канадского и Балтийского щитов после их дегляциации (скорость этого поднятия и дала возможность впервые определить вязкость астеносферы). Следовательно, астеносфера здесь существует, но, вероятно, на значительно большей глубине, чем под плитами, окраинами континентов и особенно океанами. Это обстоятельство, кстати, облегчает понимание фак-

та длительного унаследованного развития платформенных впадин (хотя степень этой унаследованности нередко и переоценивается), а также возобновления магматической деятельности в одних и тех же местах, но через значительные промежутки времени. Все это становится понятно, если допустить, что литосфера под платформами включает и значительный по мощности слой мантии.

Таким образом, основная поверхность скольжения верхней оболочки Земли может находиться на большей глубине, чем считалось прежде. В областях с повышенным тепловым потоком на разных уровнях литосферы возникают дополнительные зоны частичного плавления, воспринимаемые сейсмикой как волноводы и представляющие более или менее протяженные астенوليны. Как правило, они приурочены к сейсмическим разделам Мохоровичича (Мохо) и Конрада, выступающим в этом случае в качестве внутрилитосферных поверхностей смещения. По поверхности Мохо или несколько глубже нее происходит смещение офиолитовых покровов, удваивающих мощность океанической коры или надвигающихся на края континентов. По поверхности Конрада или вблизи нее смещаются так называемые покровы основания, включающие породы гранитно-гнейсового слоя коры (Гималаи, Скандинавия, Альпы). Еще одна поверхность скольжения проходит часто в основании осадочного чехла, способствуя образованию «тонкокожей» тектоники западных склонов Урала и Аппалачей, внешних зон Альп и т. д. И, наконец, поверхностями срыва уже внутри осадочного чехла служат соленосные или глинистые толщи. Интересно, что срыв и скольжение могут происходить не только при сжатии, но и при растяжении, примером чего может служить образование листрических сбросов, на глубине сливающихся в единую поверхность скольжения. Все это в совокупности образует тектоническую расслоенность литосферы, представление о которой выдвинуто А. В. Пейве и разрабатывается в Геологическом институте АН СССР, а ныне и зарубежными учеными.

Расслоенность литосферы усложняет простую картину перемещения литосферных плит, рисуемому тектоникой плит, но не отменяет ее. Чем более высокое положение занимает внутрилитосферная поверхность скольжения, тем на более ограниченной площади может проявляться смещение по ней.

\*

Подведем некоторые итоги сказанному. Теория тектоники литосферных плит остается на сегодня наиболее полно разработанной тектонической концепцией, основные положения которой нашли свое экспериментальное подтверждение, по крайней мере в общей форме. В 1983 г. в печати появились первые сообщения о результатах еще одного эксперимента — измерения современных горизонтальных перемещений континентов доплеровским методом с искусственных спутников Земли. Они подтвердили смещение континентов. А впереди новые точные измерения с помощью установленных на Луне и спутниках оптических отражателей.

Но наряду с этим стало ясно, что «классическая» тектоника плит слишком схематично описывала процесс тектогенеза и что в действительности картина строения и развития тектоносферы значительно сложнее, особенно если перейти от глобального масштаба исследований к региональному. Кроме того, ряд особенностей тектогенеза (например, внутриплитная тектоника) первоначально остался за рамками ее рассмотрения. Основная задача тектонических исследований ближайшего десятилетия — поиск ответов на нерешенные вопросы тектоники плит, как это зафиксировано в программе нового международного проекта «Литосфера». Это не исключает и даже предполагает возможность появления в будущем, в процессе дальнейшей разработки тектоники плит, более общей и более совершенной теории динамики и эволюции Земли, учитывающей, кроме мантийной конвекции, роль вращения Земли и пульсаций ее объема. Такая теория будет включать тектонику плит как частный случай, подобно тому как современный мобилизм фактически включил и ассимилировал некоторые основные положения фиксизма (глубинная дифференциация мантии Земли с подъемом разогретых и более легких дифференциатов и порожденными этим вертикальными движениями и т. д.). Будущая теория должна объяснять всю совокупность эндогенных и экзогенных процессов, включая, в частности, изменения магнитного поля, климата, происхождение оледенений, что в значительной мере делается и нынешней тектоникой плит. В этом видится перспектива дальнейшего развития теоретической геотектоники, обязанной мобилизму своим современным расцветом.

## Минеральные ресурсы на пороге XXI века

Г. А. Мирлин



Гилель Асеевич Мирлин, старший научный сотрудник Комиссии по изучению производительных сил и природных ресурсов при Президиуме АН СССР, кандидат геолого-минералогических наук. Специалист по минеральным ресурсам мира и СССР. В течение многих лет возглавлял Управление перспективного планирования минерально-сырьевых ресурсов Министерства геологии СССР и отдел геологии и минеральных ресурсов Госплана СССР.

В августе этого года в Москве открывается XXVII сессия Международного геологического конгресса (МГК). Как и всегда на этом форуме геологов из разных стран мира, проводимом один раз в четыре года, одной из основных тем обсуждения будут минерально-сырьевые ресурсы, без которых немислимо развитие человеческого общества. Почти полвека отделяют эту сессию от XVII сессии МГК, состоявшейся в 1937 г. также в нашей столице. За прошедшие несколько десятилетий представления об истории развития, геологическом строении и минеральных богатствах планеты сильно изменились. Обострились и проблемы обеспечения человечества топливно-энергетическими, рудными и другими видами минеральных ресурсов, возникшие во второй половине XX в. в связи с громадными масштабами их добычи и потребления.

### ОТ ПАЛЕОЛИТА ДО НАШИХ ДНЕЙ

На всем протяжении истории человеческой цивилизации, измеряемой многими тысячелетиями, кремний, медь, золото, олово, железо, руды других металлов, а позднее каменный уголь, нефть, горючий газ, уран и другие природные вещества минерального происхождения, добываемые из земных недр, имели (и про-

должают иметь в наши дни) огромное значение. Не случайно ранние периоды в истории развития материальной культуры человечества, которые определялись характером использования материалов, получили наименование каменного, бронзового и железного веков. Современный период нередко называют веком нефти или ядерным веком, чтобы подчеркнуть ту важную роль, которую ныне приобрели нефть и уран в качестве важнейших источников современной энергетики.

История добычи и использования многих видов минерального сырья насчитывает несколько тысячелетий. Однако до начала нашего века из недр было извлечено лишь 30 % золота, 15 % меди, 13 % железной руды. Все остальное количество золота, меди и железа было добыто в течение 8 десятилетий XX в. За весь период промышленного использования угля, начиная с XVII в. до 1900 г., было добыто лишь 10 % его суммарного количества. Свыше 99 % нефти извлечено из недр планеты в XX столетии. До начала XX в. в разных странах мира добывались олово, серебро, свинец, цинк, ртуть, сурьма, алмазы, асбест и другие полезные ископаемые. Однако подавляющее их количество (свыше 90—95 %) было добыто в нашем веке. Добыча же природного газа, урана, бокситов, никеля, молибдена, вольфрама и многих дру-

Таблица 1  
Мировая добыча сырья с 1960 по 1980 г.

	1960	1970	1980	Рост за 20 лет
Уголь, млрд т	2,6	2,9	3,7	в 1,4 раза
Нефть, млрд т	1,1	2,3	2,9	в 2,9 раза
Природный газ, трлн м <sup>3</sup>	0,5	1,1	1,6	в 3,2 раза
Железная руда (товарная), млрд т	0,5	0,8	0,9	в 1,8 раза

гих видов минерального сырья была начата в промышленных масштабах лишь в XX столетии и целиком относится к периоду после 1900 г.

Еще в 1926 г. А. Е. Ферсман подсчитал, что человек «истребил» за свою историю 50 млрд. т угля, добыл 2 млрд т железа, 80 млн т меди, свинца и цинка, извлек 20 тыс. т золота. А крупнейший знаток геологии нефтяных месторождений И. М. Губкин сообщил на XVII сессии Международного геологического конгресса, что, по его подсчетам, за всю историю мировой нефтяной промышленности, т. е. за 1857—1937 гг., из недр было добыто 3,8 млрд т нефти. Однако, как ни велики эти цифры, вторая половина XX в., и особенно последнее двадцатилетие (1961—1980 гг.) характеризуются еще более крупными объемами потребления и добычи минерального сырья (табл. 1). По весовому объему минеральных богатств, извлеченных из недр Земли, последний 20-летний период представляет собой своеобразный феномен в истории использования человеком природных ресурсов.

За эти же два десятилетия только в капиталистических и развивающихся странах добыча и производство меди и свинца увеличились в 1,5 раза, цинка и вольфрама в 1,9, никеля в 2,3, бокситов в 3,5 раза.

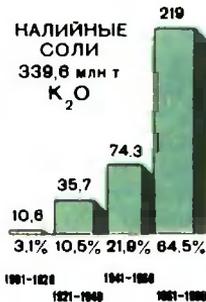
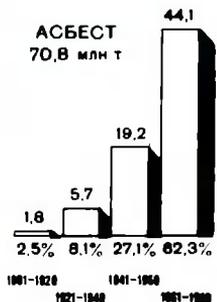
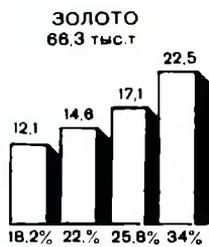
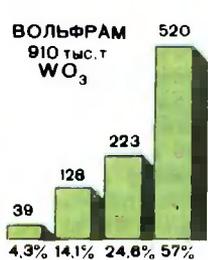
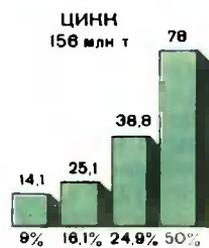
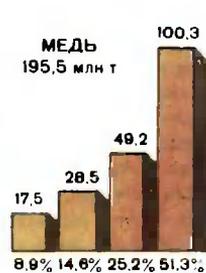
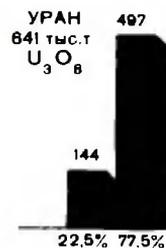
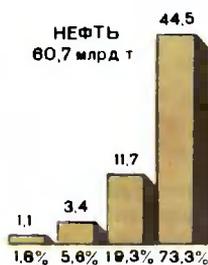
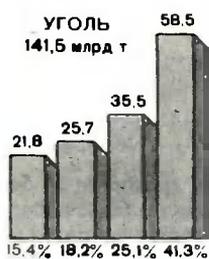
#### ДОБЫЧА МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ СТАНОВИТСЯ СЛОЖНЕЕ И ДОРОЖЕ

В течение всего XX в., и особенно в последние десятилетия, в промышленное освоение была вовлечена значительная часть месторождений, обнаруженных в верхних, наиболее доступных горизонтах земной коры. В большинстве горнопромысловых районов мира добыча угля, руд черных и цветных металлов, других твердых полезных ископаемых опустилась с глубин десятков и первых сотен метров до 400—600 м, во многих районах до 700—1000 м, а на некоторых отдельных рудниках достигла глубин 1,5—2 и даже более 3 км. Из-за многолетней и интенсивной

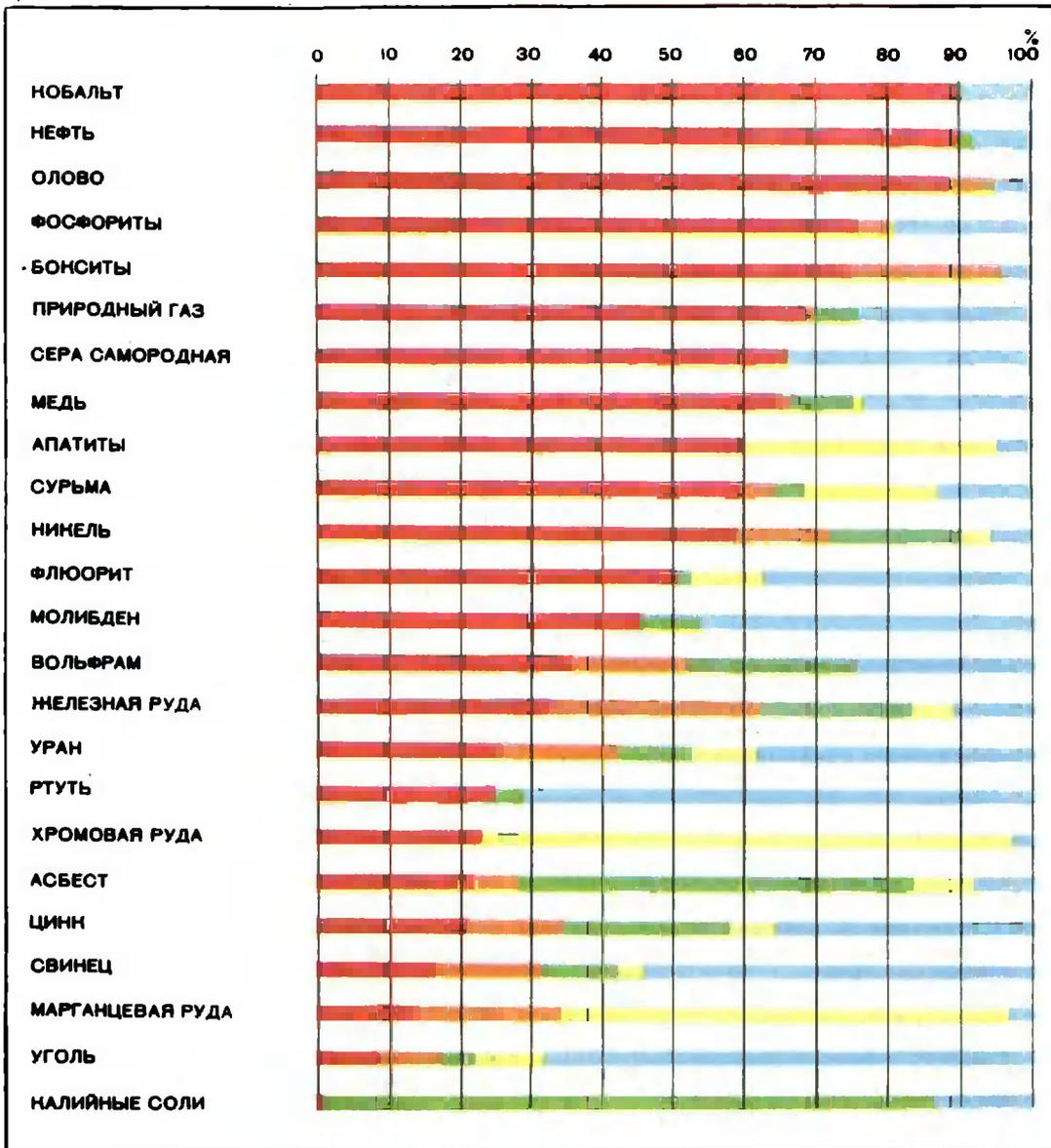
эксплуатации многие крупные и богатые месторождения стали истощаться. Известны примеры полного истощения разведанных запасов в отдельных месторождениях нефти, золота, серебра, ртути, олова, корунда, малахита, даже железной руды. Во многих старых горнорудных районах Европы верхние горизонты месторождений практически полностью выработаны, и шахтная добыча свинца, цинка, меди, руд других металлов достигла глубин более 1500 м. Вследствие интенсивной эксплуатации самых богатых на земном шаре золоторудных месторождений, расположенных на юге Африки (в ЮАР), запасы их стали заметно истощаться, а добыча золота, достигавшая недавно (в 1970 г.) 1000 т упала в 1980 г. до 670 т и продолжает уменьшаться; глубина шахт на этих южноафриканских рудниках достигла 3 км и более.

На большинстве разрабатываемых в течение многих лет месторождений среднее содержание металлов или других полезных компонентов в добываемых рудах заметно снизилось. В XIX в., например, на медных рудниках мира среднее содержание меди в добываемых рудах колебалось обычно от 10 до 4 %, в первой половине XX в. от 4 до 2 %, а в настоящее время на большинстве разрабатываемых месторождений оно снизилось до 1,5—0,5 %. Только за послевоенные 30 лет (1950—1980 гг.) в главнейших районах богатых полиметаллических месторождений Австралии, Канады, США, Мексики и ряда других стран среднее содержание свинца в добываемых рудах снизилось с 3—5 до 1,5—2 %, а цинка — с 8—10 до 4—6 %.

Аналогичное снижение содержания происходит на разрабатываемых месторождениях других цветных и черных металлов. Постепенное уменьшение среднего содержания в добываемых рудах является в определенной мере неизбежным, так как с ростом производства в промышленное освоение вовлекаются месторождения не только с богатыми, но также с рядовыми и даже бедными рудами.



20-летние периоды



Удельный вес развивающихся и капиталистических стран в запасах минерального сырья.

Запасы развивающихся стран

Запасы капиталистических стран:

- Австралии
- Канады
- ЮАР
- и других

← Динамика добычи важнейших видов минерального сырья в XX столетии (1901—1980 гг.) по 20-летним периодам. По углю, нефти, природному газу и железной руде приведены данные о мировой добыче, по всем остальным ископаемым — добыча капиталистических и развивающихся стран.

Увеличение глубин разведки и добычи минерального сырья, снижение содержания полезных компонентов в добываемых рудах, а также другие осложняющие факторы ведут к значительному удорожанию добычи и, в связи с этим, к непрерывному увеличению цен на многие важнейшие виды полезных ископаемых. Только с 1971 по 1980 г. мировые цены на железную руду, медь и никель увеличились в 2 раза, на хромовую руду, цинк, вольфрам, марганец и алюминий — в 2,5—3 раза, на олово и молибден — в 5—5,5 раза, на фосфатные руды в 3,6 и на калийные соли в 7,3 раза. Особенно повысились мировые цены на минеральное топливо, в том числе на уголь в 4,6 раза, на природный газ в 10,4, а на нефть — почти в 15 раз.

#### МИНЕРАЛЬНЫЕ РЕСУРСЫ КАПИТАЛИСТИЧЕСКИХ И РАЗВИВАЮЩИХСЯ СТРАН

Для большинства промышленно развитых капиталистических стран проблема удовлетворения непрерывно возрастающей потребности в минеральном сырье становится все более острой. Это следствие не только роста промышленного производства и значительного сокращения относительно доступных в техническом и экономическом отношениях источников минерального сырья внутри стран, но и неустойчивости импорта сырьевых ресурсов из развивающихся стран Азии, Африки и Южной Америки в связи с коренными изменениями, происходящими в мировой политической обстановке. Многие кризисные процессы и военно-политические осложнения последних десятилетий, продолжающиеся и в наши дни (в районах Ближнего и Среднего Востока, в странах Южной и Центральной Африки, в государствах Южной Америки, во многих странах Азии) — непосредственное отражение борьбы США, Японии, ФРГ, Великобритании и других промышленно развитых капиталистических государств за овладение источниками минеральных богатств.

Известно, что из-за природно-геологических особенностей строения каждого из континентов месторождения полезных ископаемых распределены по странам очень неравномерно. Почти 95 % мировых угольных ресурсов сосредоточено в недрах стран Северного полушария, в том числе около 63 % в Азии, 26 % в Северной Америке и около 6 % в Европе. Только немногим более 3 % мировых запасов угля нахо-

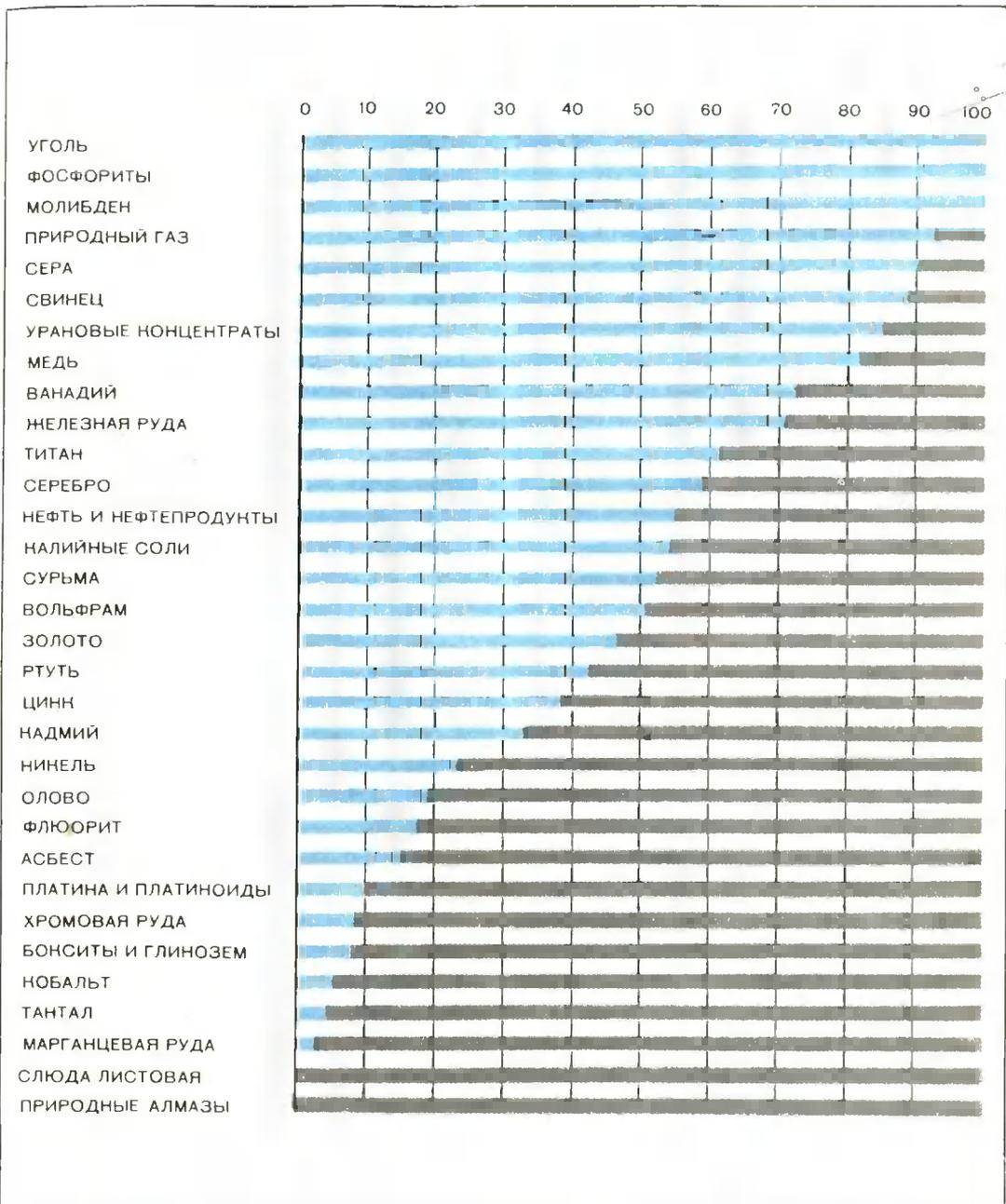
дится в Австралии и лишь 1 % в Африке (преимущественно в ЮАР). В странах Южной Америки угольные месторождения промышленного значения отсутствуют. Аналогичная или еще более контрастная неравномерность распространения в литосфере сврйственна месторождениям нефти и газа, фосфатов, бокситов, марганцевых и хромовых руд и, особенно, месторождениям цветных и редких металлов или таких полезных ископаемых, как асбест, слюда, графит, алмазы.

Значительная часть мировых запасов многих важнейших видов минерального сырья сосредоточена в недрах развивающихся стран. Их удельный вес в суммарных достоверных и вероятных запасах капиталистических и развивающихся стран (по данным на начало 80-х гг.) составляет: нефти — почти 90 %, природного газа — около 70 %, бокситов — 74 %, олова — 87 %, кобальта — 90 %, меди — более 65 %, фосфоритов — 75 %, никеля, сурьмы и апатитов — 60 %.

Крупные запасы ряда полезных ископаемых разведаны также в развитых капиталистических государствах. Однако по отдельным странам эти запасы распределены крайне неравномерно. Так, свыше 83 % суммарных запасов угля этих государств сосредоточено в недрах лишь пяти стран — США, ФРГ, Великобритании, Австралии и ЮАР. Почти 86 % запасов калийных солей сосредоточено в недрах одной Канады, 87 % запасов марганцевых руд заключено в недрах ЮАР и Австралии, почти 93 % всех ресурсов хромитов — в недрах ЮАР и Зимбабве и т. д.

Преобладающая часть добываемых в развивающихся странах минеральных богатств импортируется в развитые капиталистические государства. Все страны Западной Европы и Япония находятся в большой зависимости от привозного сырья.

Значительными минеральными ресурсами обладают Соединенные Штаты Америки, но и они обеспечивают потребности своей промышленности во многих важнейших видах сырья почти целиком за счет ввоза их из других стран. Большой импорт минерально-сырьевых материалов в США обусловлен не только ограниченностью ресурсов в недрах страны и стремлением их экономного расходования, но также следствием настойчиво проводимой политики захвата богатых и относительно дешевых минеральных богатств слаборазвитых стран.



Зависимость экономики США от импортного сырья (в % от потребления по данным 1979—1981 гг.).

Обеспеченность США сырьем за счет:

- собственными месторождениями
- импорта из других стран

## МИНЕРАЛЬНЫЕ РЕСУРСЫ В РАЗВИТИИ ЭКОНОМИКИ СССР

Экономика Советского Союза почти полностью развивается на базе отечественного минерального сырья. Большая территория СССР, особенности ее геологического строения и широкое планомерное развитие геологоразведочных работ обусловили возможность создания в стране мощного минеральноресурсного потенциала.

Все отрасли горнодобывающей промышленности СССР достигли в настоящее время высокого уровня развития, при этом темп роста добычи важнейших полезных ископаемых в Советском Союзе, особенно в последние десятилетия, был еще более значительным, чем в других странах мира.

Разведанные в СССР месторождения полезных ископаемых позволили обеспечить рост добычи всех важнейших видов минерального сырья. Особенно интенсивным этот рост был в послевоенные десятилетия, что видно из следующих данных (в сравнении с довоенным 1940 г., см. табл. 2).

Выявленные в недрах страны минеральные ресурсы обеспечивают необходимый рост всех отраслей горнодобывающей промышленности в настоящее время и на перспективу. Более того, СССР оказывает социалистическим государствам — странам СЭВ — значительную помощь в обеспечении развития их экономики каменным углем, природным газом, нефтью, железной рудой. Экспорт минерального сырья или его производных в некоторые капиталистические страны компенсируется этими странами поставкой в СССР технического оборудования.

Однако, разумеется, минеральные богатства в недрах СССР не безграничны. Как и во всех других странах мира, условия эксплуатации месторождений минераль-

ного сырья с каждым десятилетием и даже с каждым годом становятся все более сложными и требуют непрерывно возрастающих затрат. Это происходит в связи с выработанностью довольно многих, ранее разведанных богатых месторождений, с необходимостью вовлечения в промышленное освоение месторождений с рядовыми или даже с относительно бедными рудами, с увеличением глубин разведки и добычи, с перемещением добывающих отраслей в новые, нередко труднодоступные или необжитые северные и восточные районы страны.

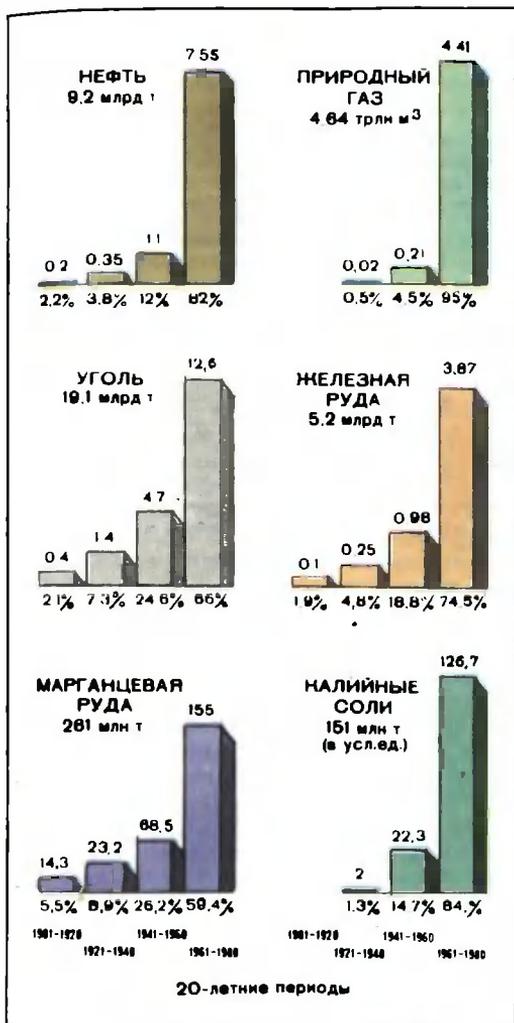
Можно привести некоторые примеры усложнения условий современного развития добывающей промышленности СССР. Среднее содержание, например, железа в добываемых рудах снизилось в целом по стране с 48,7 % в 1955 г. до 40,8 % в 1965 г. и до 36,5 % в 1975 г. В 1955 г. для производства 1 т товарной руды достаточно было добыть 1,2 т сырой руды, а в 1975 г. необходимо было извлечь из недр уже 1,94 т и в 1980 г. — свыше 2 т сырой руды. Это вызывает увеличение объема рудной массы, подлежащей обогащению, одновременно возрастают отходы пустой породы, сбрасываемой в отвалы. Аналогичное снижение среднего содержания в добываемых рудах происходит также на разрабатываемых месторождениях цветных металлов и других полезных ископаемых. Опыт показывает, что примерно за каждые 10—12 лет происходит удвоение горной массы, извлекаемой из недр страны, что не только значительно удорожает горное производство, но и осложняет экологическую обстановку в районах добывающих предприятий.

Значительно увеличиваются глубины эксплуатации многих месторождений — достаточно напомнить о глубоких шахтах угольного Донбасса или железорудного Кривого Рога, о глубоких рудниках на Североуральских месторождениях бокситов или

Таблица 2

Добыча и производство в СССР некоторых видов минерального сырья с 1940 по 1983 г.

	1940	1950	1960	1970	1983	Рост с 1940 по 1983 г.
Уголь, млн т	166	261	510	624	716	в 4,3 раза
Нефть и газовый конденсат, млн т	31,1	37,9	148	353	616	почти в 20 раз
Природный газ, млрд м <sup>3</sup>	3,2	5,8	47,2	198	536	в 167 раз
Железная руда, млн т	29,9	39,6	106	197	245	в 8 раз
Сталь, млн т	18,3	27,3	65,3	116	153	в 8 раз
Цемент, млн т	5,8	10,2	45,5	95,2	128	в 22 раза



Динамика добычи важнейших видов минерального сырья на территории СССР в XX в. (1901—1980 гг.) по 20-летним периодам.

на медно-никелевых залежах Норильска. Средняя глубина буровых скважин при разведке нефтяных и газовых месторождений увеличилась в целом по стране с 1350 м в 1950 г. до 2500 м в 1970 г., а в начале 80-х годов приблизилась уже к 3000 м. В ряде районов страны ныне разведываются и эксплуатируются нефтегазовые горизонты, находящиеся на глубинах 4—6 км и более.

В течение последних десятилетий происходят коренные сдвиги в территориальном размещении производительных сил страны, связанные с открытием новых крупных источников минерального сырья. Особенно значительны перемещения добывающих отраслей в восточные районы, в недрах которых заключены крупные минеральные богатства, но которые нередко характеризуются суровыми и сложными условиями и требуют для своего хозяйственного освоения больших трудовых и материальных затрат. Наиболее наглядным примером перемещения на восток добывающих отраслей являются коренные изменения в географии нефтяной и газовой промышленности, происшедшие всего лишь за два последние десятилетия и связанные с созданием крупнейшей в стране топливно-энергетической базы в Западной Сибири. Еще в 1960 г. почти вся добыча нефти и природного газа была сосредоточена в Европейской части страны, а в текущем 1984 г. 62 % общесоюзной добычи нефти и более 54 % союзной добычи газа приходится уже на районы Западной Сибири.

### НА РУБЕЖЕ XX И XXI СТОЛЕТИЙ

В связи с усложнением условий добычи полезных ископаемых, а также вследствие кризисных процессов в капиталистической экономике, в конце 70-х и в начале 80-х годов наметилось некоторое замедление темпов роста потребления и добычи минерального сырья, а в отдельных странах капиталистического мира произошло даже снижение достигнутых в середине 70-х годов уровней добычи. Так, суммарная добыча нефти в капиталистических и развивающихся странах уменьшилась с 2,4 млрд т в 1979 г. до 1,9 млрд т в 1982 г., главным образом из-за сокращения ее добычи в Иране, Ираке, Саудовской Аравии, Кувейте, Нигерии, Ливии, Венесуэле и в некоторых других странах.

И тем не менее одновременно с развитием техники и продолжающимся ростом промышленного производства (в первую очередь в социалистических государствах, а также во многих развивающихся странах) общемировая добыча минерального сырья продолжает неуклонно возрастать. При большой противоречивости многочисленных прогнозов, выполненных в последнее время в разных странах, преобладающая часть их, однако, сводится к тому, что мировое потребление и добыча важнейших видов минерального сырья возрастает

Таблица 3

Прогноз добычи минерального сырья в последнем 20-летию XX в.\*

	Добыто из недр с начала века (1901—1980 гг.)	В т. ч. за 20 лет [1961—1980 гг.]	Современный годовой уровень добычи [по усредненным данным за 1980 и 1981 гг.]	1981—2000 гг. Возможные объемы добычи	
				Вариант 1 при сохранении до 2000 г. современного уровня	Вариант 2 при небольшом ежегодном росте
Уголь, млрд т	141,5	58,5	3,7	74	76—79
Нефть, млрд т	60,7	44,5	2,9	58	60—62
Природный газ, трлн м <sup>3</sup>	27,1	21	1,5	30	33—35
Железная руда, млрд т	26,6	14,5	0,9	18	19—22
Бокситы, млрд т	1,2	0,96	0,08	1,6	1,8—2
Медь, млн т	195,5	100,3	6	120	130—140
Никель, млн т	13,2	8,4	0,5	10	12—14
Молибден, млн т	1,8	1,3	0,1	2	2,1—2,2

\* По углю, нефти, природному газу и железной руде указана мировая добыча; по бокситам, меди, никелю и молибдену добыча капиталистических и развивающихся стран.

к началу XXI в. в сравнении с уровнем конца 70-х и начала 80-х годов примерно в 1,5—2 раза (такие расчеты, например, выполнены экспертами ООН).

Возможно при этом, что в связи с сокращением фонда месторождений богатых руд и месторождений, расположенных на доступных глубинах, вследствие усложнения технико-экономических условий и удорожания добычи, а также в связи с принимаемыми во многих странах мерами по снижению энергозатрат, уменьшению материалоемкости, частичной замене дефицитных металлов синтетическими материалами и т. п. добыча минерального сырья в конце XX и в начале XXI вв. будет расти несколько меньшими темпами, чем в предшествующие десятилетия. Возможные варианты объемов добычи минерального сырья показаны в таблице 3.

Из приведенных данных видно, что мировая добыча важнейших видов минерального сырья в последнем 20-летию текущего века превысит добычу за предшествующие 1961—1980 гг. (уже выделявшиеся необычайно крупными размерами добычи) не менее чем в 1,2—2 раза. Количество нефти, которое будет добыто в мире в последнем 20-летию XX в., будет почти равным всему суммарному количеству нефти, добытой за предшествующие 80 лет, а добыча природного газа, бокситов, никеля, молибдена и, вероятно, ряда других полезных ископаемых значительно превзойдет суммарную их добычу из недр за весь период с начала века (1901—1980 гг.).

Одна из наиболее сложных проблем ближайших десятилетий — проблема обеспечения мировой экономики энергетическими ресурсами. Можно предполагать, что не только до конца текущего столетия, но и в начале XXI в. нефть и природный газ сохраняют еще значительную роль в топливно-энергетическом балансе многих стран, а также будут служить важным технологическим сырьем для химической промышленности. Вместе с тем нельзя не учитывать непрерывно возрастающую сложность и стоимость добычи углеводородного сырья. Совершенно неотложной становится необходимость максимально бережливого отношения к ресурсам углеводородов, особенно к нефти, запасы которой во многих странах мира становятся все более ограниченными.

#### РЕЗЕРВЫ УВЕЛИЧЕНИЯ РЕСУРСОВ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ

Возникает вопрос, достаточны ли ресурсы минерального сырья, содержащиеся в недрах земной коры, чтобы обеспечить прогнозируемые объемы добычи в период до 2000 г., а также для того, чтобы продолжалась его добыча в XXI в. и в последующие периоды? Этот вопрос закономерен потому, что в отличие от других природных ресурсов минеральные ресурсы являются в масштабах прошлой и будущей истории человечества невозобновимыми и, строго говоря, в пределах планеты ограниченными и конечными.

В связи с непрерывно увеличивающейся добычей и переработкой громадных количеств минерального сырья, а также в связи с разразившимся в 70-х годах в капиталистических странах энергетическим и сырьевым кризисом, тревога и беспокойство по поводу истощения топливно-энергетических и других минерально-сырьевых ресурсов резко усилились. По некоторым прогнозам зарубежных исследователей, значительная часть разведанных запасов полезных ископаемых будет исчерпана уже в период до 2000 г. или в самом начале XXI в. Вряд ли можно согласиться с такими пессимистическими предположениями.

Конечно, в планетарном масштабе минеральные ресурсы ограничены. Запасы каждого полезного ископаемого, имеющиеся в литосфере, с течением времени только расходуются и не могут быть пополнены. В конкретных месторождениях или даже в отдельных геологических регионах истощение запасов полезного ископаемого, разведанных до определенной глубины, конечно, вполне вероятно. Однако возможность полного физического истощения какого-либо полезного ископаемого из недр земной коры представляется маловероятной или, во всяком случае, весьма отдаленной. Изученные и предполагаемые в недрах запасы полезных ископаемых представляют лишь небольшую часть их суммарных концентраций, содержащихся в мощной коре континентов или под водами Мирового океана, но существующими методами пока не обнаруженных.

До первых десятилетий XXI в. главным ограничением роста добычи минерального сырья будет не столько физическое истощение запасов в отдельных месторождениях и регионах, сколько экономический фактор — усложнение и удорожание разведки, добычи, обогащения и переработки минерального сырья. Только технический прогресс в добывающей промышленности может стать главнейшим средством ослабления отрицательного действия этого фактора. Постоянное совершенствование способов добычи и технологии обогащения повышает эффективность использования полезных ископаемых, в том числе и тех, которые считались в прошлом бедными и невыгодными для промышленности.

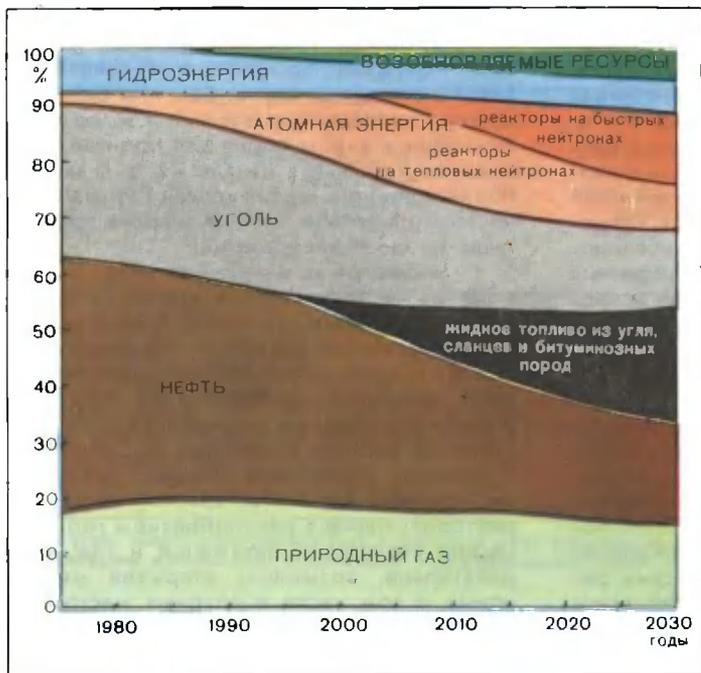
Чем выше техническая вооруженность, тем шире ассортимент полезных ископаемых и новых видов минерального сырья, вовлекаемых в промышленное производство. Так, каменный уголь стал полезным ископаемым только с XVII в. Нефть

была известна человеку за 6 тысячелетий до н. э., однако стала минеральным ресурсом, имеющим промышленное значение, лишь с середины XIX в. Бокситы были открыты в последней четверти XIX в., но стали важнейшим видом сырья для производства алюминия только в начале XX в. С начала промышленного использования урана в качестве мощного источника энергии прошло лишь около 4 десятилетий.

Несмотря на истощение запасов в отдельных месторождениях или их сокращение в отдельных странах, разведанные и предполагаемые (прогнозные) запасы полезных ископаемых в мире в целом позволяют оценивать обеспеченность будущей добычи ресурсами минерального сырья достаточно высоко. Особенно это относится к странам, территории которых охватывают крупные сегменты земной коры, характеризующиеся разнообразием геологических структур и формаций и где, следовательно, возможны открытия многих новых, в том числе и крупных месторождений (СССР, Канада, КНР, США, Бразилия, Австралия, Индия и др.).

Разведанные запасы большинства полезных ископаемых капиталистических и развивающихся стран обеспечивают возможность сохранения современного уровня мировой добычи на значительные сроки, вплоть до начала или до середины XXI в. Если же учесть, кроме того, предполагаемые прогнозные ресурсы (пока недостаточно изученные и неразведанные), то эти сроки будут еще более длительными. Следовательно, острота проблемы состоит не столько в количестве запасов полезных ископаемых в недрах, сколько в том, что значительная часть имеющихся запасов сосредоточена в месторождениях, залегающих в сложных условиях, или представлена относительно бедными рудами.

Несмотря на длительную многовековую историю мировой горной промышленности, добычей затронуты лишь самые верхние структурные этажи литосферы. С развитием технических средств относительно глубокие слои земной коры станут крупным резервом для открытия новых месторождений и продуктивных горизонтов. Развитие современной техники, в том числе техники буровых работ, позволяет исследовать и осваивать все более глубокие слои земной коры. В конце XIX в. (1890—1900 гг.) самыми глубокими в мире считались скважины, пробуренные до 360—400 м. Через четверть века — в 1925 г. — самой глубокой на планете была скважина Розенкранц-Филд в Калифорнии, пробуренная



Структура первичных энергоресурсов в конце XX и начале XXI в., по прогнозу Международного института прикладного системного анализа (Лаксбург, Австрия).

Обеспеченность капиталистических и развивающихся стран разведанными запасами сырья [по уровню добычи 1980 г.].

до 2277 м. А в настоящее время из многих миллионов скважин, пробуренных на всех континентах, уже несколько тысяч скважин достигли или превысили глубину 5 км, в том числе несколько десятков прошли более 7 км. В 1981 г. скважина Берта Роджерс-1 в штате Оклахома (США) достигла 9583 м, еще несколько скважин в США, пробуренных через осадочные породы, превысили глубины в 8 км. Однако самой глубокой на земном шаре является Кольская сверхглубокая скважина в СССР, которая бурится сквозь мощную толщу древних кристаллических пород (гранито-гнейсов) и которая в декабре 1983 г. достигла 12 км! Другие глубокие скважины, уже превысившие глубину 7 км, бурят в Западной Украине, в Закавказье, на Северном Кавказе и в ряде других районов СССР. Современные представления о рудообразовательных процессах позволяют рассчитывать на возможность обнаружения богатых рудных скопленений на относительно больших глубинах. Это подтверждается открытием в последние десятилетия глубоко залегающих, но богатых сульфидных медно-никелевых, свинцово-цинковых и других рудных месторождений как в СССР, так и в зарубежных странах. О распространении рудной минерализации на значительные глубины свиде-

тельствуют также данные Кольской сверхглубокой скважины.

Крупным резервом увеличения ресурсов минерального сырья является комплексное использование месторождений полезных ископаемых, преобладающая часть которых по своей естественной геохимической природе представляет ассоциацию нескольких минералов и сложных соединений химических элементов. В месторождениях железных руд часто присутствуют ванадий, кобальт, медь, цинк, сера, фосфор, другие элементы. Из месторождений руд цветных металлов, наряду с ведущими металлами (медь, свинец, цинк, никель и др.), при применении соответствующих технологических приемов могут быть извлечены другие, так называемые попутные, но очень ценные элементы, в том числе золото, серебро, платиноиды, кобальт, редкоземельные элементы. В месторождениях нефти и природного газа содержатся и могут быть использованы промышленностью сера, гелий, а некоторые месторождения углей являются источником германия. Во многих случаях экономическая и техническая ценность попутных компонентов превышает ценность основного полезного ископаемого. Вмещающие горные породы каждого месторождения являются



полезным минеральным сырьем и могут быть рационально использованы, например, в качестве строительных материалов. Широкое использование возможностей комплексного освоения месторождений представляет собой одновременно надежную основу для природоохранных мероприятий.

Одним из крупных и важных резервов увеличения ресурсов минерального сырья является сокращение потерь при их добыче и переработке. При современных масштабах горнодобывающей промышленности ежегодные мировые потери угля достигают 700—800 млн т, железной руды — свыше 50 млн т; потери меди, цинка, свинца и других цветных и редких металлов измеряются сотнями и десятками тысяч тонн. Огромное количество многих ценных металлов и минералов скопилось в отвалах, в хвостах обогащения и в отходах металлургического производства, при этом нередко содержание в них ценных компонентов выше, чем во многих ныне эксплуатируемых бедных рудах. Только коренное совершенствование способов добычи, методов обогащения и технологических схем переработки сырья может обеспечить значительное сокращение больших потерь.

Громадным, пока едва затронутым резервом роста минеральных богатств яв-

ляются недра морских шельфов, склонов и дна Мирового океана. Уже в 70-е годы нашего века значительная часть нефти (свыше 20 %) добывалась на морских нефтепромыслах. Нефть добывается из подводных месторождений Персидского и Мексиканского заливов, Северного и Каспийского морей. Месторождения нефти и газа обнаружены на шельфах других морей и океанов.

Крупным источником рудных полезных ископаемых являются морские россыпи в странах Индийского океана — Индонезии, Таиланде, Малайзии — они служат самым крупным поставщиком олова (в этих странах сосредоточено 3/4 запасов олова капиталистического мира). Прибрежно-морские россыпные месторождения титановых и циркониевых минералов разведаны и разрабатываются на побережьях Австралии, Индии, Бразилии, Мексики, Сьерра-Леоне, Норвегии, США (п-ов Флорида). Особенно большие перспективы увеличения ресурсов рудного сырья в недалеком будущем связываются с железомарганцевыми конкрециями, которыми сложены громадные площади дна Мирового океана. Наряду с железом и марганцем эти конкреции содержат медь, никель, ко-

бальт, иногда цинк, свинец, молибден и другие ценные элементы.

Наконец, сама морская вода является значительным источником многих элементов и минеральных соединений: в настоящее время около трети мирового потребления поваренной соли, пятую часть потребления магния, значительное количество брома получают из морской воды. Все большее внимание привлекают минеральные рассолы и минерализованные воды лагун, озер, некоторых морей, рифтовых зон, которые являются не только поставщиками брома, иода, поваренной соли, мирабилита, но могут стать также источником поступления рубидия, цезия, бора, многих других ценных микроэлементов.

Крупным резервом ближайшего будущего является синтез минерального сырья. Известно, что в СССР, США и в некоторых других странах уже в крупных промышленных масштабах производятся искусственные синтетические алмазы, используемые в качестве высокоэффективного абразивного материала в режущих и шлифовальных инструментах. Широко применяются различные модификации искусственно выращенных технических кристаллов кварца, ведутся исследования и эксперименты по получению синтетической слюды, производятся искусственные рубины и другие искусственные кристаллы. Достижения современной химической промышленности, широко использующей методы органического синтеза, обеспечили возможность производства разнообразных пластических масс и других синтетических конструкционных материалов, относительно недорогих в производстве и по своим техническим свойствам способных частично заменить сталь, алюминий, медь и другие дефицитные металлы. Во многих странах мира ведутся исследования по получению искусственного жидкого топлива из угля, горючих сланцев и битуминозных пород.

В обеспечении развивающейся экономики СССР минеральным сырьем важнейшая роль принадлежит геологической науке и геолого-разведочным работам. Достижение высоких рубежей в развитии горнодобывающих отраслей требует вовлечения в промышленное использование не только уже известных и разведанных месторождений, но также выявления и ускоренной подготовки новых крупных источников минерального сырья. Особенно необходимой является разработка эффективных методов обнаружения месторождений, содержащих относительно богатые руды (в том числе не выходящих на дневную по-

верхность), а также крупных месторождений, с высокой концентрацией запасов. Известно, что в минерально-сырьевом балансе мира, а также в балансах отдельных стран свыше 70—80 % запасов каждого полезного ископаемого приходится на сравнительно небольшое число крупных месторождений и месторождений-гигантов. Остальные 20—30 % запасов обычно сосредоточены по большому числу преимущественно мелких месторождений, крайне обременительных в экономическом отношении. Опыт нашей страны свидетельствует, что геологоразведочные работы должны значительно опережать развитие горнодобывающих отраслей, чтобы заблаговременно обеспечить их надежно разведанными запасами и предоставить промышленности возможность выбора месторождений, характеризующихся наиболее благоприятными технико-экономическими параметрами.

Крупнейшим резервом экономики всех видов материальных ресурсов, в том числе и минеральных, является ограниченное гонки вооружений и последовательное разоружение. Продолжающаяся по вине США и других стран западного блока гонка вооружений находится в острейшем противоречии с ограниченностью минеральных ресурсов. Громадные количества стали, цветных металлов, моторного топлива и других производных минерального сырья, расходуемые на вооружения, могли бы быть направлены в интересах всех народов Земли в мирные отрасли экономики и тем самым содействовать повышению жизненного уровня людей всей планеты.



## В Приморье необходим национальный природный парк

**В. М. Урусов,**

кандидат биологических наук

Новосибирская лаборатория Центрального научно-исследовательского института лесной генетики и селекции Государственного комитета СССР по лесному хозяйству

Новосибирск

Южная оконечность Приморского края — самая обжитая территория Дальнего Востока. И хотя плотность населения этих мест никак не может сравниться с европейской, точно так же как и антропогенная нагрузка на природные экосистемы, тем не менее во многих районах изменяется растительный покров, разрушаются природные ландшафты. Происходит это даже там, где нет промышленных объектов и сельскохозяйственных угодий. Поскольку у населения год от года растут возможности совершать дальние путешествия, местом паломничества отдыхающих становятся все более удаленные от крупных населенных пунктов местности, а в связи с этим все большее число территорий нуждается если не в абсолютной охране, то, по крайней мере, в щадящем режиме.

Охраняемые территории различного статуса в Приморье существуют: заказники организованы еще в начале нынешнего столетия; в 1916 г. создан заповедник Кедровая Падь; длительное время функционируют еще три заповедника, а в 1978 г. начал свою жизнь Дальневосточный морской заповедник в заливе Петра Великого; больше ста лет охраняются леса в пригородной зоне Владивостока; почти полстолетия служит резерватом район Горнотаежной станции ДВНЦ АН СССР. Следовательно, охрана различных биогеоценозов в Приморье налажена. Однако на громадной территории Дальнего Востока, в сущности, не так уж много мест, где был бы предусмотрен организованный отдых, туризм, способствующий одновременно охране природных богатств.

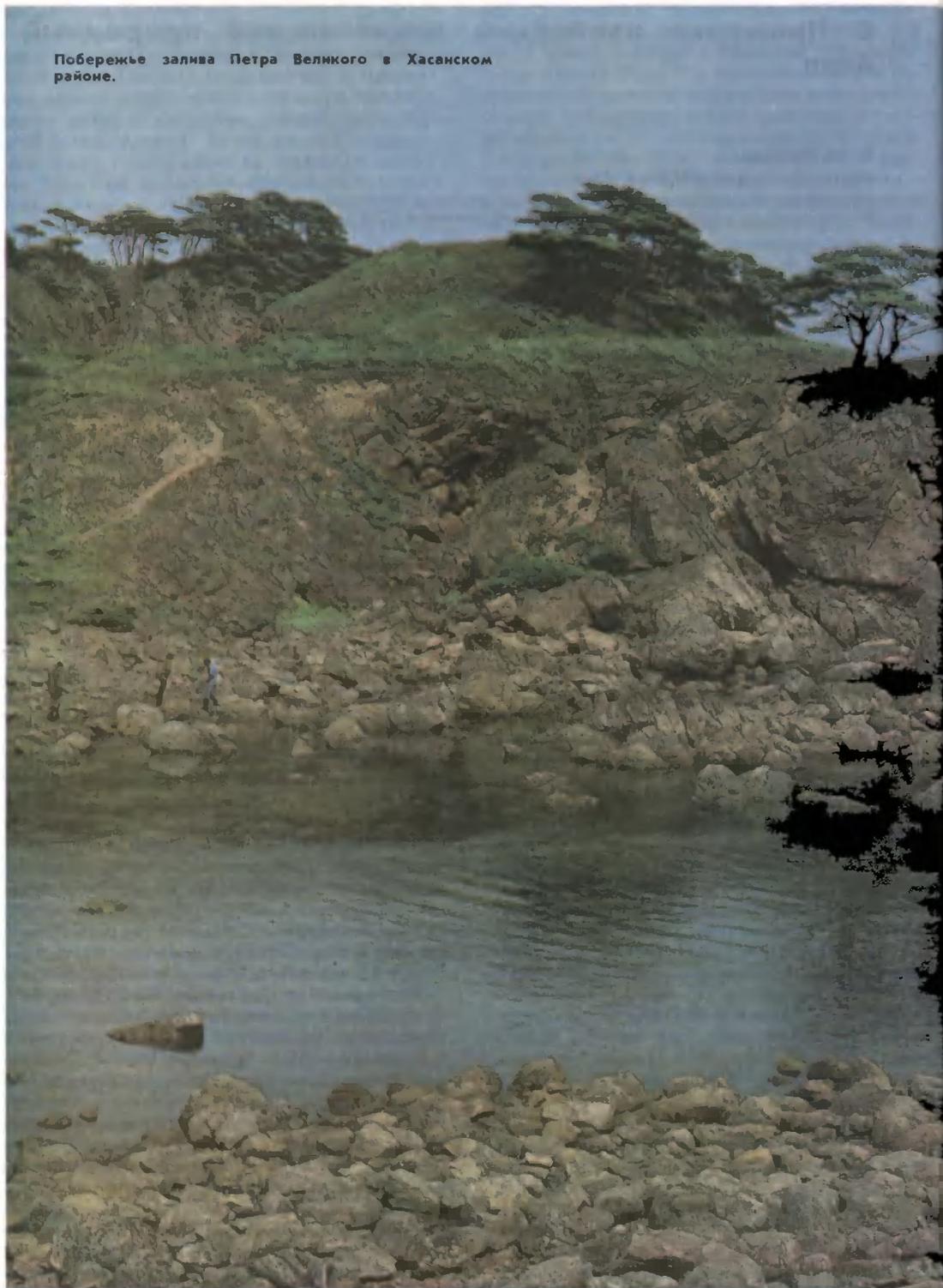
В южной части Приморья, например, работают лишь две туристические базы с постоянными маршрутами разных категорий сложности. Они безусловно нужны: в таких организованных походах туристы придерживаются хотя бы самой необходимой этики поведения в природе. Гораздо хуже, когда неорганизованную публику до-

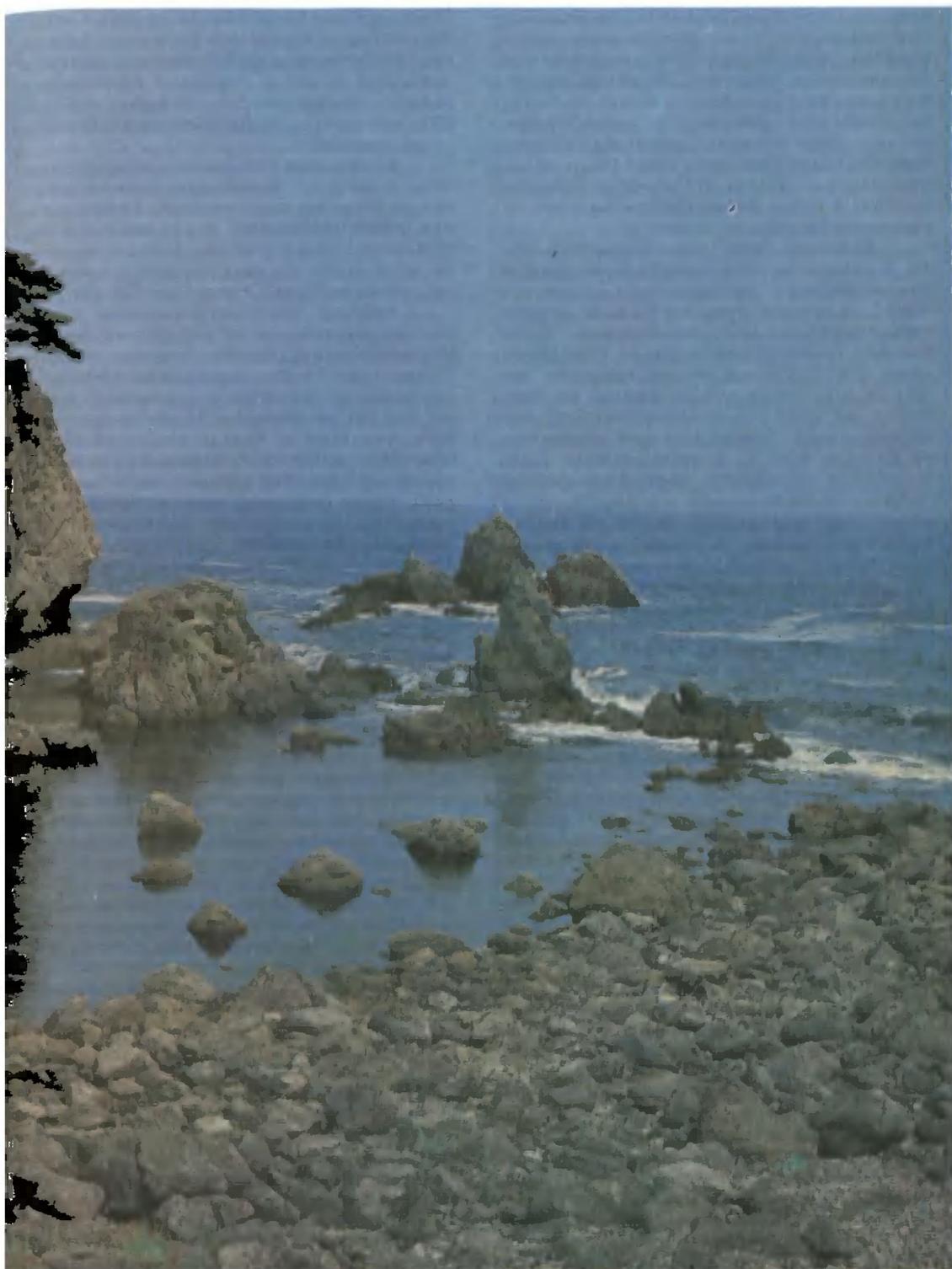
ставляют рейсовые автобусы и теплоходы; за непродолжительный отдых торопливых почитателей уединенных красот природа дорого платит. Стихийно многие районы Приморья сейчас превратились в места массового дикого туризма. Последствия такой «туристической эксплуатации» довольно быстро сказываются: вытаптывается травяной покров и исчезают некоторые растения и животные, что в конце концов приводит к необратимым изменениям природных комплексов. Поэтому вопросы их охраны в наиболее посещаемых населением Приморья местах сейчас стали столь же актуальны, как сохранение редких и исчезающих видов растений, животных и их сообществ, возложенное на заповедники и заказники. Мы видим возможность сберечь природные ценности прибрежных районов Южного Приморья, из-за тихих бухт и песчаных пляжей ставших в последние годы особенно популярными у горожан, организовав там национальный природный парк.

Будучи одной из форм особо охраняемых природных территорий, национальные парки призваны выполнять двойную функцию: способствовать сохранению ценных природных объектов и обеспечивать отдых населения. Создание национальных парков в нашей стране началось немногим более 10 лет назад, и говорить о них как об установившейся форме особо охраняемых природных территорий пока, по-видимому, рано, тем более что общее подоможие о них утверждено только в 1981 г. Однако необходимость организации национальных парков, даже целой их сети, очевидна. В Приморье, например, в первую очередь было бы целесообразно создать национальный парк на побережье Хасанского района — очень популярного среди городских жителей. И недаром — красота и разнообразие ландшафтов здесь удивительны.

К берегу залива Петра Великого выходят отроги Черных гор, входящих в со-

Побережье залива Петра Великого в Хасанском районе.





став Восточно-Маньчжурских. Необычайно красивые, хотя и не поражающие своей высотой, они поднимаются у береговой кромки всего лишь до 200 м над ур. м., и только сопка Туманная на юге п-ова Гамова превышает 500 м. По мере удаления от побережья сопки растут и в заповеднике Кедровая Падь достигают 700, а на Синем Утесе — 900 м. Межгорные впадины выходят к тихим закрытым бухтам с песчаными или галечными пляжами.

Большую часть года в Приморье тепло: к северу от оконечности п-ова Гамова среднегодовая температура составляет  $+4^{\circ}\text{C}$ , а южнее находится самая теплая территория на Дальнем Востоке, здесь средняя температура за год не опускается ниже  $+6^{\circ}\text{C}$ . Самый теплый месяц — август (в это время воздух иногда прогревается до  $+37^{\circ}\text{C}$ ), в сентябре тоже потеплеет: среднемесячная температура воздуха  $+18^{\circ}\text{C}$ , а морской воды у защищенных островами побережий около  $+20^{\circ}\text{C}$ . Осенью, зимой и в начале весны обычно солнечно и сухо, летом же воздух избыточно влажен; в июне — июле густые туманы опускаются с сопки на землю даже днем. В мае — сентябре выпадает основная часть осадков, случаются ливневые дожди. Зима на побережье солнечная, сухая, но не суровая: средняя температура января колеблется от  $-11,5$  до  $-14^{\circ}\text{C}$ , хотя бывают и морозы до  $-30^{\circ}\text{C}$ .

Поразителен по богатству и разнообразию растительный мир. Вдоль приморских обрывов не менее чем на 30 км тянутся рощи сосны густоцветковой (*Pinus densiflora*), определяющие колорит пейзажа; особенно красивы такие рощи на островах и мысах. От самых береговых обрывов встречаются мелкоплодный ольхолистный (*Micromeles alnifolia*), вишня сахалинская (*Cerasus sachalinensis*), редко — реликтовый дальневосточный, или остроколючный, тис (*Taxus cuspidata*), а кустарниковые заросли образуют лещины, смородины, таволги, леспедецы, рододендроны, вейгела ранняя (*Weigela praecox*) и др.; немало различных лиан: виноград амурский (*Vitis amurensis*), виноградовники, 4 вида актинидий, как змеи, обвивающие деревья и делают приморские леса похожими на тропические; встречаются и настоящие ботанические редкости: в распадках водораздела рек Нарвы и Барабашевки — кирказон маньчжурский (*Aristolochia manshuriensis*), крупная лиана Дальнего Востока, со стволами толщиной в руку; а на приморских скалах неподалеку от оз. Хасан — девичий виноград

(*Parthenocissus tricuspidata*) и пуэрария волосистая (*Pueraria lobata*). В Хасанском районе самые крупные в СССР массивы из дуба зубчатого (*Quercus dentata*) с различными видами берез и лип, ясенем горным (*Fraxinus rhynchophylla*) и другими древесными породами.

В верховьях рек сохранились сложные леса, в которых преобладает самая высокая на Дальнем Востоке пихта цельнолистная (*Abies holophylla*). Верхушка этого гигантского дерева иногда достигает высоты 55 м, а ствол — двух метров в диаметре; доживает такой гигант до 450 лет.

Хвойные леса из белококорой пихты (*Abies nephrolepis*) и корейского кедра (*Pinus koraiensis*) украшены мощными 500—700-летними тисами; нередко экзотические диморфаны (семейство аралиевых) старше 300 лет со стволами более чем метрового диаметра и бархат амурский (*Phellodendron amurense*); северные склоны покрыты массивами из разных кленов (их 8 видов), берез (6 видов), одна из которых — железная, или береза Шмидта (*Betula schmidtii*), на гребнях и крутых склонах доживает до 400 лет. Деревья хвойных, лиственных и смешанных лесов щедро перериты лианами и вьющимися травами.

Вместе со специфичной для Дальнего Востока маньчжурской и корейской флорой встречаются и виды, свойственные северной тайге или высокогорьям. Это волчник камчатский (*Daphne kamtschatica*), дерен белый (*Cornus alba*), сирень Вольфа (*Syringa wolfii*). По соседству с редкими орхидными и фиалками растут обычные майники и плауны. В подлеске кустарники цветут с апреля по сентябрь; первым зацветает рододендрон остроколючный (*Rhododendron mucronulatum*), а последними — леспедецы. Травы же цветут даже самой глубокой осенью — в ноябре. В озерах Хасанского района растет лотос (*Nelumbo komarovii*), а на скалах Голубиног Утеса — пуэрария и девичий виноград.

По-видимому, флора Приморья еще не полностью выявлена: недавно в бухте Бойсмана мы нашли вику Ови (определена В. Н. Ворошиловым), известную до той поры в Японии и Корее, но не на территории СССР; южнее этой части бухты собрана узколистная форма ясеня Зибольда, приводившаяся прежде во флористических списках Кореи.

Всего во флоре побережья и речных водоразделов насчитывается больше 1300 видов высших растений, в том числе около 160 — деревьев, кустарников, деревянистых лиан. Более 40 видов

растений включены в «Красную книгу СССР», из них лишь 25 находятся на территории заповедников и там охраняются.

Животный мир Южного Приморья представлен теплолюбивыми видами с большим числом эндемичных и реликтовых форм. Особенно разнообразны насекомые (около 1000 видов): множество разноцветных дневных бабочек, еще больше ночных; все «этажи» лесов населяют жуки, в долинах со старыми ильмами обитает гигантский дровосек (*Callipogon relictus*) до 10 см длиной, можно обнаружить огромную певчую цикаду (*Tibicen bihamatus*). Встречаются здесь и виды беспозвоночных, нигде более на территории СССР не обитающие: гриллоблаттина (*Grylloblattina djakonovi*) — примитивное древнее насекомое, близкое к современным уховерткам, и не менее интересный для энтомологов, редкий даже в Приморье бескрылый реликтовый таракан (*Cryptocercus relictus*).

Видовой состав рыб небогат (12 видов); все постоянные обитатели быстрых приморских речек — мелкие, непрысловые виды. Самая ценная рыба — сима (*Onchorhynchus masu*, один из проходных дальневосточных лососей) заходит на нерест в р. Кедровую. Из 8 видов пресмыкающихся только два — Палласов и восточный щитомордники — ядовитые, остальные — это ужи, полозы, ящерицы. В истоках горных рек обитает реликтовый безлегочный тритон (*Onychodactylus fischeri*) — существо загадочного образа жизни.

На юге Приморья 285 видов птиц, более половины из них гнездятся. На пролете бывают цветной бекас, черный аист и японский журавль. Из 63 видов млекопитающих здесь водятся косуля, кабарга, бурундук, выдра, харза, колонок, рысь, гималайский медведь; включенные в «Красную книгу СССР» — пятнистый олень и горал; виды из «Красной книги МСОП» — амурский тигр и восточносибирский леопард.

Национальный природный парк на юге Приморья сейчас пока не представляется единой территорией, включающей, как установлено «Типовым положением», периферийную, собственно парковую и заповедную зоны. Скорее всего, он может быть системой отдельных, собственно парковых территорий, не всегда соединенных между собой и не везде заключенных в буферную зону. Можно ли будет включить в национальный парк (если идея его создания будет поддержана) нынешние владения заповедника Кедровая Падь и сухопутные участки морского заповедника в заливе Петра Великого — пока неясно,

это должны будут решить организации, занимающиеся планированием национальных парков в РСФСР.

Конкретные границы парковых зон и размеры буферной зоны необходимо будет определить специальными изысканиями. Однако и сейчас ясно, что в собственности парк должны войти территории, где флора и фауна, свойственная данной местности среда, характерные ландшафты и достопримечательности нуждаются в охране; где можно было бы вести научную работу, связанную с охраной природы; обеспечить восстановление ценных элементов природного комплекса, а возможно — и обогащение их путем реинтродукции растений и животных; и, конечно же, наладить организованный туризм.

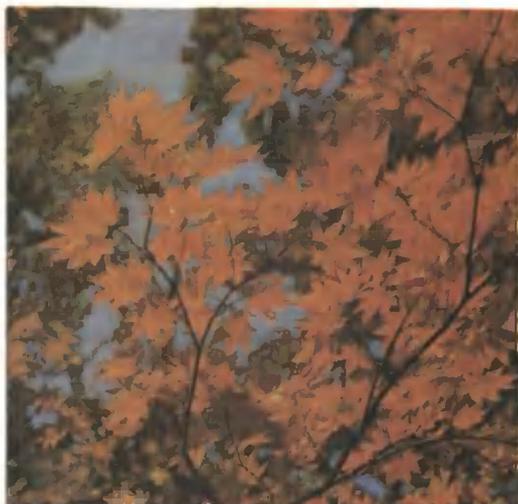
Лучшее место для создания национального природного парка — серия территорий, на севере начинающаяся урочищем Синий Утес (водораздел рек Барабашевки и Нарвы к западу от Кедровой Пади) и верховьями р. Поймы до оз. Лотос. Продолжительный теплый период, южный колорит местности делают эти места уникальными, не имеющими эквивалента где-либо на Дальнем Востоке. Быстрая смена доминирующих древесных пород, типов растительного покрова создают неповторимое разнообразие горнолесных ландшафтов в верховьях рек. Красота морских побережий со скалистыми берегами, глубоко врезанными бухтами, причудливыми островками, скалами, гротами дополняется изящным рисунком сосновых рощ, своеобразием лесов и редколесий дуба зубчатого и железной березы.

Первая из этой серии территорий — урочище Синий Утес, известное своими необычными для широты данной местности почти субтропическими лиановыми лесами, микрозональностью и маньчжурской фауной.

Следующая крупная территория, протяженностью около 30 км, охватывает район от бухты Бойсмана до бухты Теляковского. Это наиболее живописное побережье Дальнего Востока, к тому же здесь у мыса Льва находится самый большой массив дуба зубчатого.

Третья территория — район Голубино Утеса — оз. Лотос. Она необходима для сохранения, восстановления, реинтродукции лотоса, звриалы (*Euryale ferox*), бразении Шребера (*Drasenia schreberi*) и других водных растений; редких лиан — пуэрарии и девичьего винограда; некоторых лилейных, касатиковых, орхидных.

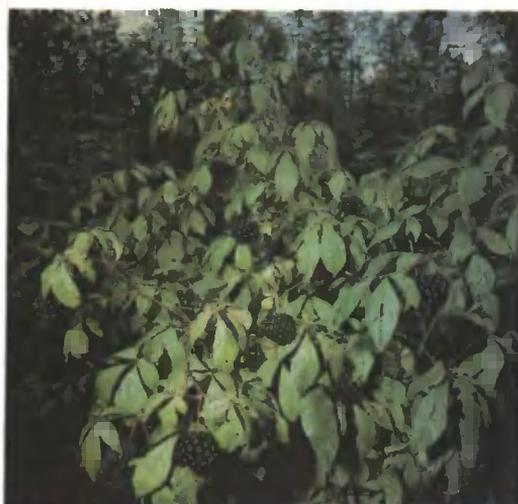
Почти все земли перечисленных тер-



**Клен ложнозибольдов.**

риторий принадлежат Государственному земельному фонду, некоторые из них служат пастбищем для оленей совхоза «Гамовский». Организация национального природного парка никак не может повредить оленеводству, ведь даже существующий сейчас стихийный туризм в этих местах не наносит ущерба хозяйству совхоза. Такого рода хозяйственная деятельность вполне допустима в периферийной зоне национального парка, где обычно разрешается ведение традиционного хозяйства. Стало быть, ни тот, ни другой аргумент не мо-

**Кирказон маньчжурский — настоящая ботаническая редкость на юге Приморья.**



**Элеутерококк колючий.**

гут считаться препятствием для организации национального парка.

Просто отграничить обширный участок и создать национальный природный парк, например, от верховий рек Нарвы до Тесной, а на побережье — от бухты Бойсмана до залива Посъета, включая п-ова Гамова и Краббе, теперь вряд ли имеет смысл. Это было бы целесообразно в конце прошлого столетия, когда хвойно-широколиственные леса на Хасанском побережье не были затронуты деградацией. Современная структура формаций сосны густоцвет-

**Актинидия полигамная.**





Редчайшая лиана Приморья — девичий виноград.



Аралия континентальная.

ковой и пихты цельнолистной не так прочна, как устоявшиеся, взаимоприспособленные во всех звеньях фитоценозы тайги. Популяция сосны находится на грани критической численности, в ней нет молодых деревьев. Сходна судьба и дуба зубчатого. Их охрана, а главное восстановление должны стать важной самостоятельной задачей национального парка, которую не смогут дублировать в существующих заповедниках: там, в лучшем случае, сохранились лишь немногие экземпляры этих древесных пород.

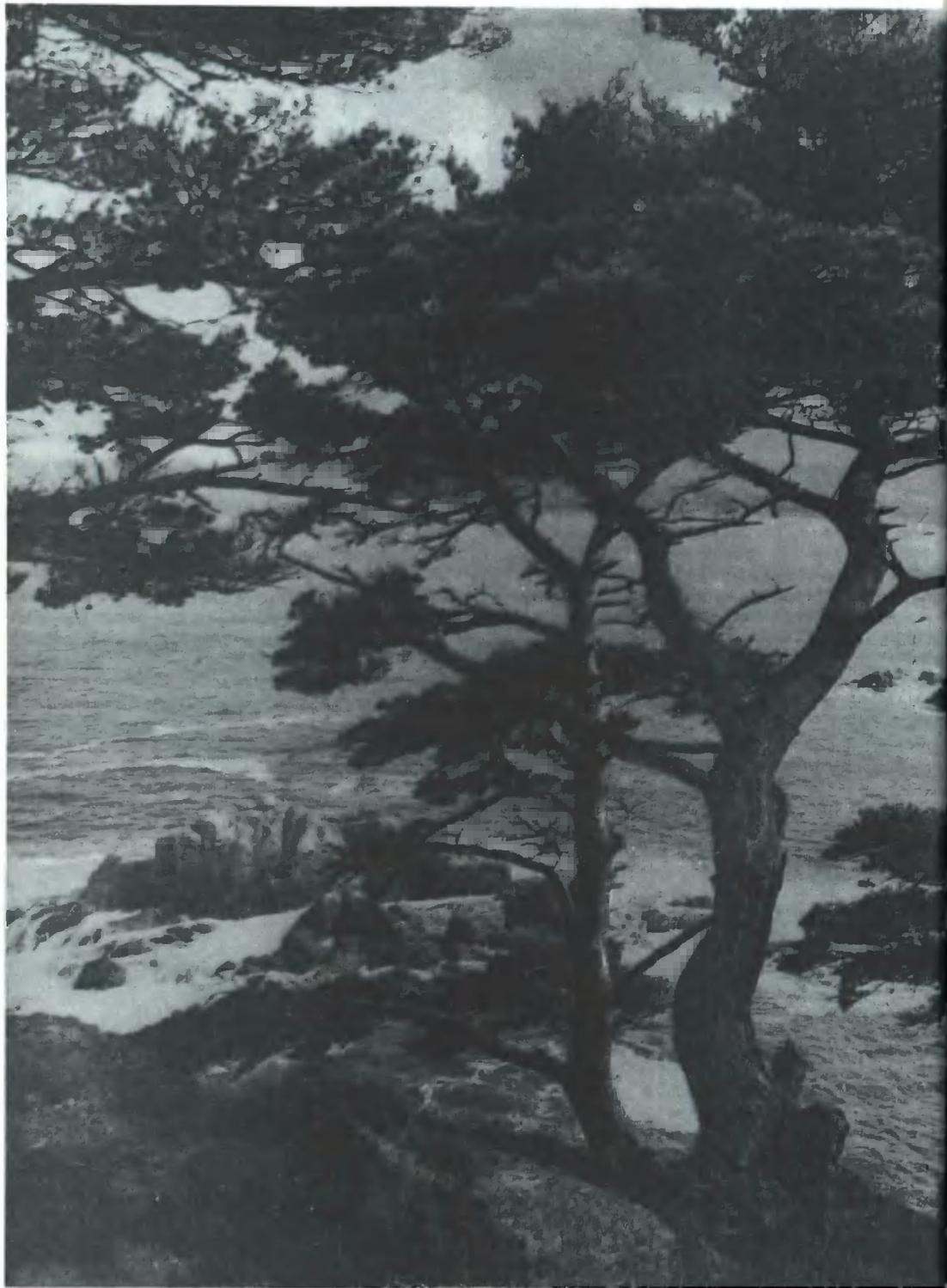
Заманиха высокая.

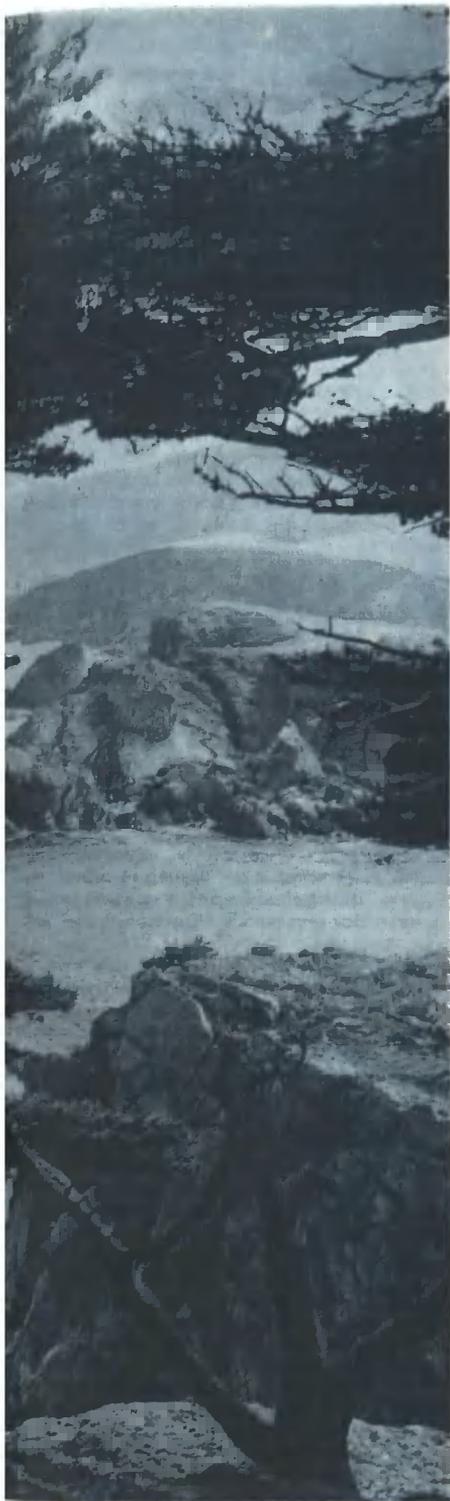


Надо сказать, что нынешнее положение сосновых и дубовых лесов является следствием нередко возникающих стихийных пожаров осенью и в начале весны, когда травы высыхают настолько, что пожар вспыхивает от малейшей искры или небрежного обращения людей с огнем. В прошлом в Приморье случались грандиозные по площади пожары; 350—400 лет назад почти полностью выгорали коренные хвойные леса, и пожарнице зарастало лиственными породами, которые со временем снова уступали место сосне и пихте. Уж

Лимонник китайский.







Сосна густоцветковая.

если вполне успешно идет самовозобновление хвойных лесов, то целенаправленное восстановление тем более реально, а значит планировать посадку необходимо, точно так же как и предусмотреть действенные противопожарные меры.

Национальный природный парк предлагаемой структуры должен включить зону активного отдыха (прибрежные луга долин и склонов, где можно было бы устроить бивачные и спортивные площадки; крупные песчаные пляжи; дубовые и сосновые леса, открытые для посещения), зону регулируемого отдыха (некоторые бухты и острова, видовые точки и специально оборудованные маршруты на материковой части), заповедную зону с экскурсионными тропами, а также полностью закрытую для посетителей заповедную территорию.

Следует предусмотреть оборудование усадеб и кордонов, привалов, строительство дорог и троп. Необходимо также разработать меры по увеличению численности некоторых животных и птиц, восстановлению лесных массивов. Изыскание, проектирование и строительство национального природного парка требует немалых капитальных вложений и согласованной работы многих специалистов.

Мысль о необходимости создания национального природного парка на юге Приморья возникает не впервые, такие предложения уже были высказаны в 1976 и 1980 гг.<sup>1</sup> Мы надеемся, что обсуждение этого важного вопроса не затянется до той поры, когда захламление побережий, обеднение растительности, исчезновение красиво цветущих трав и кустарников, разрушение сложных биологических сообществ неорганизованными «путешественниками» приведут к истощению природных богатств, столь неповторимых и разнообразных в Приморье.

<sup>1</sup> Урусов В. М., Смирнова О. А. Оценка лесокультурного и озеленительного фондов.— В кн.: Охрана природы на Дальнем Востоке. Владивосток, 1976, с. 88; Ахмиловская И. И. К созданию природного парка на юге Приморья.— В кн.: Проблемы рационального использования и охраны естественных ресурсов Дальнего Востока. Владивосток, 1977, с. 190; Урусов В. М., Миротворцев Ю. И., Смирнова О. А. Природный парк Южного Приморья.— В кн.: Проблемы рационального использования и охраны земельных ресурсов Дальнего Востока. Владивосток, 1980, с. 140.

## Космический полет советско-индийского экипажа

С. А. Никитин

Совет «Интеркосмос» АН СССР

В предшествующее десятилетие сотрудничество между СССР и Индией по изучению и освоению космического пространства в мирных целях основывалось на межправительственном «Соглашении о дальнейшем развитии экономического и торгового сотрудничества между Союзом Советских Социалистических Республик и Республикой Индией» от 29 ноября 1973 г. Вместе с тем как до, так и после упомянутого соглашения между ведомствами двух стран был заключен ряд соглашений о совместных работах в соответствующих направлениях.

Первые совместные работы были начаты более 20 лет назад в области космической метеорологии; они были связаны с решением правительства Индии создать на юге Индостанского п-ова, в Тхумбе (шт. Керала) международный исследовательский полигон для ракетного зондирования верхней атмосферы Земли. В создании этого полигона, расположенного в районе геомагнитного экватора, вместе с Индией приняли участие СССР, США, Франция, Япония и другие страны. В январе 1964 г. Главное управление гидрометеорологической службы СССР и Департамент атомной энергии правительства Индии подписали соглашение об оказании СССР помощи в оснащении полигона в Тхумбе. В 1970 г. было заключено новое соглашение о проведении систематического ракетного зондирования с полигона в Тхумбе: советские метеорологические ракеты должны были исследовать параметры верхней атмос-

феры в тропических широтах на высоте до 100 км. С этого времени запуски советских метеорологических ракет с международного полигона в Тхумбе проводятся регулярно; на них устанавливается советская и индийская научная аппаратура, в запусках и экспериментах участвуют индийские и советские специалисты, а результаты используются не только метеорологическими организациями обеих стран, но и метеослужбами других государств.

В 1972 г. в Москве между Академией наук СССР и Индийской организацией космических исследований (ИСРО) правительства Индии было подписано соглашение о запуске первого индийского спутника с помощью советской ракеты-носителя. В 1975 г. и 1979 г. между АН СССР и ИСРО подписаны еще два соглашения, предусматривавшие запуск с территории СССР с помощью советских ракет-носителей спутников, спроектированных и изготовленных в Индии.

Советско-индийское сотрудничество в области космических исследований осуществляется сейчас по следующим направлениям: оказание Индии научно-технической помощи в разработке и запуске искусственных спутников Земли; исследование верхних слоев атмосферы методами ракетного зондирования; исследование в области  $\gamma$ -астрономии; наблюдения за искусственными спутниками Земли.

19 апреля 1975 г., 7 июня 1979 г. и 20 ноября 1981 г. с советского космодрома Капустин Яр при помощи советских ракет-носителей были запущены индийские спутники «Ариабата», «Бхаскара» и «Бхаскара-2». Помимо предоставления ракет-носителей и обеспечения запусков спутников, советская сторона оказала необходимую консуль-

тивную помощь на всех этапах разработки и подготовки индийских спутников к запуску: для них были изготовлены системы стабилизации, солнечные и химические батареи системы электропитания, бортовые запасающие устройства, термопокрытия; приняла участие в управлении полетом первого индийского спутника, для чего под Москвой, в Медвежьих озерах, была построена наземная станция.

Первый индийский спутник «Ариабата» предназначался для исследований в области рентгеновской астрономии, регистрации нейтронного и  $\gamma$ -излучения Солнца, измерения потоков частиц в ионосфере. Основное назначение спутников типа «Бхаскара» — изучение природных ресурсов Индии, что имеет огромное значение для ее народного хозяйства.

«Ариабата», «Бхаскара» и «Бхаскара-2» функционировали длительное время и выполнили поставленные перед ними задачи.

В ходе работы над этими спутниками индийские специалисты приобрели опыт решения сложных научных и технологических проблем, связанных с созданием космических аппаратов. В дальнейшем это помогло им изготовить спутники «Рохики», «Эплл», запущенные с помощью индийских ракет-носителей, а также ракетой-носителем «Ариан» Европейского космического агентства.

В 1977 г. на территории Индии была сооружена советско-индийская станция по наблюдению искусственных спутников Земли; научное оборудование для нее поставлено СССР и другими странами — участниками программы «Интеркосмос». Результаты наблюдений, выполненных на станции, доступны всему мировому научному сообществу.



Советско-индийский экипаж корабля «Союз Т-11» (слева направо): командир корабля Ю. В. Малышев, космонавт-исследователь Р. Шарма, бортинженер Г. М. Стрекалов.

В течение 1977—1981 гг. специалисты СССР и Индии проводили совместные эксперименты в области внеатмосферной астрономии с помощью советских γ-телескопов, установленных на индийских высотных аэростатах.

Логическим продолжением всех этих работ явился совместный космический полет советских и индийского космонавтов на советском космическом корабле «Союз Т» и орбитальной станции «Салют-7».

В сентябре 1982 г. два индийских кандидата в космонавты — Р. Шарма и Р. Малхотра прибыли в Центр подготовки космонавтов им. Ю. А. Гагарина и приступили к занятиям и тренировкам. Успешно закончив все этапы подготовки и сдав установлен-

ные экзамены, индийские кандидаты в космонавты были включены в состав двух экипажей. Основной экипаж: командир Ю. В. Малышев, бортинженер Н. Н. Рукавишников, космонавт-исследователь Р. Шарма; дублирующий экипаж: командир А. Н. Березовой, бортинженер Г. М. Гречко, космонавт-исследователь Р. Малхотра. Впоследствии из-за болезни бортинженера основного экипажа Н. Н. Рукавишникова его заменил Г. М. Стрекалов.

Советские и индийские специалисты подготовили для международного экипажа интересную научную программу, включавшую исследования и эксперименты по космической медицине, изучению природных ресурсов Индии из космоса и по космическому материаловедению.

Советско-индийский международный экипаж в составе: командир корабля летчик-космонавт СССР Ю. В. Малышев, бортинженер летчик-космонавт СССР Г. М. Стрекалов и космонавт-исследователь гражданин Республики Индии Ракеш Шарма стартовал с космодрома Байконур на космическом транспортном корабле «Союз Т-11» 3 ап-

реля 1984 г. в 17 ч 09 мин (по московскому времени). Ракета-носитель вывела корабль на начальную орбиту с высотой в перигее 202 км, высотой в апогее 240 км, наклоном 51,6° и периодом обращения 88,6 мин. В этот же день на 4 и 5-м витках полета был осуществлен двухимпульсный корректирующий маневр, в результате которого космический корабль «Союз Т-11» перешел на орбиту высотой 222×295 км. Научно-исследовательский комплекс «Салют-7» — «Союз Т-10» совершал в это время полет по орбите с параметрами: высота в перигее 294 км, высота в апогее 305 км, наклонение 51,6°, период обращения 90 мин.

После нескольких коррекций орбиты «Союза Т-11» 4 апреля 1984 г. в 18 ч. 35 мин он стыковался с орбитальным комплексом «Салют-7» — «Союз Т-10». В тот же день в 21 ч 36 мин Ю. В. Малышев, Г. М. Стрекалов и Р. Шарма перешли в помещение станции; на борту научно-исследовательского комплекса «Салют-7» — «Союз Т-10» — «Союз Т-11» приступил к работе международный экипаж из шести космонавтов.

Программа полета международного экипажа включала 8 экспериментов: шесть по космической медицине, технологический эксперимент «Переохлаждение» и эксперимент «Терра» — дистанционное зондирование Земли для изучения природных ресурсов Индии. Поскольку одни из перечисленных экспериментов выполнялись по несколько раз, другие представляли собой серии исследований (например, эксперимент «Переохлаждение» проводился со сплавами трех различных составов, эксперимент «Терра» по программе предусматривал съемки в период девяти пролетов над территорией Индии), общее число экспериментов составило 43.

Работу на орбите космонавты начали с эксперимента «Оптокинез» — получение информации о состоянии глазодвигательной функции и особенностях вестибулярно-зрительного взаимодействия в условиях полета. Медицинские эксперименты «Анкета» и «Опрос» стали традиционными для международных экипажей на станциях «Салют». С их помощью продолжается изучение симптомов вестибулярных расстройств в полете и в период реадaptации, а также выявление определенной связи с данными об устойчивости к укачиванию в наземных условиях. Кроме того, эти эксперименты позволяют оценить влияние различных этапов полета на психологическое состояние членов экипажа, особенно на динамику их настроения.

В эксперименте «Вектор» изучались биоэлектрическая активность сердца, фазовая структура сердечного цикла и объемы гемодинамики в условиях космического полета (использовались методы электрокардиографии и кинетокардиографии).

Большой интерес для космической медицины представлял эксперимент «Баллисто». Оценка и прогнозирование состояния сердечно-сосудистой системы космонавта связаны с исследованием силы сердечных сокращений и координированности работы правых и левых отделов сердца. Одним из методов решения этой задачи является баллистокардиография

— регистрация микропеременений тела, связанных с сердечной деятельностью. Полученные в космических полетах баллистокардиограммы (БКГ) показали, что и сила сердечных сокращений, и координированность работы левых и правых отделов сердца изменяются в зависимости от длительности пребывания в условиях невесомости и активности проводимых физических тренировок. Пока не имеется достаточных экспериментальных данных для окончательных суждений о наблюдаемых в условиях космоса изменениях БКГ. Поэтому дальнейшее исследование в этом направлении очень важно.

Видимо, наиболее любопытным среди медицинских экспериментов следует признать эксперимент «Йога». Установлено, что пребывание человека в невесомости сопровождается изменениями состояния различных звеньев двигательного аппарата (что отражается на биомеханике движений) и нарушениями координации. При кратковременных полетах эти изменения связаны преимущественно с рефлекторным снижением мышечного тонуса, обусловленным опорной разгрузкой и вестибулярной дисфункцией. В эксперименте «Йога», который выполнял космонавт-исследователь Шарма, предполагалось изучить возможность применения упражнений по системе йог в условиях космического полета и их эффективность для профилактики неблагоприятных влияний невесомости на опорно-мышечный аппарат.

В технологическом эксперименте «Переохлаждение» на советской установке «Испаритель» выяснялась роль присутствующих на поверхности расплава гетерогенных центров зарождения твердой фазы вещества; определялась степень переохлаждения, влияние на переохлаждение конвекции, вызываемой гравитацией и температурными градиентами; исследовались возможности образования метастабильных фаз и получения массивных аморфных материалов («металлических стекол»).

Явление переохлаждения изучалось на модельном сплаве «серебро-германий», он был

выбран индийскими специалистами, поскольку в Индии ведутся интенсивные работы по технической очистке таких сплавов методом шлакования. Были проведены три эксперимента со сплавами различных составов. Результаты экспериментов «Переохлаждение» будут иметь большое значение для практических работ, направленных на получение самых различных сплавов, используемых в современной технике.

Огромное значение для народного хозяйства Индии имеет комплексный эксперимент «Терра». Он включал: фотосъемку территории Индии с помощью многозональной аппаратуры МКФ-6М и камеры КАТЭ-140; визуальные наблюдения и фотосъемки с использованием ручных фотокамер; квазисинхронные «подспутниковые» аэросъемки и наземные измерения на опытных участках территории Индии индийскими специалистами; наземная обработка информации и ее использование для изучения природных ресурсов Индии в интересах развития национальной экономики страны.

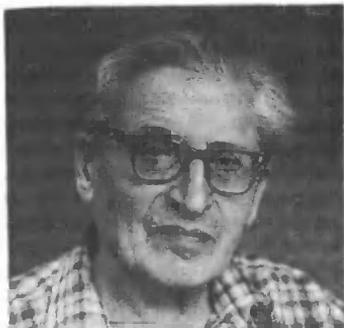
По программе эксперимент «Терра» должен был проводиться во время девяти пролетов над территорией Индии. По просьбе индийских специалистов эксперимент был расширен и проведен дополнительно во время еще двух пролетов, при этом были сняты принадлежащие Индии острова в Бенгальском заливе.

После успешного завершения программы совместных работ международный экипаж вернулся на Землю в космическом корабле «Союз Т-10»: 11 апреля 1984 г. в 14 ч 50 мин спускаемый аппарат с космонавтами Ю. В. Малышевым, Г. М. Стрекаловым и Р. Шармой совершил посадку в заданном районе территории СССР, в 46 км восточнее г. Аркалыка.

Успешно проведенный космический полет советско-индийского международного экипажа является новым вкладом в дальнейшее развитие традиционно дружественных связей наших стран, в многолетнее сотрудничество СССР и Индии в космических исследованиях,

## Полет и механические колебания

А. А. Борин



Александр Аркадьевич Борин, специалист по теории флаттера, анализу летных данных летательных аппаратов, автор научных и популярных статей по теории машущего полета. В течение многих лет работал в ЦАГИ и в опытных конструкторских бюро ведущим конструктором по особо сложным объектам авиационной промышленности.

Если назвать механическими колебаниями всякое периодическое движение некоторой системы, то набор физических и, следовательно, математических моделей для их описания окажется необозримо велик. Дело существенно упрощается, если процесс можно свести к схеме одной из хорошо изученных колебательных систем — осциллятору. Таким термином условимся называть систему, способную, благодаря наличию восстанавливающей силы, некоторое время свободно колебаться после прекращения возмущающего воздействия. Тогда, зная тип дифференциального уравнения и величину его коэффициентов (что, правда, не всегда достижимо с нужной степенью точности), мы можем полностью описать интересующее нас явление.

Свободные колебания после прекращения начального импульса могут происходить лишь в двух случаях: когда устройство системы допускает обратимое превращение одного вида энергии в другой (например, маятник) или когда части системы связаны таким образом, что между ними осуществим обратимый обмен энергией любого вида (груз на пружине, кривошипно-шатунный механизм с маховиком).

Периодические движения может совершать и система, не являющаяся коле-

бательной в указанном смысле. Это имеет место, например, у птиц, где в системе корпус-крыло отсутствует упругий элемент. Амплитуда и форма вынужденных колебаний этой системы определяется амплитудой и формой вынуждающего воздействия. У птиц роль такого воздействия выполняет работа мускулатуры, которая не поддается математическому описанию, поэтому здесь приходится ограничиваться довольно грубой оценкой.

Периодические движения крыла природных и искусственных летательных объектов, механизм их осуществления и станут объектами нашего внимания. Движения эти разнообразны: они могут быть произвольными, управляемыми, либо непроизвольными, вызванными свойствами конструкции и особенностями аэродинамического режима, иметь различную механическую структуру и энергетический баланс и, в соответствии с таким набором физических характеристик, приносить пользу или вред.

Знакомый всем пример полезных колебаний дает живая природа: для подавляющего большинства из существующих ныне 8580 видов птиц и более 1,5 млн видов насекомых основным способом передвижения является машущий полет. Напротив, колебания частей искусственных летательных аппаратов весьма часто (но не всегда!)

играют чисто отрицательную роль, неся в себе опасность разрушения конструкции. В некоторых случаях — не лежащих, правда, на генеральной линии развития авиационной техники — соответствующее устройство конструкции позволяет улучшить летные качества аппарата, используя тот или иной колебательный процесс.

Стоит отметить, что с машущим полетом связывалось немало надежд в смысле его предполагавшейся экономичности. Однако исследования последних лет, в частности изучение эффективности крыла как колебательной системы (о чем речь пойдет ниже), не подтверждают эту точку зрения.

Важная особенность интересующих нас колебаний состоит в том, что они происходят в силовом поле, создаваемом движущейся газовой средой. Обмен энергией между крылом и средой вносит дополнительное разнообразие в возможные типы колебаний: в зависимости от упругих, инерционных и аэродинамических особенностей системы среда может оказывать либо демпфирующее, либо дополнительное возмущающее действие (в последнем случае могут возникнуть опасные для целостности конструкции автоколебания).

При вынужденных колебаниях крыла птицы под воздействием ее мускулатуры влияние среды практически всегда является демпфирующим. Преобразование этих демпфирующих сил в тягу и является существом машущего полета.

Для завершения общей характеристики колебательных движений крыльев остается добавить, что, как правило, эти движения имеют не менее двух степеней свободы (например, и при машущем полете, и при флаттере происходят изгиб и кручение крыла). Это обстоятельство имеет различное, но весьма существенное значение: так, тяга машущего крыла при бинарном движении возрастает; что касается флаттера, то он вообще невозможен при числе степеней свободы, меньшем двух.

## ОСОБЕННОСТИ ПОЛЕТА ПТИЦ И НАСЕКОМЫХ

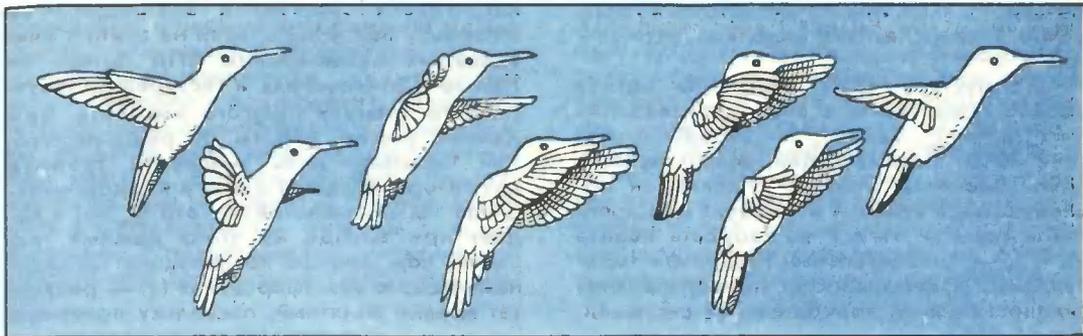
В 1972 г. вышла в свет работа известного биолога Т. Вейс-Фоу «Энергетика трепещущего полета колибри и дрозофилы»<sup>1</sup>. В ней впервые в истории исследований полета в природе был обстоятельно рассмотрен поставленный им же несколько

годами раньше вопрос о работе крыла как колебательной системы — факт примечательный, поскольку первые попытки осмыслить физику полета восходят к 1485 г., к работам Леонардо да Винчи, а начало систематическим исследованиям полета птиц было положено Э. Мареем около 100 лет назад. С тех пор были построены сотни летающих моделей и немало стендовых, опубликованы десятки экспериментальных и теоретических работ, разъясняющих физиологию и отчасти аэродинамику полета животных; механике, как мы видим, повезло гораздо меньше.

В чем же суть исследований Вейс-Фоу? Визуально, с точки зрения стороннего наблюдателя, трепещущий полет крупных насекомых, например бражников (сфингид), над цветком, нектаром которого они питаются, неотличим от такого же полета колибри. И тем не менее механика (и, как мы увидим дальше, энергетика) полета этих животных резко различны — в соответствии с тем, что летательный аппарат птицы, в отличие от насекомых, не является колебательной системой в указанном смысле: в нем нет упругого элемента. Тот, казалось бы, вполне очевидный факт, что кинетическая энергия (в «бытовой» терминологии механиков «живая сила»), накапливаемая крылом птицы в каждом полувзмахе, диссипирует, не производя полезной работы из-за отсутствия в крыле упругого элемента, долгое время ускользал от внимания исследователей.

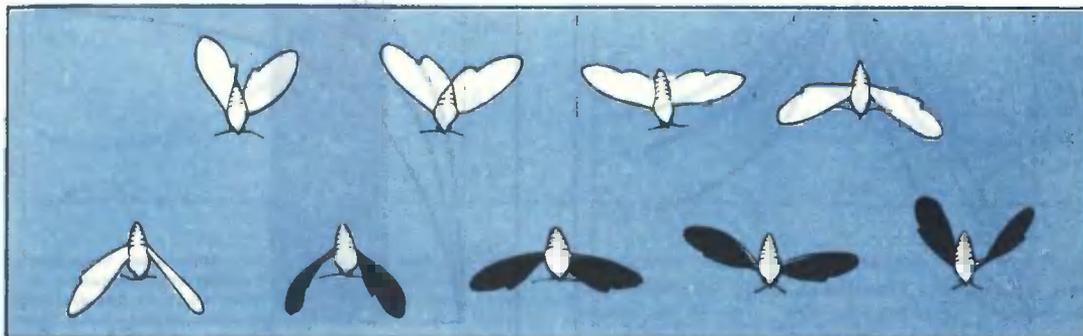
Упругим элементом летательного аппарата насекомых служит внешний скелет грудного отдела. При зависании над цветком, которое является характерным режимом полета бражников, демпфирующим фактором является лобовое сопротивление крыла, движущегося примерно в горизонтальной плоскости. Поскольку лобовое сопротивление пропорционально квадрату скорости, этот процесс хорошо описывается моделью квадратичного осциллятора. Следует ожидать, что при переходе к поступательному движению частота взмахов  $\omega$  у насекомых не изменяется. Это вытекает из того факта, что коэффициент полезного действия крыла с упругим элементом ( $\eta$ ) резко падает при выходе из режима резонанса и косвенно (за отсутствием прямых измерений) подтверждается замечательным постоянством  $\omega$  в различных условиях полета, в том числе при резком (в несколько раз) уменьшении плотности воздуха. В поступательном движении демпфирующим фактором является переменное приращение подъемной силы при взма-

<sup>1</sup> Weiss-Fough T., — J. Exp. Biol., 1972, v. 56, p. 79.

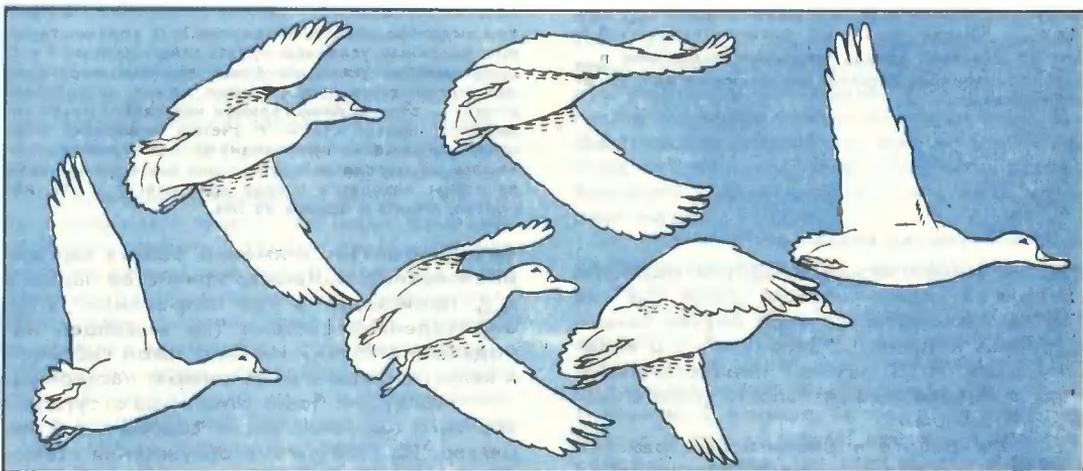


Трепещущий полет колибри. Птица висит над цветком, совершая взмахи крылом в плоскости, близкой к горизонтальной, с большой частотой и максимальной амплитудой. Концевые сечения крыла при каж-

дом полувзмахе поворачиваются таким образом, чтобы давать подъемную силу вне зависимости от направления движения.



Трепещущий полет насекомого (вид сверху, нижняя сторона крыльев зачернена). Кинематика движения мало отличается от кинематики при полете колибри.

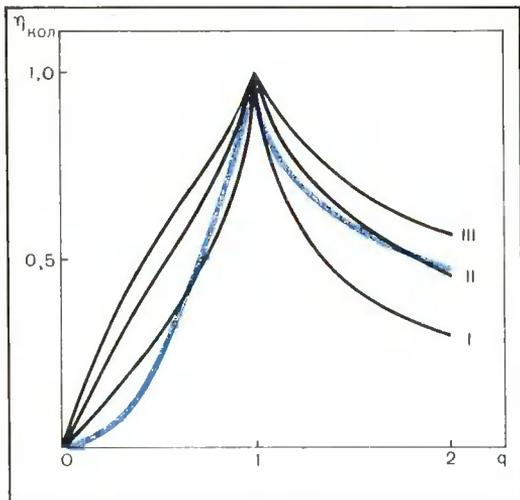


Медленный горизонтальный полет утки. Взмахи крыла происходят в плоскости, близкой к вертикальной. Кроме махового движения, сечения крыла

совершают крутильные колебания со сдвигом фаз —  $\pi/2$  [бинарное движение].

хах вверх и вниз. Крыло насекомого в таком режиме представляет линейный осциллятор.

Структуру КПД машущего полета удобно представить в виде произведения  $\eta = \eta_{аз} \eta_{кол} \eta_{мех}$ , где  $\eta_{аз}$  — аэродинамический КПД, оценивающий эффективность преобразования энергии, отдаваемой колеблющимся крылом в тяговую мощность (произведение тяги  $F$  на скорость полета  $v$ ),  $\eta_{кол}$  — колебательный КПД, характеризующий эффективность преобразования мощности самой колебательной системой.

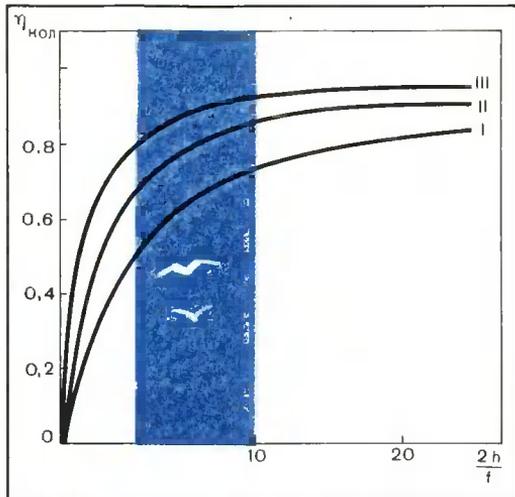


Зависимость колебательного КПД ( $\eta_{кол}$ ) крыла с упругим элементом [крыло насекомого] от приведенной частоты  $q = \omega / \omega_{рез}$ . Чем меньше коэффициент демпфирования системы  $\gamma$ , тем резче падает  $\eta_{кол}$  при  $\omega \neq \omega_{рез}$ . Кривым I, II, III соответствуют  $\gamma = 0,2$ ; 0,4; 0,6. Цветная кривая описывает изменение  $\eta_{кол}$  полупределенной системы (не имеющей неподвижной точки) с  $\gamma = 0,6$ .

$\eta_{мех}$  — механический КПД, учитывающий потери на трение всякого рода. До сих пор был в некоторой мере изучен только  $\eta_{аз}$ . Лишь недавно установлено<sup>2</sup>, что колебательный КПД играет первостепенную роль в оценке эффективности работы машущего крыла.

При работе в резонансном режиме масса и упругий элемент попеременно

накапливают энергию и возвращают ее в систему без потерь, если не считать учитываемых механическим КПД потерь на трение в сочленениях и гистерезиса (внутреннего трения) упругого элемента. Чем дальше режим работы от резонансного, тем большая часть мощности тратится на повторный разгон массы в каждом полуцикле. На резонансной частоте  $\eta_{кол} = 1$  и падает при выходе из этого режима тем резче, чем меньше коэффициент аэродинамического демпфирования ( $\gamma$ ) — результат вполне понятный, поскольку полезным



Зависимость колебательного КПД ( $\eta_{кол}$ ) крыла без упругого элемента [крыло птицы] от параметра  $2h/f$ , где  $h$  — характеристика аэродинамического демпфирования,  $f$  — частота колебаний в ГЦ. [Цветом выделена область параметра  $2h/f$ , соответствующая реальным условиям полета птиц.] Кривые I и II получены без учета колебаний корпуса, первая из них соответствует торможению крыла двигателем, вторая — торможению трением или необратимой передачей; кривая III — с учетом колебаний корпуса; торможение происходит за счет трения и необратимой передачи. Фактические значения  $\eta_{кол}$  крыла птицы находятся между кривыми II и III, вероятно, ближе к первой из них.

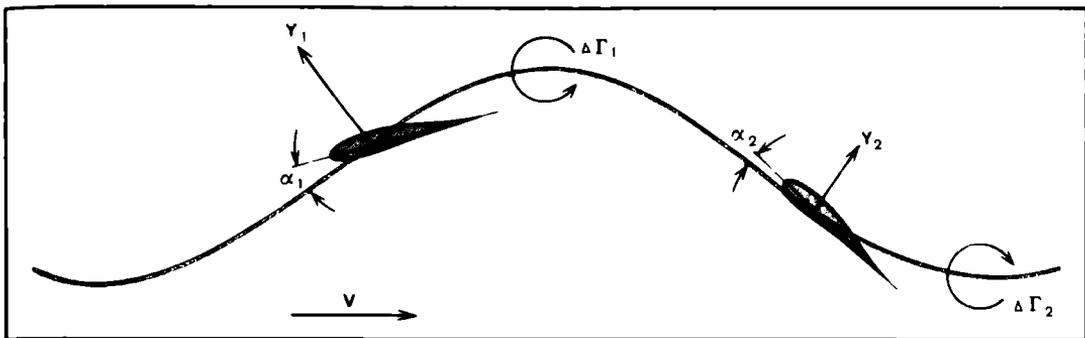
выходом является именно работа аэродинамических сил. Катастрофическое падение  $\eta_{кол}$  происходит в так называемой полупределенной системе (не имеющей неподвижной точки). Именно такой системой и является летательный аппарат насекомых.

Машущий полет птиц из-за отсутствия упругого элемента носит совсем иной характер. На этой стадии обсуждения схематизируем работу крыла птицы как простое бинарное движение — взмах и закручивание по синусоидальному закону со сдвигом фаз крутильного движения против махо-

<sup>2</sup> Борин А. А., Кокшайский Н. В. — Доклады АН СССР, 1983, т. 269, № 4, с. 971.

вого на  $-\pi/2$  — и рассмотрим баланс энергии в такой системе без учета демпфирования. В первом приближении можно считать, что каждый полупериод состоит из двух кинематически симметричных фаз — разгона и торможения. Каково бы ни было тормозящее устройство, оно обязательно поглотит всю энергию, накопленную при разгоне. Это может быть сделано одним из трех способов: а) работой двигателя в рекуператорном режиме, т. е. повторным использованием кинетической энергии при торможении (этот путь, оче-

без учета одного важного обстоятельства — периодических движений корпуса птицы. Успешная работа крыла как движителя требует не только аэродинамического совершенства, но и эффективности его как колебательной системы. Поэтому отсутствие упругого элемента в крыле птицы должно компенсироваться каким-то иным способом аккумуляции энергии, без чего  $\eta_{кол}$  оказывается чрезмерно низким, особенно при малой скорости полета и большой частоте взмахов. Таким компенсирующим механизмом и является перио-



Траектория движения сечения крыла птицы в горизонтальном машущем полете в потоке воздуха, движущемся со скоростью  $V$ . При взмахе вниз угол атаки  $\alpha_1$  и подъемная сила  $Y_1$  больше, чем угол атаки  $\alpha_2$  и подъемная сила  $Y_2$  при взмахе вверх. Сила тяги создается за счет превышения направленной вперед горизонтальной проекции подъемной силы  $Y_1$  над направленной назад горизонтальной проекцией  $Y_2$ . Из-за периодического изменения подъемной силы в крайних точках от траектории крыла отходят расположенные в шахматном порядке вихри с интенсивностью  $\Delta\Gamma_1 = -\Delta\Gamma_2$ .

дическое смещение центра масс птицы (накопление потенциальной энергии) и изменение его горизонтальной скорости (накопление кинетической энергии), происходящие под действием колебаний подъемной силы и тяги<sup>3</sup>.

Эффективное использование этого механизма требует усложнения работы крыла, которое выражается в удлинении взмаха вниз и уменьшении аэродинамической нагрузки крыла в противоположной фазе цикла. Кроме этого, надо учитывать, что разгруженное крыло выгодно подтягивать к корпусу при подъеме, так что фактическое движение крыла у многих птиц значительно отличается от простой бинарной формы, которую мы рассматривали выше.

Учет периодических движений корпуса птицы повышает  $\eta_{кол}$ , но никогда не доводит его до 1.

В работе Вейс-Фоу приведены оценки мощности, необходимой для полета дрозодилы — 24 кал/г· час, и кинематически подобного полета колибри — 39 кал/г· час, т. е. на 60 % больше. Такова цена, которую платит птица за менее рациональное устройство своего летательного аппарата

видно, неосуществим в живой природе), б) прямым торможением двигателем (так называемая отрицательная работа мышцы представляет собой именно такой случай), в) трением или необратимой передачей.

Аэродинамическое демпфирование, поглощая часть энергии привода, изменяет ее баланс: энергия разгона теперь должна покрыть сумму энергии торможения и работы аэродинамических сил. Подсчитывая этот баланс, можно определить границы возможных значений  $\eta_{кол}$ , соответствующие указанным трем способам торможения (точный расчет, как мы отмечали выше, здесь невозможен). Значения  $\eta_{кол}$  для птиц лежат где-то между случаями «б» и «в» (вероятно, ближе к первому из них).

Предыдущие рассуждения и приведенные результаты проводились, однако,

<sup>3</sup> См. сноску 2.

(здесь надо оговориться, что при горизонтальном направлении движения крыла птица не может в полной мере воспользоваться описанным выше компенсирующим механизмом).

## КОЛЕБАНИЯ В ИСКУССТВЕННЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТАХ — ФЛАТТЕР

Итак, колебательные движения являются основой полета птиц и насекомых. Это пример полезных колебаний, который нам дает живая природа. В технике мы видим совсем иную картину.

Если оставить в стороне махолет — «синюю птицу» изобретателей на протяжении столетий, то колебания крыльев искусственных летательных аппаратов, как правило, причиняют массу хлопот их конструкторам. Широко известно, хотя бы понаслышке, грозное явление флаттера, бывшее в первой половине 30-х годов одной из главных помех росту скоростей самолетов. При достижении некоторой «критической» скорости крыло, построенное по всем правилам инженерной науки тех лет, внезапно разрушалось в полете. Разрушение начиналось с сильной тряски, которая развивалась так быстро, что у летчика обычно не хватало времени для принятия каких-либо мер, например уменьшения скорости.

Где же проходит граница между родственным явлениями, одно из которых оказывается полезным, другое — вредным? Точнее, какие физические критерии объединяют, а какие различают внешне сходные движения?

Одной из существенных характеристик процесса колебаний крыла в полете является направление потока энергии — от среды к телу или наоборот. Это направление коренным образом зависит от конструктивных особенностей летающего объекта; при флаттере, например, они определяют тенденцию протекания процесса — в сторону опасного развития вибраций или, напротив, их затухания.

Энергию потока воздуха несут в себе как его живая сила, пропорциональная квадрату средней скорости потока, так и пульсации скорости (горизонтальные и вертикальные) вокруг ее среднего значения. Эти два источника различны не только генетически, но и функционально. Всякое заимствование энергии из живой силы потока увеличивает лобовое сопротивление тела. В некоторых случаях может возникать и побочное явление — перестройка пограничного слоя, ведущая к уве-

личению подъемной силы на закритических углах атаки (его мы обсудим ниже).

Энергия, передаваемая крылу пульсациями скорости потока, может вызвать либо ускорение, либо замедление обтекающего крыло потенциального потока и, соответственно, уменьшение либо прирост сопротивления. Какой из этих режимов будет осуществляться, зависит от механических и аэродинамических параметров крыла.

Некоторая часть энергии всегда расходуется на преодоление сил внутреннего трения (гистерезиса) конструкции. Поэтому гистерезис вреден при полезных колебаниях и полезен при развитии вредных. Так, высокий гистерезис уменьшает опасность флаттера. Совершенно не подвержена флаттеру конструкция из материала с высокой пластичностью<sup>4</sup>. Поэтому флаттер птичьего крыла невозможен, хотя в принципе возможен флаттер отдельного пера.

Источником вредных спонтанных вынужденных колебаний может быть (как в одном из дальнейших примеров) периодический срыв обтекания на какой-либо из поверхностей самолета. Колебания, расходующие энергию постороннего источника (двигателя, мускулатуры) и передающие ее телу, также относятся к вынужденным. Таковы колебания крыла в машущем полете. Дальнейший поток энергии должен быть организован таким образом, чтобы скорость частиц среды относительно тела увеличивалась; это и является условием полезного эффекта. Нетрудно видеть, что гистерезис в этом случае играет вредную роль.

Таков беглый обзор критериев пользы или вреда, приносимых тем или иным видом колебаний, происходящих в процессе полета.

## КАК ПОБЕДИЛИ ФЛАТТЕР

Исследования флаттера начались в 1923 г. в Германии и получили значительное развитие начиная с конца 20-х годов, когда в Германии и Англии появился целый ряд работ, посвященных этой проблеме. Исследования велись в основном по двум направлениям. Теоретическую основу первого составляли попытки получить дифференциальные уравнения колебаний крыла и, интегрируя их, вычислить критическую

<sup>4</sup> Пластичность, в противоположность упругости, — способность тела необратимо деформироваться под нагрузкой.

скорость полета. Здесь необходимо выделить работу М. Раушера, в которой были даны уравнения изгибно-крутильных колебаний крыла в том виде, в каком они применяются и до сих пор. Основу второго направления, представленного главным образом работами английских ученых, составляло изучение физической стороны явления, его энергетического баланса и мер, которыми можно предотвратить развитие флаттера. В результате была построена схема энергетического баланса изгибно-крутильного флаттера, иллюстрирующая

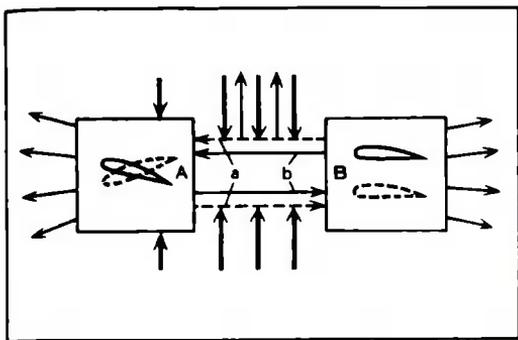


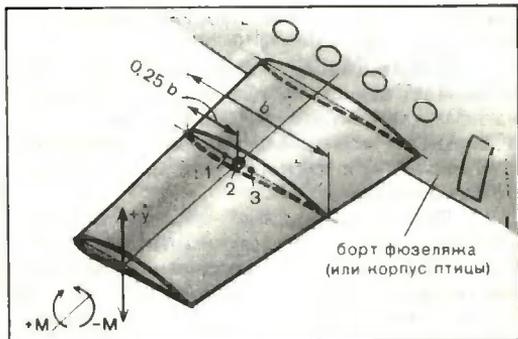
Схема энергетического баланса при флаттере. Блок А на схеме соответствует движению кручения, В — движению изгиба; а — аэродинамические, b — инерционные связи между ними. Стрелками указаны направления потока энергии.

энергообмен между колеблющимся крылом и внешней средой и между изгибной и крутильной деформациями внутри крыла; однако схема была еще далека от совершенства. Кроме того, была обнаружена, но не изучена до конца роль взаимного расположения трех характерных точек крыла — центра жесткости, центра инерции и аэродинамического фокуса<sup>5</sup>. Что касается расчетных методов, то и здесь были свои трудности: несмотря на принципиальную правильность уравнений Раушера, их интегрирование приводило к значениям скоростей, сильно отличающимся от экспериментальных. Не приходится удивляться,

что рекомендации по борьбе с потерей устойчивости конструкций были разноречивы и нечетки.

Полное разрешение все эти вопросы получили в работах ЦАГИ, первая из которых вышла в 1935 г.<sup>6</sup>

Изложим вкратце суть решенных в этих работах проблем. Флаттер относится к категории автоколебаний, т. е. периодическая возмущающая сила возникает в самом процессе движения. При изгибно-крутильном флаттере крыло совершает маховые движения, в процессе которых



Характерные точки сечения крыла: 1 — аэродинамический фокус, 2 — центр жесткости, 3 — центр инерции (b — длина хорды крыла). При размещении центра жесткости позади фокуса изменение аэродинамического крутящего момента  $M$  ( $+M$  — кабрирующий момент,  $-M$  — пикирующий момент) носит неустойчивый характер. При размещении центра инерции позади центра жесткости момент инерционных сил от вертикального ускорения  $\dot{y}$  увеличивает неустойчивость.

периодически изменяются прогиб и угол закручивания сечений. Эти деформации и вызывают периодические изменения аэродинамических сил, из которых одни будут возмущающими, другие демпфирующими. Поскольку энергия для раскачки конструкции заимствуется из окружающей среды, лобовое сопротивление при флаттере возрастает.

В упомянутой работе ЦАГИ были существенно дополнены представления о физической стороне проблемы, разработанные в работах английских исследователей. Большую роль сыграло уточнение схемы энергетического баланса, в результате чего полностью выяснилось, что взаимное положение трех характерных точек

<sup>5</sup> Центр жесткости — точка, приложение к которой вертикальной силы вызывает только изгибную деформацию; фокус — точка, момент относительно которой не зависит явно от угла атаки.

<sup>6</sup> Гроссман Е. П., Кричевский С. С., Борин А. А. — Труды ЦАГИ. М., 1935, вып. 202.

крыла определяет не только количество, но и знак подводимой к крылу энергии. Когда эти точки не совпадают, возникают перекрестные динамические связи между движениями изгиба и кручения, приток энергии совершается через движение кручения и, главным образом, через связи. Интенсивность возмущающих воздействий пропорциональна квадрату скорости полета, тогда как демпфирующие воздействия зависят от нее линейно. Когда скорость достигает критического значения, приток и рассеяние энергии балансируются — начинается либо флаттер, либо аperiodическая потеря устойчивости (перекручивание) крыла.

Совмещение указанных трех точек разрывает все связи, передающие энергию изгиба движению кручения, чем предупреждает возможность возникновения флаттера — с одной степенью свободы он невозможен.

При размещении центра инерции впереди центра жесткости положительное вертикальное ускорение сечения вызывает отрицательный (пикирующий) момент, который стремится уменьшить угол атаки и, следовательно, погасить начальный импульс отрицательного приращения подъемной силы. Если же центр жесткости разместить впереди фокуса, то приращение аэродинамического момента будет демпфировать начальное вращательное движение. Крыло с таким расположением трех точек еще более устойчиво — возмущения от неравномерности внешнего потока очень быстро загасают.

В реальных конструкциях, однако, три характерные точки крыла обычно расположены в обратном порядке, поэтому крыло не гарантировано от потери устойчивости. Отсюда ясна важность разработки надежного метода оценки критической скорости и влияния на нее факторов (например, жесткости), находящихся в распоряжении конструктора.

Такая задача приводит к двум дифференциальным уравнениям 2-го порядка — изгиба и кручения, выведенным впервые, как мы уже говорили, М. Раушером. Единственной его ошибкой была неверная трактовка одного из коэффициентов в уравнении для моментов, не позволившая надежно оценить его численное значение. Естественно, что применяя свою оценку, Раушер не смог добиться совпадения вычисленных и фактических скоростей, при которых начинается флаттер. Это впервые было сделано в упомянутой работе ЦАГИ: вычисленные скорости ока-

зались в регулярном соотношении с опытными, всего на 5—15 % ниже последних.

Кроме того, было показано, что нет необходимости в точном совмещении трех точек крыла: флаттер устраняется уже при достаточно близком их расположении или, по крайней мере, критическая скорость становится очень высокой.

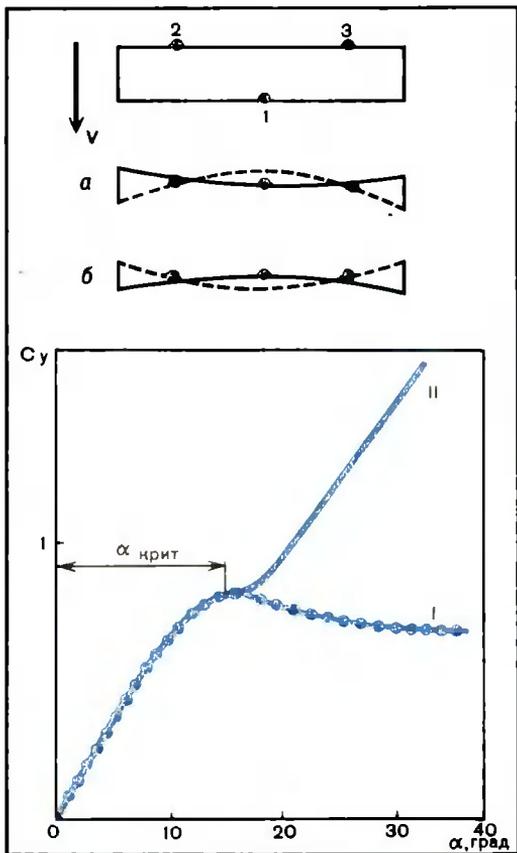
В дальнейших исследованиях ЦАГИ были проанализированы конструктивные мероприятия, позволяющие в нужной мере увеличить критическую скорость флаттера, установлены и выражены простыми формулами зависимости, четко отражающие влияние конструктивных характеристик крыла на его критическую скорость.

Разработки по проблеме флаттера в ЦАГИ с конца 1939 г. по 1946 г. возглавлял М. В. Келдыш. Им был дан строгий вывод формул Раушера (1935 г.), которые до этого были получены на основании приближенной теории. Кроме того, М. В. Келдышем был рассмотрен флаттер крыла с элероном (1937 г., совместно с Е. П. Гроссманом и Я. М. Пархомовским), крыла с подкосом (1938 г.), крыла с мотором (1941 г., совместно с Я. М. Пархомовским) и др. Существенная важность последней из упомянутых работ состоит в том, что конструктивная схема крыла, рассмотренная в ней, широко распространена и в наши дни. Эти работы легли в основу целой отрасли авиационной инженерной науки — динамической прочности самолетов. В этот период М. В. Келдышем была решена еще одна важная проблема, возникшая в связи с созданием шасси современного трехколесного типа. Речь идет об автоколебаниях («шимми») переднего колеса шасси при движении самолета по земле.

Скажем несколько слов о другом типе спонтанных колебаний, носящем название бафтинга. Бафтинг возникает обычно на горизонтальном хвостовом оперении самолета под действием периодических местных срывов потока с крыла при его приближении к критическому углу атаки и, таким образом, относится к разряду вынужденных колебаний. В соответствии со спецификой, вызывающей причины этого явления, оно характерно для малых скоростей полета. Очевидно, что бафтинг тоже относится к категории вредных колебаний, и средством борьбы с ним является ликвидация возмущений, т. е. улучшение обтекания корневой части крыла.

<sup>7</sup> Гроссман Е. П.— Там же, 1937, вып. 283.

Существует, однако, и так называемый скоростной бафтинг. Он развивается на околозвуковых скоростях полета при наличии неудачного стыка выпуклых поверхностей (например, горизонтального и вертикального хвостового оперения), вызывающего появление местных сверхзвуковых зон. Неустойчивость обтекания таких зон порождает чередование сверх- и дозвуковых скоростей потока, сопровождающееся сильными колебаниями давления. Для ликвидации тряски также применяют чисто аэродинамические меры, устраняющие образование сверхзвуковых зон.



Колеблющееся крыло на подвеске в аэродинамической трубе [скорость потока воздуха  $\vec{V}$ ] — вверху. Показаны точки крепления крыла к весам, измеряющим силы, которые в нем возникают: точка 1 — крепление на передней кромке крыла, точки 2, 3 — на задней; а, б — различные фазы колебаний крыла. Внизу — зависимость коэффициента подъемной силы  $C_y = Y/qS$  ( $Y$  — подъемная сила,  $S$  — площадь крыла,  $q = \rho V^2/2$  — скоростной напор,  $\rho$  — плотность воздуха) от угла атаки  $\alpha$  при скорости потока  $v = 30-40$  м/с и частоте колебаний  $f = 30-40$  Гц [ $I$  — при отсутствии колебаний,  $II$  — при наличии колебаний].

### МОЖНО ЛИ ИСПОЛЬЗОВАТЬ ЭНЕРГИЮ ПОТОКА?

Возникает вопрос: а всегда ли самопроизвольные колебания частей конструкции в полете вызывают только нежелательные эффекты?

В середине 30-х годов М. Денис<sup>8</sup> в эксперименте с крылом, совершающим изгибно-крутильные колебания относительно точек подвески, получил значительный прирост подъемной силы и критического угла атаки. Чрезвычайно интересно, что описанный эффект отсутствовал, когда крыло начинало вибрировать на закритических углах, а не подходило к ним, уже вибрируя на докритических. Можно предположить, что состояние пограничного слоя в околокритической области сильно отличается от наших обычных представлений. К сожалению, эта работа не получила дальнейшего развития.

Однако крыло, заимствуя энергию из внешней среды, способно продуцировать и тягу. Это может иметь место, когда источником энергии являющиеся пульсации потока. При полете в потоке с вертикальными пульсациями крыло испытывает те же аэродинамические воздействия, что и при чисто вертикальных колебаниях самого крыла относительно стационарного однородного потока. Следовательно, такое крыло также дает тягу, правда, не очень большую. Высокая эффективность по тяге требует бинарного движения — сочетания вертикального смещения с кручением. Извлечение энергии из потока происходит много успешнее, если упругость крыла позволяет накапливать полученную от пульсаций (теперь уже любого направления) энергию в его деформациях. Планер А. Ю. Маноцкова с упруго подвешенным крылом (1952 г.) в ряде полетов подтвердил эти соображения. Испытания в аэродинамической трубе моделей крыла с гибкой задней кромкой, проведенные автором в 1937 г., также показали высокую эффективность этого устройства в пульсирующем потоке.

Весьма вероятно, что дальнейшее изучение свойств гибкого крыла позволит заметно улучшить его аэродинамические качества на малых скоростях полета, где эти эффекты проявляются сильнее.

<sup>8</sup> Denis M. — Les Ailes, 1938, № 882, p. 7.



## Китайский аллигатор

А. Е. Чегодаев

Гродно

В отряде крокодилов насчитывается 21 вид, и все они включены в «Красную книгу МСОП». Основная причина сокращения численности большинства видов крокодилов — их хищнический промысел. Только миссисипский аллигатор, крокодилы Джонсона и новогвинейский считаются сейчас вне опасности. Примечательно, что миссисипского аллигатора удалось спасти от уничтожения не только за счет строгой охраны природных популяций: его разводят с коммерческой целью в частных питомниках и на специальных фермах. Почти не осталось в природе кубинских и сиамских крокодилов, в основном их содержат также в питомниках. Остальные виды, помимо перечисленных, находятся в еще худшем состоянии, а многим, в том числе и китайскому аллигатору (*Alligator sinensis*), грозит полное уничтожение. Этот эндемичный и узкоареальный вид в «Красной книге МСОП» отнесен к категории исчезающих.

Хотя сведения об аллигаторе содержатся в китайских рукописях более чем трехтысячелетней давности, он стал известен в Европе только с 1879 г. по описанию А. Фовела, сотрудника шанхайской таможни. Вскоре после этого первые экземпляры аллигаторов стали поступать в зоологические парки: в 1888 г. пару рептилий приобрел зоо-

парк Франкфурта-на-Майне, где один из них прожил 52 года; 40 лет жила пара аллигаторов в Дрезденском зоопарке, 31 год живет аллигатор в зоологическом парке г. Гродно.

Китайский аллигатор — один из наиболее мелких крокодилов: средняя длина тела обычно колеблется в пределах 130—140 см, и только редкие особи достигают 200 см. Питаются китайские аллигаторы лягушками, малоподвижными видами рыб, двусторчатыми и брюхоногими моллюсками, а также ракообразными. Моллюсков, по наблюдениям в неволе, разгрызают вместе с раковинами, а потом, прополаскивая пасть в воде, избавляются от обломков раковины и заглатывают содержимое. В отличие от других крокодилов, корм с суши не берут; в террариуме поедают мясо, мышей и воробьев, брошенных в воду. Сытые аллигаторы по 2—3 дня остаются на суше, не уходя даже на ночь в воду, что также не свойственно другим крокодидам.

Китайский аллигатор погружается под воду обычно на полчаса-час, но, случается, проводит там и до двух часов. Частота сердечных сокращений при столь длительном погружении падает более чем в 6 раз, но нормальная сердечная деятельность восстанавливается через 3—4 секунды после выныривания. Накопившиеся в тканях углекислая и молочная кислоты за кратчайшее время удаляются из организма через кровь.

Как и миссисипский, китайский аллигатор впадает в зимнюю спячку, поскольку зимой в местах его обитания температура падает до 0 °С. Для зимовки аллигаторы роют норы (1,5 м

глубиной и до 30 см диаметром) неподалеку от воды. В неволе зимой аллигаторы, как правило, отказываются от пищи, несмотря на то что в террариуме поддерживается летняя температура. Вообще наблюдатели характеризуют их как крайне ленивых и скучных животных.

Половая структура популяции китайского аллигатора несложна: в изолированных прудах обычно живет один взрослый самец и 1—2 самки, но иногда в гареме их бывает 4—5.

Полагают, что аллигатор в Китае сделался прообразом дракона — символа императорской власти; встреча с ним и сейчас считается добрым предзнаменованием. Однако ни это, ни полное отсутствие агрессивности не избавляет аллигатора от охоты на него. Еще в сочинении средневекового китайского поэта У Чэнэня (XVI в.) «Путешествие на Запад» есть сведения о том, что кожу аллигаторов использовали для изготовления барабанов. Известно также, что разные части тела животных применялись в традиционной китайской медицине для приготовления лекарств и снадобий, а мясо употреблялось в пищу. Известный зоолог Х. Хедингер сформулировал своеобразное правило: животное обречено на вымирание, если частям его тела приписывали исцеляющее действие. Правда, промысел китайских аллигаторов никогда не носил такого взрывного характера, как добыча крупных крокодилов — гребнистого и нильского, а также миссисипского аллигатора; видимо, было невыгодно добывать шкуру этого довольно мелкого животного.

Разумеется, ведущаяся издревле эксплуатация такого



Китайский аллигатор в террариуме.

узкоареального вида не могла не поставить его на грань исчезновения. Безусловно, сказался на поголовье аллигаторов и интенсивный зооэкспорт. Некогда ареал китайского аллигатора ограничивался на севере нижним и средним течением р. Янцзы, а на юге — восточной частью хребта Тяньмушань. Обитал он в прудах заболоченных береговых равнин, окруженных непролазными зарослями тростника и бамбука. В результате сельскохозяйственного освоения этого ранее необжитого района аллигатор вытеснен сейчас в небольшие естественные пруды в верхнем течении рек Цзышуй и Сянцзян (притоков Янцзы), находящиеся на высоте около 100 м над ур. м. и окруженные зарослями высоких злаков. Эта местность, расположенная к северу от горной системы Южный Аньхой, сравнительно малолюдная, и численность аллигаторов здесь достаточно высока, в то время как в прежних местах, по учету 1976 г., сохранилось не более 120 особей.

Основная причина продолжающегося сокращения численности аллигатора в КНР, как считают китайские зоологи, — недостаточная пропаганда и просветительская работа. До сих пор господствует мнение об аллигаторе как о животном, нано-

сящем ущерб хозяйствам по разведению уток и рыбы. Большой урен природным популяциям аллигаторов наносит уничтожение кладок яиц детьми и подростками. Кроме того, широкое применение пестицидов и удобрений в сельскохозяйственных угодьях пагубно влияет на воспроизводство аллигаторов: хотя они и не подвергаются прямому воздействию этих вредных для них соединений, поскольку не живут в агроценозах, все же ядохимикаты попадают в их организм с пищей — лягушками, моллюсками — и проявляют свое вредное действие на репродуктивную систему.

Места обитания китайского аллигатора разобщены и представляют собой лишь отдельные островки некогда обширного сплошного ареала. То здесь, то там популяции аллигатора перестают существовать, и животных относят к вымершим. Так случилось уже вскоре после описания аллигатора и доставки первых особей в Европу: не обнаружив в местах поимки, его объявили исчезнувшим, и до 1934 г. он значился в списке вымерших животных. В 1978 г. эта история повторилась.

Сейчас, даже несмотря на вселяющее оптимизм открытие новых мест обитания аллигаторов, будущее вида вызывает беспокойство. К сожалению, сокращается число животных и в зоопарках мира: к 1 января 1973 г. в них содержалось 60 аллигаторов, причем 23 — в зоопарках СССР, но за последующие 10 лет общее количество рептилий снизилось до 48, а в нашей стране — до 18.

Опыт по разведению аллигаторов в неволе небогат; да это и не удивительно — так скуд-

ны и отрывочны сведения об их биологии. 20 лет безуспешно пытались получить потомство от пары этих рептилий в Нью-Йоркском зоопарке Бронкса. Только с 1977 г. самка стала откладывать оплодотворенные яйца, однако из 49 яиц, отложенных за три года, вывелись лишь четыре детеныша. Но в последней кладке выход был стопроцентным.

В нашей стране только в Московском зоопарке были кладки у китайских аллигаторов, но яйца оказались неоплодотворенными. По всей вероятности, в зоопарках пока не удастся создать условия содержания, близкие к природным: аллигаторы живут обычно в террариумах, а не в вольерах, нарушена и природная половая структура популяций, а это, вероятно, отрицательно влияет и на половую активность, и на воспроизводство в целом.

На наш взгляд, полезно было бы создать, пусть очень небольшой, фонд китайских аллигаторов в одном-двух зоопарках на юге нашей страны и начать там разработку по разведению их в неволе. Такими зоопарками могли бы стать Ашхабадский и новый Бакинский: местный климат позволяет содержать аллигаторов полгода в вольере, а не в террариуме, т. е. приблизить их жизненные условия в неволе к природным. Налаженное воспроизводство аллигаторов со временем позволит расселить их по зоопаркам страны и тем обогатить коллекции этих живых музеев. Для спасения китайского аллигатора в дикой природе, как и для многих других исчезающих видов животных, есть один способ — строжайшая охрана самого аллигатора и мест его обитания.

## Полупроводники со сверхрешетками

Ф. Г. Басс



Фридрих Гершонович Басс, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией Института радиофизики и электроники АН УССР, профессор кафедры теоретической и экспериментальной физики Харьковского политехнического института. Область научных интересов — статистическая радиофизика, исследование кинетических высокочастотных явлений в твердых телах и плазме. Автор монографий: Рассеяние волн статистически неровной поверхностью (совместно с И. М. Фуксом). М., 1972; Горячие электроны и сильные электромагнитные волны в плазме газового разряда и полупроводников (совместно с Ю. Г. Гуревичем). М., 1975; Электроны и фононы в тепловых электрических полях ограниченных полупроводников (совместно с В. С. Бочковым и Ю. Г. Гуревичем). М., 1984.

Бурное развитие полупроводниковой электроники — одна из наиболее ярких примет научно-технической революции нашего времени. Гибкая и динамичная область, лежащая на стыке физики и техники, она наглядно сочетает достижения таких, на первый взгляд, абстрактных наук, как квантовая механика, статистическая физика, физическая кинетика, с непосредственным выходом в самые разнообразные отрасли практики. Без полупроводниковой электроники невозможно себе представить современную вычислительную технику и автоматизированные системы управления, космические летательные аппараты и сложнейшие установки для научных исследований. Незаметно, но прочно вошла она и в наш повседневный быт. Полупроводниковые усилители и генераторы переключают почти весь диапазон радиоволн, за исключением, пожалуй, самых коротких, миллиметровых и субмиллиметровых. В этой части спектра по-прежнему основную роль играют вакуумные приборы, которые, однако, пригодны отнюдь не всюду. Сейчас ведутся интенсивные работы по созданию широкого круга полупроводниковых устройств, с тем чтобы «заполнить эту частотную брешь».

Своими успехами полупроводниковая электроника обязана не только открытию

неизвестных ранее физических явлений, но и созданию материалов с принципиально новыми свойствами. Одним из таких материалов, весьма перспективным для полупроводниковой техники миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов, являются полупроводники со сверхрешетками. Статья посвящена этим веществам с необычными свойствами, синтезированным совсем недавно и привлекающим к себе все более пристальное внимание специалистов различных областей.

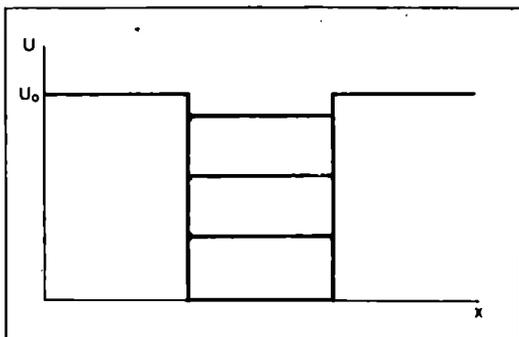
Но предварительно вкратце напомним о том, как ведут себя электроны в кристаллической решетке.

### ЭЛЕКТРОНЫ В КРИСТАЛЛЕ

Согласно современным представлениям, кристаллы, в том числе и полупроводники, состоят из соприкасающихся между собой многогранников (элементарных ячеек), в углах которых, в зависимости от типа кристалла, помещены атомы, ионы или молекулы. Простейшая модель кристалла — это одномерная цепочка, т. е. прямая линия, вдоль которой с равными промежутками расположены атомы. Расстояние  $a$  между соседними атомами называется периодом кристаллической решетки. Но

сителями тока в полупроводниках служат движущиеся в этой решетке электроны<sup>1</sup>.

Одной из основных характеристик электрона является его энергетический спектр, иными словами, набор возможных значений его энергии. Рассмотрим сначала спектр электрона в изолированном атоме. В планетарной модели атома Бора — Резерфорда электроны вращаются вокруг неподвижного ядра по стационарным замкнутым орбитам, причем на данной орбите присутствует ограниченное и строго определенное число частиц. Каждой орбите



Схематическое изображение спектра  $U(x)$  электронов в изолированном атоме, моделируемом прямоугольной потенциальной ямой глубиной  $U_0$ . Параллельные прямые внутри ямы соответствуют дискретным энергетическим уровням, т. е. возможным значениям энергии электрона в атоме. Электроны с энергией, превышающей  $U_0$ , являются свободными, их энергия может меняться непрерывно.

соответствует свое значение энергии, или, как принято говорить, энергетический уровень. Таких стационарных орбит существует бесчисленное множество. Количество же электронов в атоме определяется зарядом ядра и равно номеру элемента в Периодической системе Д. И. Менделеева. Поэтому спектр электрона в отдельном атоме оказывается дискретным и в нем заполнены лишь некоторые (нижние) уровни.

Если же каким-либо образом вырвать электрон из атома, он будет двигаться по законам классической механики и его энергия сможет принимать любые значения, т. е. спектр станет непрерывным.

Когда два атома сблизятся настолько, что между ними возникает заметное кулоновское взаимодействие, каждый энергетический уровень расщепится на два подуровня, расстояние между которыми мало по сравнению с интервалом между первоначальными уровнями.

Наконец, в кристалле, где одновре-

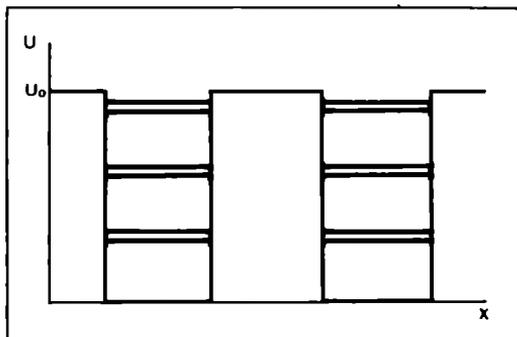


Схема электронного спектра двух взаимодействующих атомов. Каждый дискретный уровень в результате взаимодействия расщепляется на два подуровня, расстояние между которыми значительно меньше интервала между нерасщепленными уровнями.

менно взаимодействует огромное число атомов, каждый уровень трансформируется в зону, состоящую из множества перекрывающихся подуровней.

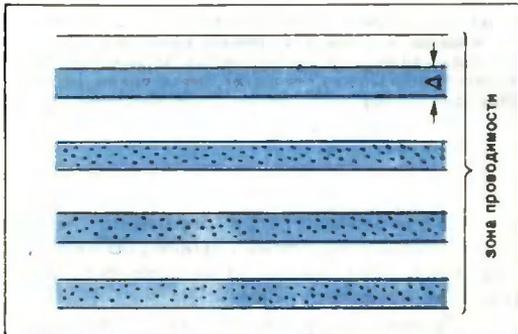
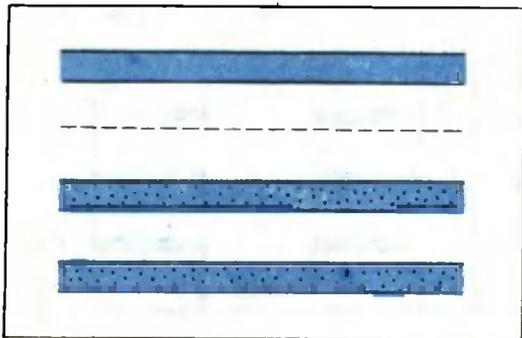
Таким образом, энергетический спектр электронов в кристалле представляет собой набор разрешенных энергетических зон, содержащих те значения энергии, которые может иметь электрон, и разделенных запрещенными зонами (энергетическими щелями) — промежутками таких значений энергии, которыми электрон обладать не может. Как и в атоме, при абсолютном нуле температуры в кристалле электроны занимают нижние разрешенные зоны, иначе говоря, спектр состоит из заполненных и пустых зон.

Если полупроводник содержит примеси, в запрещенной зоне появляются дискретные уровни, соответствующие «чужим» атомам.

Энергия электронов в кристалле определяется не только номером зоны, но и его положением внутри зоны. Величина,

<sup>1</sup> Здесь и ниже речь идет о полупроводниках с донорами — структурными дефектами кристаллической решетки, обуславливающими примесную электронную проводимость (так называемую проводимость n-типа). Атомы донора по сравнению с нормальными атомами кристаллической решетки имеют лишние электроны и легко «растают» с ними под действием света или тепла. В результате эти электроны становятся свободными и могут участвовать в переносе заряда. Их упорядоченное движение в электрическом поле приводит к протеканию тока через полупроводник.

характеризующая это положение, носит название квазиимпульса. Квазиимпульс в определенной мере похож на импульс свободного электрона. Однако между ними имеются и серьезные различия, главное из которых состоит в том, что энергия электрона в кристалле оказывается периодической функцией квазиимпульса. Оценить период этой функции можно, исходя из квантовомеханического принципа неопределенностей, согласно которому флуктуации координаты  $\Delta x$  и импульса  $\Delta p$  в микромире связаны соотношением  $\Delta x \cdot \Delta p \approx \hbar$



Зонная структура электронного энергетического спектра в обычном полупроводнике при нулевой температуре (вверху). Разрешенные зоны отмечены цветом, две нижние из них (валентные зоны) заполнены электронами, а верхняя (зона проводимости) пуста. Пунктиром показан примесный уровень. Внизу — в полупроводнике со сверхрешеточной зоной проводимости распадается на отдельные подзоны, ширина  $\Delta$  которых значительно меньше ширины исходной зоны.

( $\hbar$  — постоянная Планка). Неопределенность координаты электрона в кристалле сопоставима с периодом кристаллической решетки  $a$ , и, стало быть, квазиимпульс определен с точностью до величины  $\hbar/a$ . Периоду  $a$  в координатном пространстве можно, таким образом, сопоставить период  $\hbar/a$  в импульсном пространстве.

В слабом (не приводящем к пробое) электрическом поле при температуре, равной абсолютному нулю, ток через полупроводник протекать не будет<sup>2</sup>. Действительно, для того чтобы начать двигаться, электрон должен получить от поля энергию, т. е. перейти в другое энергетическое состояние. Но так как все состояния в разрешенных энергетических зонах заняты, электрону «двигаться» некуда. При отличной же от нуля температуре часть электронов с примесного уровня или из заполненной зоны попадает в незаполненную и через полупроводник, помещенный в электрическое поле, протекает ток.

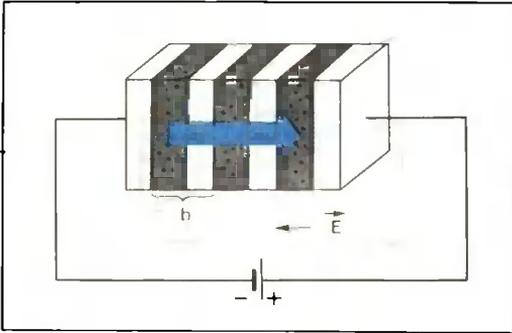
В постоянном электрическом поле напряженностью  $E$  на электрон действует сила  $eE$  ( $e$  — заряд электрона). Как следует из второго закона Ньютона, импульс  $p$  при этом растет линейно со временем:  $p = eEt$ . Учитывая периодичность квазиимпульса, для периода изменения кинетической энергии получим  $T \approx \hbar / (eEa)$ . Периодическое изменение кинетической энергии во времени вызывает колебания электрона в пространстве с той же частотой. Эта частота  $\Omega = T^{-1}$  называется частотой Штарка (иногда Ванье — Штарка), а сами колебания — блоховскими. (Заметим, что изолированный электрон в постоянном электрическом поле движется равномерно ускоренно и уходит со временем на бесконечность.)

Как мы увидим ниже, блоховские колебания приводят к очень интересным эффектам, имеющим важное практическое применение. К сожалению, в обычных полупроводниках они не наблюдаются. Это обусловлено двумя факторами: неидеальностью кристаллической решетки полупроводников и относительной малостью ее периода.

В реальном полупроводнике всегда существуют отклонения от строгой периодичности, связанные с уже упоминавшимися примесями, колебаниями атомов решетки (фононами) и рядом других причин. Электрон, сталкиваясь с такого рода нарушениями периодичности решетки, рассеивается на них, начиная «забывать» о том, что с ним было до столкновения. Чтобы блоховские осцилляции проявились, электрон должен между столкновениями совер-

<sup>2</sup> В сильном электрическом поле даже при абсолютном нуле температуры электрон может «перескочить» через запрещенную зону и попасть в пустую зону (зону проводимости). При этом через полупроводник протекает электрический ток. Это явление называется электрическим пробоем.

шить хотя бы несколько колебаний. Математически это требование выражается неравенством  $\Omega \gg \nu_c$  ( $\nu_c$  — частота столкновений), которое можно переписать так:  $E \gg \hbar \nu_c / e a$ . Подставляя в это неравенство числовые значения известных величин (в обычных полупроводниках  $a \approx 10^{-10}$  м,  $\nu_c \approx 10^{12}$  с $^{-1}$ ), получим  $E \gg 10^7$  В/м. Но уже при значительно меньших напряжениях электрического поля наступает пробой и разрушение полупроводников. Чтобы блоховские осцилляции проявились в реально достижимых условиях, необходимо увели-



Схематическое изображение полупроводниковой сверхрешетки. Светлые и темные полосы на рисунке соответствуют чередующимся слоям различных полупроводниковых материалов. Период  $b$  образующейся структуры на практике примерно в 100 раз превышает период собственной кристаллической решетки каждого материала и составляет десятки или даже сотни нанометров (1 нм =  $10^{-9}$  м). Направление дрейфа электронов, указанное цветной стрелкой, противоположно направлению вектора напряженности электрического поля  $E$ .

чить период решетки, т. е. создать искусственную периодическую многослойную структуру, имитирующую свойства естественного кристалла. Такие структуры были синтезированы и получили название полупроводников со сверхрешеткой.

### ЭЛЕКТРОНЫ В СВЕРХРЕШЕТКЕ

Как правило, электроны, попавшие из заполненной в пустую энергетическую зону (эти электроны называются электронами проводимости), группируются у ее «дна» и поэтому «потолка» зоны не чувствуют. Такие электроны ведут себя как свободные. Наложение дополнительного периодического потенциала сверхрешетки вызывает расщепление зоны проводимости на ряд разрешенных и запрещенных подзон. Обычно период сверхрешетки  $b$  примерно в 100 раз больше периода основной решетки и взаи-

модействие электронов, находящихся в разных элементах сверхрешетки, приблизительно во столько же раз слабее. Это приводит к тому, что ширина подзоны  $\Delta$  оказывается меньше ширины зоны проводимости также в 100 раз. И такую подзону, как следует из оценок предыдущего раздела, электрон может «проскочить» без столкновений при умеренных полях около  $10^5$  В/м.

### ИЗГОТОВЛЕНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СВЕРХРЕШЕТОК

Для получения полупроводников со сверхрешетками в настоящее время используется главным образом эпитаксия, т. е. осаждение слоев разных материалов из жидкости, газа или молекулярных пучков<sup>3</sup>. Так, при жидкостной эпитаксии слои различных материалов осаждаются из растворов или расплавов на специально выбранную подложку. Это достигается в результате изменения температуры расплава. Наряду с жидкостной применяется также газовая эпитаксия, при которой газообразный носитель доставляет необходимые вещества к тому месту, где создается сверхрешетка, а там из газа эти вещества осаждаются на подложку. Но наиболее эффективной оказалась эпитаксия из молекулярных пучков, когда соответствующие вещества переносятся к месту осаждения молекулярными пучками. Именно так изготавливают широко употребляемые сверхрешетки с чередующимися слоями InGaAs и GaSbAs.

Следует отметить, что процессы подобного рода сопряжены со значительными технологическими трудностями, ибо, во-первых, нужно строго выдерживать периодичность решетки и, во-вторых, основная кристаллическая структура, из которой строится сверхрешетка, должна быть идентична у обоих материалов, иначе на границе слоев могут образоваться дефекты, резко ухудшающие ее свойства. Наконец, необходимо, чтобы переход от одного слоя к другому происходил достаточно резко.

Все это приводит к тому, что пока изготовление сверхрешеток весьма дорого

<sup>3</sup> Здесь упоминаются способы получения так называемых композиционных полупроводниковых сверхрешеток, состоящих из строго чередующихся слоев различных чистых (собственных) полупроводников. Наряду с ними все более широкое применение находят полупроводниковые сверхрешетки, в которых чередуются слои одного и того же полупроводника с различным содержанием примесей (донорных или акцепторных). Такие сверхрешетки получили название легированных. См., напр.: Полупроводниковые сверхрешетки.— Природа, 1983, № 6, с. 105.

и трудоемко. На осаждение одного слоя тратится несколько секунд, а готовый образец состоит примерно из ста тысяч слоев. Тем не менее изготовление и исследование полупроводников со сверхрешетками ведется в широких масштабах уже во многих странах.

### СВЕРХРЕШЕТКИ В ПОСТОЯННОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

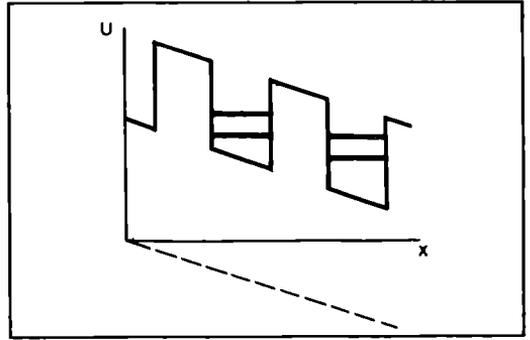
Любой генератор электромагнитных волн представляет собой преобразователь какого-либо вида энергии в энергию электромагнитного поля. В этом разделе мы рассмотрим генератор радиоволн миллиметрового диапазона и генератор инфракрасного излучения, использующие в качестве источника энергии постоянное электрическое поле. Предварительно, однако, необходимо остановиться на поведении электронов в полупроводнике со сверхрешеткой, помещенном в такое поле.

Как отмечалось выше, при температуре, отличной от абсолютного нуля, под действием этого поля через полупроводник течет постоянный электрический ток, т. е. электроны получают энергию от поля. Затем, столкнувшись с каким-либо нарушением периодичности кристаллической решетки (это может быть примесь или фоновый дефект), электрон отдает приобретенную энергию, после чего опять ускоряется полем. В результате в среднем электрон движется (как говорят, дрейфует) в направлении электрического поля. Значения энергии, полученной электроном от поля и переданной дефектам решетки, должны совпадать, иначе ток станет неустойчивым.

Если энергия  $eE\lambda$ , набранная электроном на периоде сверхрешетки, меньше ширины подзоны  $\Delta$ , поле на энергетический спектр электронов в полупроводнике заметно не влияет. Если же  $eE\lambda > \Delta$ , спектр сильно изменяется и его вид существенно зависит от величины напряженности  $E$ . Как и в изолированном атоме, он становится дискретным, однако в этом случае форма потенциальных ям и расположение уровней в них определяются значением  $E$ .

Теперь рассмотрим зависимость силы тока  $j$  от напряженности электрического поля в полупроводнике со сверхрешеткой, иными словами, вольтамперную характеристику этого полупроводника. Пока электрическое поле мало ( $eE\lambda < \Delta$ ), ток меняется пропорционально напряженности поля, т. е. подчиняется закону Ома  $j = \sigma E$  ( $\sigma$  — проводимость). В таком поле электрон движется между столкновениями фактически прямолинейно. В полях большей напряженности

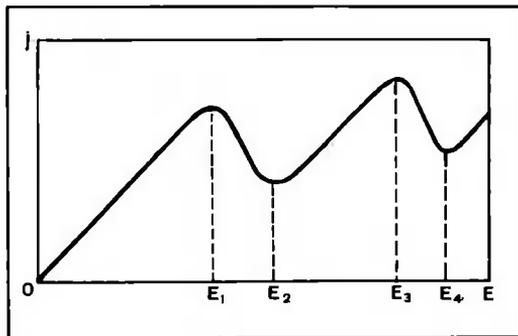
начинают сказываться блоховские колебания с частотой  $\Omega$ , соответствующей периоду сверхрешетки. Эти осцилляции затрудняют передачу энергии и импульса от электрона фононам и примесям, поскольку электрон уже не перемещается по прямой до столкновения с препятствием, а колеблется в малой области пространства. Для переноса же заряда необходимо поступательное движение носителей. Если в слабых полях столкновения нарушают поступательное движение, то в сильных они оказываются его единственной причиной, «сбивая» коле-



Стена энергетического спектра полупроводника со сверхрешеткой в сильном постоянном электрическом поле. Этот спектр оказывается дискретным и напоминает спектр изолированных атомов. Однако все потенциальные ямы заметны «перекосены» за счет энергии взаимодействия электрона с полем:  $-eEx$  (пунктирная прямая). Поэтому нижний уровень в одной яме может совпасть с верхним уровнем другой или даже оказаться выше. В результате спектр сильно зависит от величины приложенного поля.

бания. Чем больше штарковская частота  $\Omega$ , тем реже столкновения и слабее электрический ток. Математически это учитывается дополнительным множителем  $(v/\Omega)^2$  в законе Ома. Как следствие в достаточно сильных полях на вольтамперной характеристике появляется первый падающий участок, где  $j \sim E^{-1}$ , т. е. ток убывает с ростом напряженности электрического поля. При дальнейшем увеличении поля наблюдается второй спад — ток уменьшается из-за перестройки энергетического спектра электронов, который становится дискретным. В самом деле, чтобы перейти из одной потенциальной ямы в другую, электрон должен излучить либо поглотить квант света (фотон) или звука (фонон) с энергией, равной разности энергий соответствующих уровней в этих ямах. Такой переход связан с прохождением через потенциальный барьер, разделяющий ямы, и называется туннельным. Туннельные переходы малове-

роятны, так что ток, обусловленный поступательным движением электронов в кристалле, будет мал. Резкий рост тока возможен в тех случаях, когда энергии двух уровней в соседних ямах совпадут. При этом переход из одной потенциальной ямы в другую происходит без изменения энергии электрона, или, как говорят, имеет место резонансное туннелирование. Его вероятность гораздо больше, чем у нерезонансного. Следовательно, вольтамперная характеристика полупроводника со сверхрешеткой обладает рядом максимумов,



Вольтамперная характеристика  $j(E)$  полупроводника со сверхрешеткой. Первый падающий участок  $[E_1 < E < E_2]$  связан с блоховскими осцилляциями электронов, второй  $[E_3 < E < E_4]$  — с их туннельными переходами из одной потенциальной ямы в другую, сопровождаемыми изменением энергии. Второй пик обусловлен резонансным туннелированием (без изменения энергии электрона). Слэды на кривой характеризуются различным углом наклона (крутизной).

разделенных падающими участками с различной крутизной.

Наличие падающего участка приводит к так называемому эффекту Ганна, который можно использовать для создания генератора электромагнитных волн.

Пусть полупроводник со сверхрешеткой включен в цепь последовательно с батареей. Допустим, что поле внутри полупроводника в начальный момент однородно и его напряженность соответствует первому падающему участку вольтамперной характеристики  $(E_1 < E < E_2)$ .

В полупроводнике всегда присутствуют неоднородности, например в некотором месте концентрация донорных примесей может быть больше, чем в среднем по образцу. Вблизи этого места концентрация электронов также окажется выше средней. С ростом концентрации электронов в какой-либо области увеличивается и напряженность электрического поля. Но на падаю-

щем участке вольтамперной характеристики увеличение напряженности приводит к уменьшению силы тока. Ее величина, в свою очередь, пропорциональна дрейфовой скорости электронов, и, значит, в области повышенной концентрации электроны двигаются медленнее, чем в среднем по образцу.

Повышенная скорость дрейфа за пределами зоны неоднородности (именуемой доменом) ведет к дальнейшему падению напряженности поля вне домена. После того как величина этой напряженности ста-



Схема генератора Ганна. Цветом выделен домен — область повышенной напряженности поля, стрелкой указано направление его движения.

нет меньше  $E_1$ , скорость дрейфа электронов также начинает уменьшаться с уменьшением  $E$  и убывает до тех пор, пока не сравняется со скоростью в домене. При этом дрейфовая скорость оказывается одинаковой во всем образце. Дойдя до анода, домен разрушается, и поле в образце скачком возрастает. Но затем по описанному выше «сценарию» образуется новый домен, что приводит к очередному спаду поля, и весь процесс повторяется. Чаще всего домен возникает около катода, который также представляет собой неоднородность.

Таким образом, в полупроводнике, имеющем вольтамперную характеристику с падающими участками, наблюдаются всплески поля с частотой  $\omega = v/L$  ( $L$  — длина образца,  $v$  — дрейфовая скорость домена). Скорость домена зависит от крутизны падающего участка, так что, меняя напряженность поля и переходя от одного падающего участка вольтамперной характеристики к другому, мы получаем генератор с дискретным набором частот, относящихся к миллиметровому радиодиапазону.

На полупроводнике со сверхрешеткой можно, по-видимому, построить инфра-

красный лазер. Действительно, будем считать, что в каждой яме энергетического спектра все электроны находятся на нижнем уровне, а верхний — пуст. Если нижний уровень одной ямы с помощью электрического поля совместить с верхним уровнем другой, то на него электроны смогут попасть в результате резонансного туннелирования. Переходя с верхнего на нижний уровень, электрон испустит фотон с энергией, равной разности их энергий. Оценки показывают, что соответствующая частота относится к инфракрасному диапазону.

### ПОЛУПРОВОДНИКИ СО СВЕРХРЕШЕТКОЙ В ПЕРЕМЕННОМ ПОЛЕ

Весьма интересны свойства полупроводников со сверхрешеткой и в переменном поле электромагнитной волны.

Если электрический ток в среде пропорционален приложенному внешнему полю, среда называется линейной. Для линейной среды справедлив принцип суперпозиции, заключающийся в том, что несколько волн в такой среде распространяются независимо, не действуя друг на друга. Иначе говоря, при распространении волн в линейной среде их частоты  $\nu$  и волновые векторы  $\vec{k}$  сохраняются и волны с новыми значениями этих параметров не возникают.

Этот принцип выглядит особенно просто при переходе к корпускулярным представлениям. В квантовой механике волне соответствует частица (фотон) с импульсом  $\vec{p} = \hbar\vec{k}$  и энергией  $\epsilon = h\nu$ . В линейной среде фотоны движутся без столкновений. Это и есть принцип суперпозиции в корпускулярной формулировке. С возрастанием электрического поля на вольтамперной характеристике среды появляется участок с малой нелинейностью. В слабых полях представление о фотонах сохраняет свой смысл, но их уже нельзя рассматривать как не взаимодействующие. Фотоны сталкиваются между собой, обмениваясь энергией и импульсом. При дальнейшем увеличении напряженности поля количество фотонов растет, их столкновения происходят все чаще и чаще, и, в конце концов, описание процессов в сильных полях с помощью фотонов становится неадекватным. В таких случаях говорят, что в среде распространяются нелинейные волны.

В полупроводнике со сверхрешеткой нелинейные волны имеют вид движущегося мена, о котором говорилось выше. При малой нелинейности столкновение фотонов с частотами  $\nu_1$ ,  $\nu_2$  и волно-

выми векторами  $\vec{k}_1$ ,  $\vec{k}_2$  приводит к рождению фотона с частотой  $\nu_3 = \nu_1 + \nu_2$  и волновым вектором  $\vec{k}_3 = \vec{k}_1 + \vec{k}_2$  (эти соотношения представляют собой просто-напросто выражение законов сохранения энергии и импульса при подобном столкновении). Взаимодействие такого типа, изменяющее частоты вводимых в полупроводник электромагнитных волн, представляет весьма интересным для создания различных приборов. В частности, этим способом можно добиться удвоения частоты распространяющихся через полупроводник волн, т. е. перейти в более высокочастотную область. Перспективной кажется и возможность «перекачки» энергии из интенсивной волны с одной частотой в слабую волну с другой частотой. На этой основе действуют так называемые параметрические усилители, широко применяемые в радиотехнике.

Явления, о которых шла речь до сих пор, обнаружены экспериментально, и на их основе создаются разнообразные приборы. В настоящее время имеется уже несколько десятков патентов на различного рода радиотехнические устройства, главными элементами которых служат полупроводники со сверхрешеткой. Не вызывает сомнений, что в ближайшие годы они займут важное место в полупроводниковой электронике. Существует, однако, целый ряд эффектов, предсказанных теоретически и для своего воплощения еще ждущих экспериментатора и инженера.

В первую очередь сюда нужно отнести весьма своеобразные резонансные явления в полупроводниках со сверхрешеткой. (Эти явления наблюдаются в тех случаях, когда частота внешнего периодического воздействия совпадает с собственной частотой колебательной системы, подвергаемой такому воздействию.) Упомянем для примера одно из них.

Для электронов в полупроводнике со сверхрешеткой, помещенном в постоянное электрическое поле, собственной оказывается шарковская частота  $\Omega$ . Если рядом с постоянным электрическим полем к полупроводнику приложить переменное поле, то при совпадении частоты этого поля со шарковской частотой резко возрастает ток, протекающий через полупроводник. Это и есть шарковский резонанс. Экспериментально он пока не наблюдался. Между тем шарковский резонанс, помимо чисто научного, имеет и большое практическое значение. В частности, он может быть использован для определения каче-

ства сверхрешетки<sup>1</sup>. Чем ярче выражен резонанс, тем лучше изготовлена сверхрешетка.

Для приложений очень интересна также теоретически предсказанная возможность использования полупроводниковых сверхрешеток в качестве усилителей миллиметровых радиоволн. Как отмечалось выше, полупроводник с падающим участком вольтамперной характеристики в постоянном электрическом поле неустойчив. В таком полупроводнике при переходе в стационарное состояние выделяется энергия. Если при этом через полупроводник распространяется электромагнитная волна, то энергия постоянного поля может передаться волне, усилив ее.

Наряду с рассмотренными квантовыми сверхрешетками, период которых настолько мал, что, как мы видели, сказывается на формировании электронного энергетического спектра, в самое последнее время все шире начинают применяться классические сверхрешетки. Они также состоят из периодически чередующихся слоев различных полупроводниковых материалов, но эти слои настолько толстые, что спектр электронов в каждом из них такой же, как и в массивном полупроводнике. Будучи «классическими» для электронов, подобные материалы могут оказаться «квантовыми» по отношению к электромагнитным волнам, длина которых сравнима с периодом сверхрешетки. Как отмечалось выше, распространению электромагнитной волны в полупроводнике со сверхрешеткой можно сопоставить движение эквивалентной частицы — фотона в периодическом поле. Как и у электронов, энергетический спектр фотонов в таком полупроводнике состоит из набора чередующихся разрешенных и запрещенных зон. В каждой из разрешенных зон частота волны (энергия фотона) представляет собой периодическую функцию ее волнового вектора (импульса фотона). Подобный спектр характерен для любой периодической системы. Электродинамические свойства такой системы совершенно непохожи на свойства ее составных частей.

Классические сверхрешетки также используют для генерации электромагнитных волн. Однако принцип генерации в этом случае совсем не тот, что в квантовых сверхрешетках. Он связан с так называемым переходным излучением, испускаемым заряженными частицами при пересечении

границы раздела двух сред с различными диэлектрическими проницаемостями.

Суть этого явления можно пояснить следующим образом. Если заряженная частица движется равномерно в однородной среде со скоростью, меньшей фазовой скорости электромагнитных волн в этой среде, то такая частица, как известно, никакого излучения не испускает. Создаваемое ею электростатическое кулоновское поле определяется диэлектрической проницаемостью среды и перемещается вместе с частицей с той же скоростью. Когда частица пересекает границу двух сред, изменение диэлектрической проницаемости влечет за собой изменение кулоновского поля. Изменение же поля во времени соответствует излучению электромагнитных волн.

Через классическую полупроводниковую сверхрешетку, помещенную в постоянное электрическое поле, протекает постоянный ток. При переходе через границы слоев электроны проводимости испускают электромагнитное излучение; иными словами, такая система будет работать как генератор электромагнитных колебаний.

В ограниченном полупроводнике с классической сверхрешеткой вдоль граничной плоскости могут распространяться поверхностные волны, амплитуда которых заметно отличается от нуля только вблизи этой плоскости и резко убывает по мере удаления от нее в обе стороны. Поверхностные волны имеют многочисленные применения. В частности, они могут взаимодействовать не только с электронами проводимости, но и с пучком внешних электронов, испускаемых, например, электронной пушкой и движущихся вдоль поверхности раздела в вакууме, что значительно расширяет возможности такой системы для генерации и усиления электромагнитных колебаний.

Конечно, приведенные примеры далеко не исчерпывают многочисленные, важные как с чисто научной, так и с технической точки зрения эффекты, уже известные теоретикам, но еще не наблюдавшиеся экспериментально. На пути широкого применения приборов с полупроводниковыми сверхрешетками существуют трудности главным образом технологического характера. Однако история науки не знает случая, когда подобные трудности не были бы преодолены. Думается, что и на этот раз они не смогут приостановить развитие нового и весьма многообещающего направления полупроводниковой электроники.

<sup>1</sup> Басс Ф. Г., Рубинштейн Е. А. — Физ. тв. тела, 1977, т. 19, вып. 5, с. 1379.

## «Происхождение видов». Загадки первого перевода

Ю. В. Чайковский

Институт истории естествознания и техники АН СССР  
Москва

Россия в прошлом веке мало читала по-английски — настолько, что практиковалось даже переводить английские сочинения не с оригинала, а с немецких или французских переводов. За английской научной литературой следили слабовато, первые оригинальные издания «Происхождения видов» в Россию почти не попали, и она познакомилась с книгой Чарлза Дарвина в немецком переводе<sup>1</sup>. Уже в 1860 г. перевод прочли многие русские ученые и публицисты, и книга стала настольной. Ею продолжали пользоваться много после появления в 1864 г. русского перевода. Хотя последний и выполнен, безусловно, с английского, но и он испытал влияние 1-го немецкого перевода.

Для континентальной Европы 1-е немецкое издание «Происхождения видов» сыграло примерно ту же роль, что и 2-е английское для Англии и 2-е американское для Северной Америки: именно в этих вариантах ученый и неученый мир знакомился с книгой, ознаменовавшей переворот в науке. Сегодняшние читатели обычно и не подозревают, что известный им текст знаменитой книги сильно отличен от первоначального: окончательное, 6-е издание (1872) содержит 30 % нового текста, да и в прежнем тексте большая часть фраз подверглась изменению<sup>2</sup>. Однако бурные научные споры вспыхнули в ос-

новном не вокруг этих изданий: ученые, кроме тех 20—30, которым Дарвин послал книгу сам, узнали о 1-м издании из газет и популярных журналов (издатель разослал обозревателям 41 экземпляр), а 6-е издание ни для кого уже не было новостью.

Зато в 1860 г. ученые спокойно покупали 2-е издание, лежавшее на лондонских прилавках почти год, а вне Англии — 2-е американское издание и его немецкий вариант. В 1862—1883 гг. эти ранние издания переиздавались в разных странах в общей сложности более 10 раз — словно бы Дарвин и не выпускал новых, переработанных. Такое невнимание продолжалось и после Дарвина. В частности, в первой трети XX в. наблюдался новый взрыв интереса к дарвинизму, и английские издатели в основном удовлетворяли его перепечатками 2-го издания, даже не сообщая читателю, что существуют и другие варианты. А в наши дни большинство авторов цитирует Дарвина по 6-му изданию и уверяет, что Дарвин писал это в 1859 г. Сколько душевных сил потратил Дарвин на переработку книги, а это оказалось почти лишним.

Почему так? Почему вот уже век с четвертью почтение к книге и даже благоговение сочетаются с невниманием к ее тексту? Может быть, различия не касаются существа дела? Нет, часто пишут, что первоначальная формулировка учения более ясна и определена и что поздние издания содержат много уступок, оговорок и ограничений. Когда-то это даже давало повод критикам противопоставлять ранний дарвинизм позднему<sup>3</sup>. В поздних изданиях действительно много чисто полемического материала, подчас понятного только историку,

<sup>1</sup> Выпишем для удобства даты выхода ранних изданий «Происхождения видов»: 1-е лондонское — ноябрь 1859 г., его американская копия — январь 1860 г., 2-е лондонское — январь 1860 г., 2-е американское — май 1860, его русский перевод — январь 1864, 1-е немецкое издание (почти перевод 2-го американского) — июль 1860 г., 3-е лондонское — апрель 1861 г., 1-е французское (почти точный перевод 3-го лондонского) — III квартал 1862. Тем самым для не читавших по-английски немецкий перевод оставался основным текстом в течение двух лет.

<sup>2</sup> The origin of species by Charles Darwin. A variorum text edited by M. Peckham. Philadelphia, 1959, p. 9.

<sup>3</sup> Например, Н. Я. Данилевский считал изложенный во 2-м американском издании вариант дарвинизма «строго последовательным» и «был изумлен огромною разницею, существующей между первоначальным и новым дарвинизмом» (Данилевский Н. Я. Дарвинизм. СПб, 1885, т. 1, ч. 1, с. 40).

зато они освобождены от ряда неудачных определений, примеров и аналогий, а также содержат важные уточнения и разъяснения. Поэтому нельзя указать единого дарвинского текста, который был бы наиболее пригоден для всестороннего уяснения учения. Прежде в таком тексте особой нужды и не было, так как учение Дарвина выступало в качестве общей идейной платформы эволюционизма и люди, знакомые с дарвинизмом по разным источникам, редко замечали разницу в своей информированности. Отсюда и отмеченное выше невнимание. Сейчас положение иное: факт эволюции давно общепризнан, и никто не сомневается в реальности феноменов изменчивости и отбора. Сегодня, когда практика настойчиво ставит вопросы конкретного хода и механизма отдельных эволюционных процессов, ссылки на «дарвинизм вообще» все менее удовлетворяют ученых. Их все чаще интересует точный ход мысли Дарвина, поэтому неизбежно встает вопрос — какой текст лучше читать тому, кто не в силах проработать их все?

В качестве такого текста можно предложить, как ни странно, 1-й немецкий перевод великой книги.

Прежде всего, 1-й немецкий перевод и 2-е американское издание, готовившиеся почти одновременно, обладают общим достоинством: здесь Дарвин, почти еще не вводя оговорок и уступок, практически уже завершил свою концепцию. В главах 4 и 10 он сформулировал свое отношение к проблемам прогрессивной эволюции, причем была впервые уверенно проведена гипотетико-дедуктивная методология<sup>4</sup>, до этого в основном сквозившая в подтексте. Тогда же он ответил на несколько фундаментальных возражений критиков и сделал это, пожалуй, удачнее, чем в привычном нам 6-м издании, где одни ответы сведены в особую главу, а другие, как и прежде, рассеяны по тексту, причем многие из них носят характер частной полемики. Такие неудачные ответы, породившие позже мнение об отступлении Дарвина от собственного учения, стали появляться уже в 3-м издании.

Вот один пример: в августе 1860 г. в письме ботанику Гарвею Дарвин подробно разбирал вопрос о неправильном понимании термина «естественный отбор» и позже включил эту свою аргументацию в 3-е издание, закончив ее словами: «В буквальном смысле слова естественный отбор,

несомненно, — термин, неправильно употребляемый (misnomer)», а в 5-м издании выразился еще более резко — «ложный (false) термин»<sup>5</sup>. Такой вывод, уместный в письме коллеге, выглядел в книге странно. Гораздо удачнее трудность этого понятия пояснена в немецком переводе: на с. 10 переводчик объяснил в сноске, как оно ново и трудно для перевода, и привел несколько немецких вариантов.

Главным же достоинством немецкого перевода по сравнению со 2-м американским изданием явился почти полный учет смысловой правки 2-го лондонского издания (как ни странно, добрая ее половина в американское не попала). Не продолжая перечня особенностей немецкого издания, можно смело утверждать, что оно интересно и заслуживает спасения от забвения не меньше чем 1-е английское.

В нем, однако, есть купюра (она одна только и привлекала до сих пор внимание критиков), из-за которой издание считается плохим, а переводчик — недобросовестным: в заключении книги нет фразы: «Будет пролит свет на происхождение человека и его историю». Почему?

## В ЗАЩИТУ ДОБРОГО ИМЕНИ

Первая русская рецензия на книгу Дарвина была, конечно, рецензией на немецкий перевод. Ее автор, П. Л. Лавров, ставший впоследствии знаменитым публицистом-народником, специально опубликовал на личном переводчика — Генриха Бронна, который «стал в ряду известнейших германских натуралистов вообще». «И этот знаменитый ученый, среди неутомимого продолжения начатых трудов, не считает для себя унизительным заняться переводом чужого сочинения, которое сопровождает примечаниями, дополнениями, критикой; этот ученый, не разделяя вполне мнений своего товарища по науке, настолько чужд зависти и мелочного самолюбия, что отдает полную справедливость сочинению человека, слава которого может затмить его собственную... Как хотите, независимо от заслуг ученого, в этом случае нельзя не уважать в Бронне человека»<sup>6</sup>.

Рецензию Лаврова забыли. Не упоминал ее, в частности, известный дарвиновед С. Л. Соболев, писавший: «Вскрытое нами поведение Бронна, его отношение к Дарвину и его классическому труду... достаточно

<sup>4</sup> О ней см.: Чайковский Ю. В. Истоки открытия Ч. Дарвина. Опыт методологического анализа. — Природа, 1982, № 6, с. 87.

<sup>5</sup> The origin of species by Charles Darwin, p. 165.

<sup>6</sup> Лавров П. Л. — Отечественные записки, 1861, февраль, ч. III, пагинация 2, с. 111.



Георгий Георг Бронн (1800—1862).

некрасивы. Они рисуют перед нами образ немецкого «геллертера» середины прошлого века, самоуверенного, чванливого и мелочного», возражения которого «свидетельствуют лишь о том, насколько он сам оказался несостоятельным даже в простой задаче правильно понять учение Дарвина»<sup>7</sup>.

Эти два отзыва несопоставимы настолько, что не может быть и речи о поиске компромисса. Что-то здесь в корне непонятно: почему Бронн «чужд мелочного самодлюбия» для одного, но «чванлив и мелочен» для другого? И почему он, неспособный понять Дарвина и несогласный с ним, взялся его переводить, отложив все дела? (Немецкий перевод вышел в свет через 5 месяцев после посылки Дарвином рукописи Бронну.) Может быть, Лавров преувеличил положительные качества Бронна, не заметив отрицательных? Ведь он, читая «Происхождение видов» на немецком, не мог судить об адекватности перевода, а преувеличить научный вклад сиюминутной знаменитости очень легко. Однако известный морфолог А. Реманэ почти столетие спустя считал, что бронновское учение о

морфологическом прогрессе все еще лежит в основе представлений ученых<sup>8</sup>.

Соболь не проводил анализа немецкого текста, и серьезных претензий у него было всего четыре: 1) Бронн «бесцеремонно» утверждал, что именно ему принадлежит идея снабдить «Происхождение видов» очерком о предшественниках Дарвина (очерк появился во 2-м американском издании и немецком переводе); 2) он перевел термин *natural selection* выражением *natürliche Züchtung* (*Züchtung* — разведение), «по существу бессмысленным»; 3) он «бесцеремонно» изъясил фразу о человеке; 4) возражения Бронна Дарвину были «наивны даже по тому времени».

В отношении первого пункта Соболь был прав: наивно было Бронну считать, что никто, кроме него, не писал о предшественниках Дарвина. Вторую претензию, наоборот, легко отвести: термин, верный с точки зрения самого Соболя («*natürliche Zuchtwahl*»), что в додарвиновских терминах лучше всего перевести как «выбор для спаривания»), предложен именно Бронном<sup>9</sup>. Зато два других упрека порождают длинные загадки, и разгадать их — значит, понять многое в дарвинизме, в его сути и судьбе.

Купюру уже более ста лет приписывают злой воле Бронна, хотя никто, кажется, не ставил вопроса: была ли фраза о человеке в рукописи, посланной Бронну? Поскольку эту фразу считают единственной о человеке, создается впечатление, что Бронн сознательно искажал мысль Дарвина, отказав ему в приложимости эволюционной идеи к человеку. Однако эта фраза единственна только в окончательной редакции, а во всех других есть еще одна. Рассуждая о влиянии местных условий жизни на различия человеческих племен, Дарвин пришел к выводу, что с помощью его учения «можно, по-видимому, пролить некоторый свет на происхождение этих различий...». Она сохранена в немецком переводе (S. 209), причем именно это место Бронн отнес к «доводам в пользу дарвиновской теории» (S. 508), так что изъятие им почти такого же места

<sup>8</sup> R e m a n e A. Die Grundlagen des natürlichen Systems... Leipzig, 1956.

<sup>9</sup> Бронн, как уже говорилось, упорно искал подходящий эквивалент; кое-где в переводе он использовал «*natürliche Zuchtwahl*» (S. 87, 92). Характерно, что все ранние переводчики «Происхождения видов» встретились с той же, что и Бронн, трудностью, и все переводили «*natural selection*» как активный выбор. См.: Чайковский Ю. В. Рождение дарвинизма.— В сб.: Теоретические проблемы современной биологии. Пушино, 1983, с. 99—100.

<sup>7</sup> Соболь С. Л.— Бюлл. МОИП, отд. биол., 1949, № 3, с. 93.

было бы просто абсурдно. (Кроме того, как мы увидим далее, сам Бронн к тому времени допускал эволюцию человека в большей мере, нежели Дарвин.)

Другое дело — Дарвин. Как раз в это время он начал свои мучительные размышления о приложимости учения о естественном отборе к происхождению человека. 10 января 1860 г. он писал Ч. Лайелю, работавшему над книгой «Древность рода человеческого»: «Вы, бывало, советовали мне осторожно касаться человека. Подозреваю, что мне придется вернуть этот совет сторицею..., хотя в одной фразе (с. 489 нового издания [т. е. во фразе, изъятый из немецкого перевода.— Ю. Ч.]) я говорю, что убежден, что человек относится к той же категории, что и другие животные... О человеке я думал, но очень смутно. В отношении племен один из моих лучших шансов выяснить истину не удался из-за невозможности добыть факты... По психологии я почти ничего не сделал»<sup>10</sup>. Как видим, Дарвин сам увязал обе фразы о человеке, причем колебался в их обоснованности и уместности, а затем почему-то затронул в том же духе тему психологии. Этот перевод был бы непонятен, если бы на с. 489 фразе о человеке не предшествовала такая: «Психология получит новое основание...» И ту же параллель мы видим в немецком переводе: фраза о человеке опущена, а «психология» заменена на «физиологию»<sup>11</sup>.

Разумеется, указание этой параллели — еще не доказательство того, что купюру произвел Дарвин, но ее вполне достаточно, чтобы отказать от утверждения, что купюра сделана Бронном, пока в пользу последнего не найдется каких-либо данных. Скорее можно бы удивляться, почему эта правка для немецкого издания не попала в другие, но подобных примеров Дарвин оставил нам много: каждое издание содержит свою уникальную правку, хватая ее и в немецком переводе.

Убедившись, что доброе имя Бронна ничем пока не запятано, обратимся к последнему упреку: насколько его возражения были «наивны даже по тому времени». Этот вопрос тесно связан с другим: почему вообще мог появиться перевод, чем книга Дарвина оказалась так важна Бронну, что он сразу перевел ее, бросив бесчисленные дела?

## БРОНН И НАТУРФИЛОСОФИЯ

Лавров был прав, изумляясь решению Бронна перевести книгу Дарвина: понять, как этот человек успевал сделать все, невозможно. Достаточно просмотреть его обширные сводки по геологии, палеонтологии и зоологии или отредактированный им удивительно насыщенный журнал, чтобы поразиться, как много он знал и умел; а ведь весь этот фактический материал был для него лишь базой общетеоретических работ.

Генрих Георг Бронн (1800—1862), профессор зоологии и прикладной естественной истории в Гейдельберге, более всего известен как основатель многотомного труда «Бронновские классы и отряды животного царства», который поныне издается в Лейпциге; но нам он интересен как один из авторов современной концепции морфологического прогресса<sup>12</sup>. До него было предложено несколько пониманий прогресса — как близости к человеку (по строению и функциям), как меры сложности (числа разных частей) организма и т. п., но они были достаточно частными и вызвали одни споры. Бронн же предложил в 1853 г. критерий, одновременно комплексный и годный для работы: морфологический прогресс он характеризовал не только через дифференцированность и специализацию частей тела (как делал до него К. Бэр и А. Мильн-Эдвардс), но и через симметрию тела, уменьшение числа гомологических органов, концентрацию органов в пределах тела (например, головной мозг у высших вместо распределенных по телу ганглиев у низших) и их проникновение в глубь тела, а также — через усложнение онтогенеза<sup>13</sup>. Исследуя вымершие и нынешние организмы, Бронн выявил фактические прогрессивные линии их развития, чем заложил, в сущности, основы эволюционизма. Тем самым он встал лицом к лицу с очень трудной проблемой: его огромный материал ясно говорил об эволюции, тогда как сама идея эволюции считалась в его кругу полунаучной фантазией. Душой он принадлежал к морфологической школе Кювье, но собственные исследования вели его в объятия натурфилософии, которую Кювье строго порицал.

Личный выход Бронн нашел в том, что взялся описать с единой теоретической

<sup>10</sup> Life and letters of Ch. Darwin. L., 1888, v. 2, p. 265.

<sup>11</sup> The origin of species by Charles Darwin, p. 757.

<sup>12</sup> Канаев И. И. Очерки из истории проблемы морфологического типа от Дарвина до наших дней. М.—Л., 1966, с. 19—27.

<sup>13</sup> Бронн Г. Общее введение в естественную историю. Ч. 1. М., 1868.

позиции весь фактический ход эволюции (насколько позволяли тогдашние данные), однако самый факт порождения одним видом другого отрицал, считая эволюцию непрерывной цепью творений. Эта позиция импонировала кювьеровской школе, и в 1857 г. он получил премию Парижской Академии наук за обширное исследование истории жизни, представленное им на французском языке и вскоре изданное в переработанном виде по-немецки<sup>14</sup> под заглавием «Исследования законов развития органического мира во время образования земных оболочек». Там он сформулировал 10 общих законов, из которых мы приведем для примера девятый — закон террипетного развития (*développement terripete* — т. е. развития, устремленного к земле): морфологически тип «стоит тем выше, чем более преобладают в нем наземные классы и отряды». Очень характерно для Бронна то, что эта формулировка содержится в § 9, но без употребления термина «террипетный», который формально определяется только в § 55 (хотя и встречается по всей книге); это определение, однако, не слишком ясно, более понятное дается лишь в § 68, причем — в разделе «Первый фундаментальный закон»; а полное его понимание создается лишь по прочтении всей книги в 500 страниц. Если бы руководствоваться принципом «Кто ясно мыслит, тот и ясно излагает», эту книгу Бронна не стоило бы и читать (в отличие от его «Естественной истории»). Ее и в самом деле мало читали, вскоре забыли, а отдельные законы, вроде террипетного, практически не обсуждались никогда.

Однако «Исследования» Бронна — одна из самых значительных книг той поры, без которой нельзя вполне уяснить ни причины успеха «Происхождения видов», ни развития эволюционизма вообще. Мы привыкли считать, что представление о постепенном развитии жизни вошло в науку с Дарвином, но ведь в его книгах нет ни описания истории флор и фаун, ни анализа морфофизиологической эволюции каких-либо групп организмов, ни глобальных экологических обстоятельств (связи эволюции жизни с составом атмосферы, животных с растениями и т. п.), ни формулировки отдельных законов эволюции,

вроде террипетного развития. Все это мы видим у Бронна. Да, он отвергал возможность рождения вида из вида, но при этом указывал, что считает сомнительным рождение нового вида от единственной пары особей (как это полагали тогдашние эволюционисты), и в этом был близок к Дарвину.

Заметим, что тот вариант дарвинизма, который был так популярен сто лет назад под именем геккелизма и вел начало от «Общей морфологии» Э. Геккеля (1866), имел три явных корня — Дарвина (ненаправленная изменчивость и отбор), Ламарка и Жоффруа Сент-Илера (стремление к совершенствованию и влияние среды на развитие организма) и, наконец, Бронна (фактический ход морфологической эволюции). Именно на этот бронновский корень указывал еще И. И. Мечников, когда в 1869 г. излагал (впервые на русском языке) книгу Геккеля<sup>15</sup>. Бронн, естественно, не был одинок, и работы этого направления были тем культурным фоном, на котором только и могла быть начертана дарвиновская схема перехода из вида в вид: Дарвин потому мог не думать о конкретном ходе истории жизни, что ему как геологу было известно такое направление мысли. Это хорошо видно, например, при чтении геологической главы «Происхождения видов». Там, в частности, во всех изданиях есть скупая ссылка и на Бронна: «...как заметил Бронн, ни появление, ни исчезновение... вымерших видов не было одновременным в каждой отдельной формации»<sup>16</sup>. Тяжелый немецкий язык Бронна Дарвин понимал плохо<sup>17</sup>, поэтому неудивительно, что он не читал его подряд, а лишь заимствовал необходимые ему сведения — прежде всего, об изменчивости. С бронновским пониманием прогресса он ознакомился только в начале 1862 г. и высоко отозвался о нем в «Опылении орхидей» — книге, вышедшей в свет 15 мая 1862 г.

Бронн был тогда уже очень плох: он все чаще болел, все более слабел, а прогрессирующая глухота вынудила его почти отказаться от общения с людьми. Одинок и больной, он жил мыслью: завершить «Классы и отряды животного царства» — монументальный труд, которым он хотел

<sup>14</sup> Французский текст издан в «Comptes rendus Ac. Sci. Paris», Supplément, I. II (без года), а в 1861 г. — отдельной книгой. Немецкий вариант: Bronn H. G. Untersuchungen über die Entwicklungsgesetze der organischen Welt während der Bildungszeit unserer Erdoberfläche. Stuttgart, 1858.

<sup>15</sup> Мечников И. И. Академ. собр. соч. М., 1960, т. 4, с. 64—65, 89—90.

<sup>16</sup> The origin of species by Charles Darwin, p. 522.

<sup>17</sup> Это и последующие сведения почерпнуты, если не оговорено иное, из писем Дарвина; в настоящее время готовится их русское издание.

преобразить описательную зоологию. В те годы зоологию обычно рассматривали как систематику и описание видов, которое «на сколько бы страниц... ни растянулось, ничего в нем нет, кроме перечисления точек, углублений, бороздок... и т. п.; в самом конце описания прибавляется, чуть ли не из милости, что насекомое это водится там-то»<sup>18</sup>. А Бронн задумал охарактеризовать животных целиком — вплоть до социальной организации и хозяйственного значения — и писал, писал, писал, не разгибаясь и не щадя угасающего своего тела, пока 5 июля 1862 г. его не поразила внезапный паралич легких. «Погасла ярчайшая звезда на небосклоне немецкой науки»<sup>19</sup>. За последние 5 лет жизни Бронн подготовил, не считая «Исследований законов развития», четыре толстых книги, продолжал редактировать журнал и издавать небольшие работы, и все же нашел время для Дарвина. На бронновском столе остались: неоконченный том «Классов и отрядов» и законченный перевод «Орхидей». Естественно, были переведены и вставлены в новое издание «Происхождения видов» поправки, которые Дарвин послал Бронну 28 апреля. Таков был этот «типичный гелертер, чванливый и мелочный».

Дарвин назвал в «Орхидеях» бронновское понимание прогресса наиболее удачным, но в «Происхождении видов» никак этого не отразил. Почему? Если выражаться языком XX в., Дарвина интересовала эволюция как процесс конкуренции популяций, обладающих близкими экологическими требованиями, тогда как Бронна — законы эволюционной морфологии и эволюции биосферы (он, например, отметил, что пермотриасовое вымирание можно связать с похолоданием). О конкуренции он тоже писал, но только в одном аспекте: хуже приспособленные вымирают, и этим поддерживается баланс между достаточно приспособленными. Появление новых форм Бронн связывал не с конкуренцией, а с действием особой силы природы: «Та же сила, которая первоначально создала организмы... действовала в течение всей геологической истории, вплоть до появления человека. При этом нигде не обнаруживается постепенного превращения прежних видов в новые; наоборот, новые всюду возникают без участия прежних»<sup>20</sup>.

Не надо думать, что Бронн понимал эту силу как божественную волю — «силы» двигали природными процессами у всех натурфилософов, и Бронн, как бы ни критиковал их, пошел по их стопам и даже классифицировал «царства природы» по действующим в них «силам». Под «творческой силой» он понимал причину не только исторического, но и индивидуального развития; немецкий историк биологии В. Барон писал даже: «Ясно, что слово «творение» означает у Бронна не что иное, как новообразование»<sup>21</sup>, и прямо относил его к додарвиновским эволюционистам. Не заходя так далеко в отношении сознательного принятия Бронном эволюции, признаем все-таки, что фактически именно он первым описал **ход макроэволюции** в целом, тогда как Дарвин первым предложил **механизм микроэволюции**. В дальнейшем наука пошла по стопам обоих, но сам Бронн был забыт — одни его открытия были ассимилированы трудами Геккеля и его единомышленников, другие переоткрыты заново, третьи еще ждут своего часа.

Историков не раз удивляло: почему Бронн, зная и об изменчивости, и о вымирании худших вариантов, и об исторической изменчивости форм, не соединил все это сам в эволюционную концепцию? Просто не догадался? Но тогда почему он не примкнул к дарвинизму, когда тот появился? Если же учение Дарвина его в принципе не удовлетворяло, то зачем он до последних дней жизни пропагандировал его своими переводами? Для ответа надо постараться взглянуть на труд Дарвина глазами немецкого натурфилософа. Легко увидеть тогда, что книга Дарвина предлагала ему новую «силу» — ту самую, которой не хватало для завершения эволюционной картины мира. И указал явным образом на эту «силу» другой геолог, друг Дарвина, знаменитый Лайель. После этого уже не покажется удивительным, что Бронна так увлекла книга Дарвина, которую он считал слабой морфологически и палеонтологически: Бронну были важны не беглые макроэволюционные замечания Дарвина, а его микроэволюционный механизм.

## БРОНН И «ПРОИСХОЖДЕНИЕ ВИДОВ»

Случилось так, что первое в русской печати сообщение об учении Дарвина бы-

<sup>18</sup> Арнольд Н. Гелертерство и практика. — Время, 1862, июль, с. 79.

<sup>19</sup> Allgemeine deutsche Biographie. Leipzig, 1976. Bd. 3. S. 360.

<sup>20</sup> Bronn H. G. Untersuchungen über die Entwicklungsgesetze..., S. 80.

<sup>21</sup> Baron W. — Sudhoffs Archiv, 1961, Bd. 45, Hf. 2, S. 108.

ло и первым разбором «эволюционной» позиции Бронна. Молодой зоолог Н. Н. Страхов отметил речь Лайеля, где тот говорил (в сентябре 1859 г.) о будущей книге Дарвина: Дарвин «приходит к тому заключению, что силы природы, производящие племена и постоянные разновидности животных и растений, суть те самые силы, которые в течение более длительных периодов производят виды и наконец... роды»<sup>22</sup>. Страхов верно заметил, что здесь, как и у Бронна, эволюция понимается через действие некоторой гипотетической силы; он привел соответствующее место из Бронна, где тот формулировал логическую альтернативу — либо непрерывное творение, либо естественное развитие под действием неведомой силы, раз навсегда определенной гармонические отношения в природе. «Такому решению, — заявил Страхов, — нельзя не подивиться... Почему эта совершенно неизвестная нам сила несовместима с перерождением видов, с учением, принимаемым Дарвином?» Для Страхова было несомненно, что «Бронн злоупотребляет в настоящем случае ученым словом сила» и формальной логикой: «Он говорит, что возможны только два предположения, и выбирает лучшее. К сожалению, он не доказывает, действительно ли никакие другие предположения невозможны: тогда как... невозможно принять ни одного»<sup>23</sup>. Натурфилософский формализм действительно портил воззрения Бронна, но все же Бронн, прочтя Дарвина, нашел, что «перерождение видов» вполне совместимо с его, Бронна, взглядами — если в качестве «неведомой силы» рассмотреть неопределенную изменчивость, носители которой подвержены конкуренции. В этом плане он был готов принять дарвинизм, но, как и других морфологов, его останавливало одно общее возражение: откуда следует, что с помощью этой изменчивости можно перейти от одного типа организации к другому? А как палеонтолога его останавливало другое возражение: если даже такой переход возможен, то почему мы не видим ничего подобного в палеонтологической летописи? Дарвиновский ответ (апелляцию к неполноте летописи)

Бронн считал для многих групп незаконным, в этом ему вторили другие ведущие палеонтологи мира, так что назвать его возражения наивными трудно.

Нам, однако, важнее другое: как раз в то время, когда писал Страхов, Бронн менял свои взгляды<sup>24</sup>, что на склоне лет дано немногим. Он отмечал, что домашние животные фактически дают примеры видообразования<sup>25</sup> и даже соглашался признать, что в середине Азии находилась колыбель всего человеческого рода, если таковой произошел от единственной пары<sup>26</sup>. Это означало признание микроэволюции, и недаром в январе 1860 г. он уже писал Дарвину, что несколько поколеблен теорией естественного отбора и что сам высказывал раньше нечто подобное.

Трудно теперь сказать, где и как Бронн действительно высказывал это: даже его современники часто понимали его замысловатые теоретические построения не так, как он того хотел. К счастью, это не так уж важно, поскольку до Дарвина об эволюции писало более 200 авторов. Нам достаточно того, что 1 марта 1860 г. появился проспект немецкого перевода «Происхождения видов», где мы тоже видим бронновскую мысль. Повторив тот тезис критиков Дарвина (уже высказанный к тому времени в печати), что «все-таки нужны были особенные акты творения, чтобы создать полдюжины основных форм, требуемых Дарвином», проспект заключал: поскольку начало жизни не объяснено, «то можно заранее предсказать, что весь сбор естествоиспытателей разделится на две партии — верящих и неверящих, и между ними начнется борьба противоположных доводов», что «будет весьма плодотворно для науки»<sup>27</sup>. Подобные фразы произносят многие, но лишь у немногих хватает сил проводить их в жизнь так, как это делал Бронн. Оставшись при той мысли, что теория эволюции, не объясняющая происхождения жизни из неживого, вряд ли может быть верна, и чувствуя уже естественнонаучную несостоятельность своей прежней позиции непрерывных творений, он оставался верен ей из чисто методических соображений. Так, в послесловии к немецкому изданию «Происжде-

<sup>22</sup> Страхов Н. Н. — Ж. Мин-ва нар. просвещ., 1860, янв., отд. VII, с. 5—6.

<sup>23</sup> Там же, с. 8—9. О Страхове см.: Гаврюшин Н. К. Мир как целое. Н. Н. Страхов о развитии естествознания. — Природа, 1982, № 7, с. 100.

<sup>24</sup> Это можно выяснить, сравнивая его публикации месяц за месяцем.

<sup>25</sup> Bronn H. G. Über den Stufengang des organischen Lebens... Stuttgart, 1860, S. 6.

<sup>26</sup> Neues Jahrbuch für Mineralogie... 1860, S. 112. (Напомним, что журнал редактировал Бронн.)

<sup>27</sup> Горный ж. 1863, ч. 1, с. 202.

ния видов» Бронн пишет: «...нам кажется по меньшей мере более последовательным оставаться при старой точке зрения, пусть и несостоятельной естественноисторически, в ожидании того, что именно за счет столкновения мнений будет развита ясная и зрелая теория, которая будет устойчивой» (§. 520). Бронн как бы сам готовил себе забвение, забываясь не о своем имени, а о пользе науки.

Дарвин просил Бронна снабдить перевод комментариями (хотя и знал, что они будут достаточно суровыми), что тот и сделал — как в форме подстрочных примечаний, так и в «Заключительном слове переводчика». Эта критика обойдена вниманием: даже внимательные исследователи не шли дальше разбора отдельных бронновских возражений Дарвину. Мы не можем здесь перечислить их и ограничимся тем общим выводом, какой был сделан в первом русском учебнике, излагавшем учение Дарвина: «Приведем в заключение мнение известного ученого, Бронна, который до появления в свет теории Дарвина стоял на стороне постоянства и самостоятельности видов... Идея Дарвина, говорит Бронн, есть, может быть, семя, из которого постепенно разовьется истина и откроется давно отыскиваемый закон природы»<sup>28</sup>. Такая фраза у Бронна есть, но важнее, что современник, достаточно критически относившийся к дарвинизму, счел это место резюмирующим позицию Бронна.

Нам остается добавить, что критика была у Бронна обстоятельна и корректна, даже в тех местах, где она резка фактически. Даже тот вывод, что дарвиновское допущение (о возможности образования любых новшеств путем обычной изменчивости) находится «вне рамок научной логики», он связывал с незавершенностью новой теории (§. 498—499). Лишь в отдельных кратких замечаниях свозили едва заметные колкости. Например, у Дарвина в ранних изданиях говорилось, что уродливые отростки у некоторых голубиных и куриных нельзя объяснить отбором, так как их «мы не можем считать ни полезными в борьбе, ни привлекательными для самок». Это место Бронн комментировал: «Но как можем мы судить, что у жениха привлекательно в глазах курицы или горлицы!» (§. 95). А в своей последней книге, приводя пример повторного появления у ископаемых плеченогих одной и той же видовой формы (позже такие примеры не раз

служили номогенетикам в качестве «опровержения» идеи господства неопределенной изменчивости), Бронн закончил неожиданной иронической репликой: «Здесь теория Дарвина могла бы черпать свои аргументы»<sup>29</sup>.

Нам, однако, надо выяснить, что Бронн мог сказать об эволюции положительного.

## БРОНН, ДАРВИН И НАШИ ДНИ

Критикуя книгу Бронна за введение неведомой натурфилософской силы, Страхов писал: «Замечательно однако ж понятие, даваемое Бронном, об его неведомой силе. Она должна находиться в теснейшей зависимости от сил, производящих геологические явления», и «таким образом земной шар сам превращается в организм...»<sup>30</sup>. Сейчас, через век с четвертью, когда утвердилось понятие о биосфере как единой термодинамической системе, мысли Бронна выглядят куда более научно, чем выглядели при его жизни. Нам легче, чем современникам Дарвина, понять, почему, приписав учению Дарвина частный характер, Бронн перешел в «Заключительном слове» к описанию глобальных процессов. Как Страхов упрекал его в формализме, так и Бронн упрекал Дарвина: когда выходишь за рамки книги и смотришь на реальную природу, вопрос о применимости дарвиновской теории оказывается не так прост (§. 501).

Если говорить современным языком, то Бронн отмечал неизбежность радикальных системных преобразований — в рамках как организма, так и экосистемы и биосферы. В радикальных изменениях организма он видел следствие перестроек эмбрионального развития, экосистемные отношения далеко не сводились для него к конкуренции, а изменения флор и фаун он связывал с ходом геологических процессов (§. 499—500). Этим он коротко повторил свои прежние выводы, но уже не акцентируя внимания на непрерывном творении. Акцент же он делал на том, что у Дарвина было едва затронуто — на закономерностях макроэволюции.

В наше время можно уверенно сказать, что главная задача, стоявшая перед Дарвином, выполнена: преобразование ви-

<sup>28</sup> Леваковский И. Ф. Курс геологии. Харьков, 1862, вып. 2, с. 302.

<sup>29</sup> Bronn H. G. Klassen und Ordnungen des Thier-Reichs. Leipzig, 1862, Bd. 3, Abth. 1, S. 313.

<sup>30</sup> Страхов Н. Н. Цит. соч., с. 8—9.

дов естественным путем общепризнанно, и учение Бронна, опубликованное им в 1858 г., отвергнуто. Вторая задача Дарвина — показать значение и место естественного отбора — до сих пор является предметом изысканий огромного числа биологов, поэтому любые принципиальные соображения на этот счет сохраняют актуальность. И мы с изумлением видим, что одно из самых ясных соображений высказал тот же Бронн, формулируя два своих «основных закона». Во-первых, «различные организмы следовали во времени и пространстве во стольких типах и в таких численностях, какие соответствовали внешним условиям»<sup>31</sup> и, во-вторых, «существует положительный и независимый закон творения, даваемый нам в простоте и упорядоченности всех, как одновременных, так и последовательных модификаций органического мира»<sup>32</sup>. Подчеркнутое Бронном слово очень характерно: еще до появления дарвинизма он выступал против идеи выводить «упорядоченность» из одних внешних воздействий (позже на то же указывал и Дарвин). О первом (приспособительном) законе Бронн писал: «Рассматриваемый как негативный, этот закон абсолютен и не допускает никаких исключений, но рассматриваемый как позитивный, он допускает к игре и другие законы, как подчиненные, так и независимые от него»<sup>33</sup>.

В этих словах — ключ ко всем последующим дискуссиям о роли естественного отбора: как негативный фактор отбор абсолютен и бесспорен (неспособное жить не живет), но его позитивную роль можно понять и оценить только тогда, когда выяснены другие позитивные законы (поставляющие для отбора материал). Этот материал должен соответствовать законам морфологии — так полагали и Бронн и Дарвин, но для Дарвина этот факт не налагал никакого ограничения на изменчивость, Бронн же был уверен, что изменчивость не может нарушить «план организации». Этот барьер преодолеть в его системе было нечем, отсюда и его апелляция к «непрерывному творению», но фактически, как мы сейчас видим, речь у него шла о законах формообразования.

Восторженный поклонник Гегеля, Страхов отверг Бронна потому, что не увидел у него диалектики, но ее увидел научный писатель О. Ложель, вскоре ставший

пропагандистом дарвинизма во Франции; он писал о двух основных законах Бронна: «Можно усмотреть в этом решении приложение великого принципа противоречий, данного гегелевской философией», что дает возможность Бронну увидеть общие закономерности там, где другие видят только хаос»<sup>34</sup>.

Тем самым Ложель первым отметил тот диалектический подход, который был необходим для рождения научного эволюционизма и который впервые осуществлен Бронном: живое обязано адаптироваться ко всем требованиям среды, но это — активный процесс, а не то пассивное движение под действием внешних условий, которое допускали ранние эволюционисты бюфоновского направления. В этом — огромная заслуга Бронна.

Что касается главной эволюционной задачи наших дней, то она видится в указании конкретных возможных путей преобразования видов и экосистем. Мы воочию видим эволюцию микробов, насекомых-вредителей и т. п., видим распад некоторых экосистем, но очень мало можем сказать о будущих путях этих процессов или об управлении ими. Эти задачи подчас оказываются достаточно близки идеям Бронна. Конечно, микробы совсем лишены территориальной тенденции, но вот членистоногие — группа в высшей степени террипетная, и недаром заметная морфологическая эволюция в условиях эксперимента обнаружена именно здесь<sup>35</sup>. Все, что касается морфологической эволюции, вряд ли может стать объектом планирования без учета подобных тенденций. Да и относительно микробов бронновский подход наводит на мысли, которые с иных позиций вряд ли пришли бы в голову: надо искать общие тенденции, проявляемые разнообразием микроорганизмов, тенденции, аналогичные тем, которые на высших организмах искал и находил Бронн.

Поэтому позволим себе закончить словами из уже цитированной рецензии Лаврова. Несмотря на полный восторг от самой книги Дарвина, он счел, что немецкое ее издание «имеет интерес новой книги, заставляющей его чуть ли не предпочесть оригинальному изданию».

<sup>31</sup> Bronn H. G. Untersuchungen über die Entwicklungsgesetze..., S. 483.

<sup>32</sup> Ibid., S. 487.

<sup>33</sup> Ibid., S. 499—500.

<sup>34</sup> Laugel A.— Revue germanique, 1859, t. 8 (Octobre), p. 121.

<sup>35</sup> Шапошников Г. Х. Эволюция тлей в связи со специализацией и сменой хозяев. Докт. дисс. Л., 1967.

## Палеонтология

## Как предки китов начали завоевывать море

К. Н. Несис,  
кандидат биологических наук  
Москва

Первые китообразные появились в эоцене. Их предками были примитивные наземные хищники нижнего палеогена. Однако киты, какими мы видим их сегодня — усатые и зубатые киты, — возникли значительно позднее, приблизительно 30 млн лет назад, в среднем олигоцене. Самые первые этапы эволюции китообразных до сих пор плохо изучены. Недавно открыто самое древнее и самое примитивное китообразное животное, еще вовсе не похожее на кита, но уже сделавшее «первый шаг в воду». Это животное было найдено в Пакистане и получило имя пакицетус (*Pakicetus inachus*).

Обломки черепа и отдельные зубы пакицетуса обнаружены вблизи деревни Чорлакки недалеко от г. Кохат в Северо-Западной Пограничной провинции, в нижней части раннеэоценовой формации Кулдана (возраст около 50 млн лет) и изучены Ф. Д. Джинджеричем и Н. А. Уэллсом из Мичиганского университета, Д. Э. Расселом из Парижского национального музея естественной истории и пакистанским геологом С. Ибрагим-Шахом<sup>1</sup>. Вместе с пакицетусом были



Гипотетическая реконструкция *Pakicetus inachus*, самого древнего и примитивного китообразного из нижнего эоцена Пакистана.

найжены остатки более чем 20 видов млекопитающих — грызунов, парно- и непарнокопытных, хоботных, креодонтов, рукокрылых, приматов и др., а также черепах, крокодилов, рыб (сомов и др.), моллюсков, похожих на пресноводных катушек. Это однозначно говорит не о морском, а о пресноводном и наземном характере вмещающих их отложений.

Пакицетус, несколько можно судить по найденным костям черепа и зубам, был размером с тюленя — длина тела 180—240 см, вес около

150 кг<sup>2</sup>. Череп его для такого зверя невелик — всего 30—35 см в длину, мал был и мозг. Очень оригинальны зубы: передние — узкие, конические, средние — широкие треугольные, слегка зазубренные, а задние — двух- и трехвершинные. Такое строение — своеобразное сочетание зубов «волка» и «какулы» — свойственно древнейшим китообразным (*Archaeoceti*) — хищным или рыбадным животным, но в то же время имеет сходство и с зубами мезонихид — хищных наземных животных, относящихся, однако, к отряду кондилартр, древних ко-

<sup>1</sup> Gingerich P. D., Wells N. A., Russell D. E., Ibrahim Shah S. M. — Science, 1983, v. 220, № 4595, p. 403; Gingerich P. D., Russell D. E. — Contribs. Mus. Paleontol. Univ. Michigan, 1981, v. 25, p. 235.

<sup>2</sup> New Scientist, 1983, v. 98, № 1358, p. 454.

пытных, которых многие ученые рассматривают как «кандидатов» на роль предков китов. Хорошо сохранившаяся задняя часть черепа пакицетуса позволила установить, что его слуховой аппарат был ближе к механизму слуха наземных млекопитающих, чем даже примитивных китообразных. Пакицетус мог немного слышать под водой, но не был способен ни излучать направленный звук, ни определять с достаточной точностью, откуда звук приходит, т. е. не мог находить добычу с помощью эхолокации.

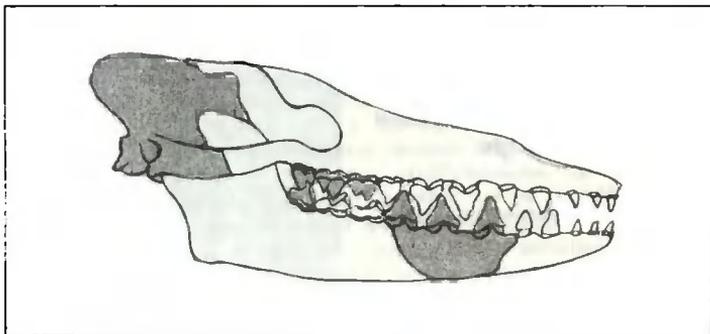
По форме тела пакицетус, вероятно, немного напоминал выдру, но пасть у него была вовсе не выдриная. В воде он, очевидно, проводил значительную часть времени и питался рыбой, но спаривание и рождение детенышей происходили на суше. Иными словами, он вел амфибиотический образ жизни.

В начале эоцена территория нынешнего Пакистана представляла собой восточное побережье замыкающего океана Тетис. Параллельно шву между сталкивающимися Евразийской и Индостанской тектоническими плитами протягивались длинные цепочки узких, замкнутых, мелководных соленых лагун с ограниченной циркуляцией вод. Их берега были окаймлены плоскими солончаками. Между гигантскими сталкивающимися плитами помещалось множество обломков — микроплит, поэтому береговая линия океана была сильно изрезанной и мелководья занимали обширные пространства. Эти мелководные лагуны и краевые моря кишели планктоном и рыбой, особенно сельдеобразными. Были там и крупные хищные рыбы. Все в целом несколько напоминало нынешний северный Каспий. Вот в такой обстановке и проходили самые первые стадии эволюции китообразных, которые опускались в море, чтобы питаться на мелководье приповерхностными планктоноядными сельдевыми и, вероятно, хищными рыбами.

Дальнейшие стадии эволюции китообразных происходили уже в совершенно другой обстановке<sup>1</sup>. В эоцене и олигоцене интенсифицировалась океанская циркуляция, усилились

пассаты, развились ветровые апвеллинги — зоны подъема к поверхности богатых биогенными элементами глубинных вод. В прибрежных апвеллингах над шельфом и материковым склоном сосредоточивались круп-

кий нектон<sup>1</sup>. Головоногие моллюски (кальмары) начали эволюционный путь становления нектонного типа жизненных форм с первой, бентосной стадии; хрящевые и костистые рыбы, морские пресмыкающие-



Реконструкция черепа пакицетуса [обнаруженные части черепа закрашены]. Фото из: Science, 1983, v. 220, № 4595.

нейшие скопления зоопланктона, планктоноядных рыб, а дальше от берега — хищных рыб и кальмаров. По-видимому, именно там происходили первичные процессы адаптивной радиации морских млекопитающих, сформировались два принципиально разных типа питания — тип фильтраторов (нынешние усатые киты) и тип хватателей (зубатые киты — дельфины), развился аппарат эхолокации и адаптации к спариванию, рождению и выкармливанию детенышей в водной среде, сделавшие китов независимыми от суши. Происходили эти процессы, вероятно, на протяжении олигоцена и миоцена.

Современные представления об эволюционной истории нектона (активно плавающих животных) показывают, что нектонные животные проходили 4 стадии эволюции: прибрежный (шельфовый) бентос; неритический (надшельфовый) нектонбентос; нерито-океанский (надсклоновый) нектон; океаничес-

ся (современные и вымершие) и, видимо, ластрогие — со второй; китообразные же прошли вторую стадию очень быстро и практически начали с третьей. Пакицетус — именно вторая, кратковременная и переходная прибрежно-шельфовая стадия эволюции китообразных. Настоящие китообразные сформировались уже в открытом море над шельфом, склоном и ближайшими к берегу глубоководными районами.

#### Биология

### Гармония или адаптивность?

В. М. Карцев

Москва

Удивительно тонкие и целесообразные приспособления к условиям обитания, выработанные у разных видов в результате длительного действия естественного отбора (например, взаимоотношения цветковых

<sup>1</sup> Lipps J. H., Mitchell E. — Palaeobiology, 1976, v. 2, p. 147.

<sup>2</sup> Подробнее см.: Невис К. Н. — Ж. общ. биол., 1978, т. 39, № 1, с. 53.

растений и опылителей), порой вызывают у наблюдателя представления, будто та или иная биологическая система организована наилучшим из возможных способов. Между тем многие реально существующие признаки животных и человека являются не следствием отбора именно в данном направлении, но как бы «бесплатным приложением» к другим, действительно значимым и отбиравшимся признакам<sup>1</sup>. Кроме того, в каждом случае отбор действует по нескольким направлениям, а условия существования подвержены изменениям. Следовательно, априорно ясно, что некоторые признаки должны быть не только не оптимальными, но даже и не адаптивными. Но можно ли говорить об оптимальности организации каких-то отдельных функциональных механизмов? Этот вопрос рассматривает зоолог Б. Хайрих применительно к теории оптимального фуражирования, которая разрабатывается на примере шмелей Г. Пайком<sup>2</sup>.

К своей идее Пайк пришел после того, как ознакомился с результатами некоторых биологических экспериментов, в которых было обнаружено, что по вертикальному соцветию шмель-фуражир продвигается преимущественно снизу вверх. Учитывая, что у выбранного растения содержание нектара в цветках снизу вверх убывало, Пайк математически рассчитал оптимальный — с учетом притока энергии в гнездо (чистый приток: энергия, запасенная в норме, минус энергия, потраченная на его добывание) — способ сбора нектара, и оказалось, что шмель поступает наилучшим образом. Затем, лично проверив свою модель в поле, опять на растении, нектар в соцветиях которого снизу вверх убывает, Пайк заключил, что



шмель на соцветии. Экспериментально установлено, что характер передвижения по соцветию зависит от числа цветков в нем: когда цветков порядка сотни, правило двигаться снизу вверх — что обычно для соцветий с 3—6 цветками — вообще не соблюдается.

шмели являются оптимальными фуражирами.

Однако дальнейшие эксперименты с искусственными соцветиями, а также с растением, у которого содержание нектара снизу вверх не убывает, а возрастает, показали, что шмели двигаются снизу вверх всегда, независимо от того, оптимально это или нет. Таким образом, при изучении поведения шмелей гораздо важнее, как отмечает Хайрих, не предложить математическую формулу, в которую укладывались бы уже известные биологи явления, но суметь докопаться до конкретных механизмов этих явлений.

Действительно, направление движения фуражира можно объяснить не только с позиции учета притока энергии, но более простыми причинами: цветки висят на ножках венчиками вниз, поэтому в них легче

проникать снизу; проникая в цветок снизу, шмель сохраняет то направление, куда обращена его голова, к тому же он не возвращается на уже опустошенные цветки; особенности шмелиного зрения, по-видимому, облегчают этому насекомому распознавание цветка дорзальной частью глаза. Поведение шмелей при этом хотя и не обязательно оптимально в отношении притока энергии, зато достаточно адаптивно, чтобы они могли безбедно существовать.

И тем не менее, считает Хайрих, теория оптимального фуражирования имеет право на существование. Но только не как теория, а как метод познания. Во-первых, подобно другим математическим моделям, она ставит такие требующие биологических экспериментов вопросы, которые не возникли бы при простом наблюдении за жизнью изучаемых животных. Во-вторых, наряду с биологическим подходом в узком смысле этого слова, когда исследователь отвечает на вопрос «как?», теория оптимального фуражирования представляет другую сторону научного познания, затрагивающую вопрос «зачем?»

<sup>1</sup> Подробнее этот вопрос рассмотрен в кн.: Панов Е. Н. Поведение животных и эволюционная структура популяции. М., 1983, с. 18.

<sup>2</sup> Heinrich B.— Amer. Zool., 1983, v. 23, № 2, p. 273; Pyke G. H., *Oecologia* (Berl.), 1978, № 36, p. 281.

в эволюционном плане. Хотя на первый вопрос отвечает большинство работ, а правомерность второго вопроса вообще ставится под сомнение (можем ли мы оценивать преимущества какого-то признака в поколениях, если продолжительность жизни не позволяет провести соответствующего эксперимента?), в каждом биологическом исследовании в более или менее явной форме присутствуют оба этих вопроса.

Обратимся к отечественным опытам по изучению поведения насекомых на цветах, которые проводились параллельно с упоминавшимися работами и независимо от них<sup>3</sup>. Первоочередная наша цель состояла в выяснении конкретных механизмов поиска нектара. Но уже сама постановка первого вопроса: случайно или не случайно, например медоносная пчела, перелетает с цветка на цветок? — так или иначе предполагала оценку пчелиного поведения с точки зрения его целесообразности.

В опытах использовались кормушки — модели цветков, которые, в отличие от предыдущих работ, мы располагали в одной плоскости — в пределах столика 40×40 см. В маленькие стаканчики капли сиропа наливали с таким расчетом, что фуражиру для насыщения (т. е. чтобы заполнить зоб сиропом перед очередным возвращением в гнездо) необходимо было облетать если и не десятки, как это бывает с настоящими цветами, то хотя бы несколько отдельных кормушек, точнее, четыре. Пока фуражир летал в гнездо, сироп доливали. Оказалось, что сперва пчелы (а также общественные осы) опускались на кормушки случайно. Но через некоторое время они начинали обучаться, т. е. статистически достоверно предпочитали более рациональные (как с точки зрения траты собственных сил, так и с точки зрения притока энергии в гнездо) пути облета, которые исклю-



Оса, достающая сироп из искусственного цветка (два белых пятна по краям спикии — ее индивидуальная метка).

чали возвращение на уже опустошенные кормушки.

Но еще интереснее было проследить, как врожденные правила поиска сочетались с обучением, формируя итоговый способ поведения. Например, когда кормушки расположили в одну линию по диагонали столика, пчелы и осы научились облетать их подряд, начиная с крайней. Когда же две кормушки (каждая содержала половину порции, необходимой фуражиру для насыщения) расположили среди двух таких же кормушек с раствором соли, неотличимым для данных насекомых ни по виду, ни по запаху, то пчелы не только не запомнили положения двух искомых кормушек с сиропом, а, напротив, пробовали противную для них соль чаще, чем это могло быть при случайном выборе. Хотя в иных ситуациях пчелы способны запомнить не менее четырех объектов, в данном случае правило: «руководствоваться внешним видом объекта (цветка); выбирать ближайший объект данного вида» — вступило в противоречие с реальной задачей. Но, даже попадая закономерно в соль, пчелы в итоге каждый раз собирали нужную

им порцию сиропа, а потому, вероятно, и «сочли» свое поведение достаточно адаптивным. Шмели, как мы видели выше, тоже не захотели или не смогли отказаться от привычки двигаться снизу вверх, когда рациональнее было бы двигаться сверху вниз.

Интересно, однако, что осы, в отличие от пчел, научились выбирать кормушки с сиропом, минуя кормушки с солью. Этот факт легко объяснить тем, что осы в поисках пищи не только посещают цветы, но еще и охотятся за живой добычей и отгрызают кусочки свежей падали. Таким образом, ситуации, в которых оказываются осы при добывании корма, более разнообразны, поэтому в их поведении врожденные правила поиска (качественно такие же, как и у пчел) имеют меньший удельный вес и больше развита способность обучаться.

Как только этолог начинает задумываться о биологическом смысле открытых им механизмов поведения, он подходит к проблемам, подобным тем, которые рассматривает теория оптимального фуражирования. Однако, в отличие от исследователя, начинающего с конструирования математической модели, он никогда не забудет, что, говоря об адаптивности, приспособленности, всегда следует задумываться над тем, к чему приспособленность, а о гармонии — с чем гармония.

<sup>3</sup> Мазохин-Поршняков Г. А., Карцев В. М. — Зоол. ж., 1979, т. 58, № 9, с. 1281.

## Астрофизика

**Первые результаты астрофизической станции «Астрон»**

За 8 месяцев работы ультрафиолетового телескопа на борту «Астроны»<sup>1</sup> было выполнено более 110 наблюдений звезд различных спектральных типов и классов светимости, галактик и других космических объектов. Группа советских и французских исследователей сообщила о первых предварительных результатах.

Определялась скорость истечения звездного вещества для четырех звезд:  $\chi^2$  Ori,  $\rho$  Leo,  $\tau$  Sco, BS 6245. Анализ данных позволил заключить, что скорости истечения вещества разные, если определять их по линиям разных ионов; чем больше потенциал ионизации иона, тем больше скорость истечения, причем для одной и той же звезды скорость истечения тем больше, чем горячей звезда, чем выше ее светимость. В разных местах оболочки скорости истечения разные.

Для ряда Ar-звезд были проведены поиски свинца. Установлено, что 80 % устойчивых изотопов свинца являются продуктами радиоактивного распада тория и урана, а 20 % образуются от распада актиния. Если по количеству свинца будет определено содержание тория и урана, станет возможным оценить возраст звезд «геохимическим» способом.

В спектрах восьми Ar-звезд была зарегистрирована интенсивная линия свинца  $\lambda=2203,53$  А. Предварительная обработка спектра одной из этих звезд —  $\chi$  Sps, показала, что содержание свинца в ней, вероятно, почти в 100 раз превосходит солнечное.

Проводилось наблюдение карликовой новой RX And. Одновременно за этой звездой следил телескоп Крымской астрофизической обсерватории АН СССР. Как оказалось, наблюдаемое распределение энергии в спектре звезды нельзя представить одной планковской кривой, что говорит о наличии не одного, а по крайней мере двух источников с разной температурой.

К концу 1983 г. были проведены ультрафиолетовые наблюдения 17 галактик различных морфологических типов и спектральных классов. Радиогалактика Дева А наблюдалась трижды, и один раз одновременно ее наблюдали в рентгеновском диапазоне.

Были проведены исследования распределения энергии от объектов в области длин волн короче 2000 А. Оказалось, что рост ультрафиолетового потока в этой области наблюдается не всегда. Например, у галактики NGC 3664 раннего спектрального класса (А), в состав которой входит много горячих звезд, этот поток действительно растет в области длин волн короче 2000 А. А у более поздней по спектральному классу (F) галактики NGC 4679 наблюдается более крутой спад энергии с уменьшением длины волны в области 3000 А и сравнительно пологое распределение энергии в области 2000 А. Таким образом, рост ультрафиолетового потока в области длин волн короче 2000 А, по-видимому, зависит от спектрального класса галактики.

Письма в *Астрономический журнал*, 1984, т. 10, № 3, с. 163—175.

## Астрофизика

**Квазары с большим красным смещением**

Существуют ли квазары с красным смещением (Z) больше 3,78? Возможно, такие квазары

имеются, считают астрофизики, но они столь удалены, что их невозможно наблюдать из-за слабой светимости.

Напомним, что, по современным представлениям, квазары (квазизвездные источники радиоизлучения) представляют собой активные ядра далеких галактик. В 1963 г. М. Шмидт (M. Schmidt; Паломарская обсерватория, США) предположил, что линии в спектрах квазаров — это линии известных элементов, но сильно смещенные в сторону длинных волн (эффект красного смещения).

Красные смещения объектов являются следствием расширения Вселенной. Наиболее удаленные квазары должны характеризоваться предельно большими величинами красного смещения.

Ранее было установлено, что с ростом Z число соответствующих квазаров растет. Однако за пределами  $Z=3$ , отвечающего расстоянию 12 млрд световых лет, был обнаружен спад числа квазаров. Завершает эту последовательность единственный квазар с максимальным красным смещением  $Z=3,78$ , отвечающим расстоянию 13 млрд световых лет.

Две группы астрофизиков попытались обнаружить еще более далекие квазары. Одна из них во главе со Шмидтом проводила наблюдения на большом телескопе Паломарской обсерватории. Вторая группа во главе с Д. Ку и Б. Кроном (D. Ku, B. Kron) использовала для наблюдений 4-метровый телескоп обсерватории Китт-Пик (Аризона, США). Статистика предыдущих измерений с менее светосильными телескопами свидетельствовала о том, что обе группы должны обнаружить несколько квазаров с красным смещением, превышающим  $Z=3,7$ .

Однако ни одной из групп не удалось найти квазаров с таким красным смещением. Вместо этого они зарегистрировали новые слабосветящиеся квазары, обладающие сравнительно низ-

<sup>1</sup> Никитин С. А. Автоматическая станция «Астрон». — *Природа*, 1983, № 7, с. 100.

кими величинами красного смещения. Шмидт охарактеризовал эти результаты, как «большой сюрприз».

Определив удаленность вновь обнаруженных квазаров по их красным смещениям и вычислив соответствующие времена разлета, авторы установили, что квазары стали появляться спустя 1,5 млрд лет после «Большого взрыва».

New Scientist, 1983, v. 99, № 1368, p. 267 (Великобритания).

#### Астрофизика

### Прекратил излучать рентгеновский источник в созвездии Лебеда

Не успело затихнуть волнение по поводу обнаруженного рентгеновским спутником «Экзосат» «выключения» в рентгеновском диапазоне знаменитого источника Геркулес X-1, как этот спутник сообщил о «выключении» еще одного рентгеновского источника — 4U 2129 + 47 в созвездии Лебеда. Оба рентгеновских источника — похожие объекты, по всей вероятности, они представляют собой нейтронные звезды, находящиеся в паре с нормальной звездой небольшой массы ( $< 2M_{\odot}$ ). Поскольку оптическая светимость этих нормальных звезд значительно меньше рентгеновской светимости нейтронных звезд, рентгеновское излучение, падающее на нормальную звезду и переизлучаемое ею, приводит к сильным периодическим изменениям ее оптического блеска (эффект отражения). Период этих изменений блеска равен орбитальному периоду обращения звезд в двойной системе: в Геркулесе — 1,7 дня и 5,2 — в Лебеде.

В источнике Геркулес X-1 излучение прекратилось только в рентгеновском диапазоне, а эффект отражения продолжает наблюдаться почти на

прежнем уровне, т. е. собственная рентгеновская светимость источника осталась почти прежней, просто по какой-то причине рентгеновский поток не попадает на Землю. А вот источник 4U 2129 + 47 «выключился» полностью: наряду с прекращением рентгеновского излучения исчез также и эффект отражения, что было установлено наблюдениями нормальной звезды V1727 Лебеда с помощью 2,2- и 1,2-метровых телескопов астрономического центра в Калар-Альто (Испания). Как оказалось, V1727 Лебеда имеет сейчас низкую интенсивность оптического излучения и амплитуда переменности не превышает  $\pm 0,3$  звездной величины. Ранее, когда еще наблюдался рентгеновский поток от этой системы, оптическая яркость звезды была в 4 раза выше. Отметим, что аналогичное исчезновение (на несколько лет) эффекта отражения у нормальной звезды в Геркулесе наблюдалось в 30-х и 40-х годах, что выяснилось при анализе пластинок Гарвардской (США) и Зонненбергской (ГДР) обсерваторий.

Двойная звездная система в Лебеде (4U 2129 + 47 — V1727 Cyg) по своим свойствам и происходящим в ней физическим процессам не менее интересна, чем аналогичная звездная система в Геркулесе (Her X-1 — HZ Her). Однако из-за того, что ее оптическая яркость и рентгеновский поток значительно слабее, исследована она сравнительно мало (как в рентгеновском, так и в оптическом диапазоне). Безусловно, теперь, после новых результатов «Экзосата», эту систему следует изучать более подробно.

Телеграмма Международного астрономического союза, 1983, № 3887.

#### Астрономия

### Третья солнечная система<sup>1</sup>

Астрономы Х. Оман (H. Omann) и Ф. Жиллет (F. Gillet), изучавшие данные американско-англо-голландского спутника «ИРАС», пришли к выводу, что вокруг звезды Фомальгаут обращаются неизвест-

ные небесные тела, состоящие из холодной, твердой материи.

Фомальгаут — восемнадцатая по яркости звезда; ее можно наблюдать невооруженным глазом в небе Южного полушария. Существование планетной системы ставит звезду Фомальгаут в один ряд с нашим Солнцем и увеличивает шансы обнаружить жизнь вне Земли.

Несколькими месяцами раньше та же группа ученых, исследовав спектры излучения пятидесяти звезд, сообщила о существовании планетной системы у звезды Вега<sup>1</sup>. Подтверждения от других специалистов пока не поступило.

Обработка всего объема данных, полученных от «ИРАС», займет, вероятно, еще около 10 лет.

New Scientist, 1983, v. 100, № 1389/1390, p. 869 (Великобритания).

#### Астрономия

### Одинокая молодая звезда

Шотландские астрономы М. Брюк и П. Годвин (M. Brück, P. Godwin), исследуя одно из плотных газово-пылевых облаков, так называемых глобул, обнаружили в нем молодую звезду, окруженную плотным пылевым диском. Судя по всему, эта звезда недавно сформировалась в центре глобулы.

Компактные холодные облака межзвездного газа, почти полностью непрозрачные для оптического излучения, впервые были описаны около 40 лет назад американским астрономом Б. Бокком и названы им глобулами. Одну из таких глобул, расположенную в созвездии Кентавра на расстоянии 1 кпк от Солнца, и исследовали Брюк и Годвин в оптическом и инфракрасном диапазонах. Глобула имеет овальную форму размером  $2,0 \times 1,3$  пк, масса ее около  $50 M_{\odot}$ . Сначала в центре глобулы была обнаружена биполярная туманность — область ионизованного газа, имеющая

<sup>1</sup> Изменение состояния рентгеновского пульсара Her X-1. — Природа, 1984, № 4, с. 105.

<sup>1</sup> Еще одна солнечная система<sup>1</sup> — Природа, 1984, № 4, с. 105.

симметричную форму, напоминающую крылья бабочки. Затем точно в середине этой фигуры астрономы обнаружили звезду, блеск которой был сильно ослаблен из-за поглощения света космической пылью. По спектру звезды определили, что она представляет собой очень молодую горячую звезду типа  $\delta$ B. Нет сомнений, что именно ее излучение нагрело окружающий газ и привело к появлению новой яркой bipolarной туманности. Но почему звезда так неравномерно разогрела газ вокруг, почему горячая туманность имеет не круглую форму, а сильно вытянута в двух диаметрально противоположных направлениях?

Наблюдения в инфракрасном диапазоне показали, что звезда окружена пылевым диском, или кольцом. Ее излучение беспрепятственно выходит вдоль оси диска и разогревает газ над и под ним. Но вдоль плоскости пылевой диск почти полностью непрозрачен; в нем излучение звезды задерживается и нагревает пыль до 780 К.

Сама по себе молодая звезда, окруженная пылевым (по-видимому, протопланетным) диском, не уникальна. Уже известно несколько таких звезд, связанных с bipolarными и кометарными туманностями. Но шотландские астрономы впервые обнаружили такую звезду внутри темной глобулы. А поскольку других звезд в этой глобуле нет, можно считать, что звезды способны формироваться поодиночке в центре компактных газовых облаков.

Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 1984, v. 206, № 1, p. 37—46 (Великобритания).

#### Астрономия

### Астрономические открытия инфракрасного спутника «ИРАС»

В ноябре 1983 г. приборы американско-англо-голландского спутника «ИРАС» обнаружили в созвездии Стрельца необычный объект, имеющий темпера-

туру около 230 К. Эта температура слишком низка для «полноценной» звезды, но слишком высока для пылевого облака. Возможно, обнаружена гигантская газовая планета, подобная Юпитеру, масса которой в несколько раз превышает массу Юпитера. Вероятно, под действием собственных гравитационных сил такая планета сжимается и излучает значительное количество тепловой энергии.

Вслед за японскими астрономами, обнаружившими пылевое кольцо у Солнца, приборы «ИРАС» зафиксировали еще три кольца космической пыли, которыми окружена Солнечная система. Температура колец (150—200 К) свидетельствует о том, что эти кольца расположены вблизи пояса астероидов, лежащего между орбитами Марса и Юпитера. По мнению руководителя британской части экспериментов Э. Данфорда (E. Dunford), кольца могут быть результатом столкновения астероидов. Широкое центральное кольцо могло возникнуть в результате продолжавшегося миллионы лет микроскопического крошения поверхности трущихся друг о друга астероидов. Два других кольца могли возникнуть, например, при столкновении кометы с одним из астероидов во время пролета кометы через пояс астероидов к Солнцу. Образовавшаяся пыль должна была рассеяться вокруг Солнца, создав около него кольцо.

Сотрудники Лейстерского университета (Великобритания) по данным «ИРАС» попытались обнаружить быстро движущиеся объекты и идентифицировать среди них астероиды с орбитами, пересекающими земную. Было открыто небесное тело, получившее наименование 1983 ТВ. Его орбита с периодом 1,5 года позволяет отнести это тело к астероидам группы Аполлон, состоящей примерно из 50 мелких тел, пересекающих орбиту Земли. Однако 1983 ТВ подходит к Солнцу на меньшее расстояние, чем любой известный астероид или, например, орбита Меркурия: 1983 ТВ проходит на расстоянии 20,7 млн км от светила. До сих пор ближе всех, на 25,7 млн км,

приближался к Солнцу астероид Икар.

Орбита 1983 ТВ точно совпадает с потоком мелких небесных тел, который порождает метеорный дождь Геминид, ежегодно наблюдаемый на Земле между 12 и 15 декабря. Как известно, метеорные дожди вызываются вторжением в земную атмосферу мелких частиц распавшейся кометы. Все главные метеорные потоки (Персеиды, Лириды, Леониды) обладают своей «материнской» кометой, находящейся с ними на той же орбите. А вот «материнская» комета Геминид до сих пор не была известна.

Объект 1983 ТВ может быть не астероидом, а сильно «выродившейся» кометой, к которым, по предположению, относились астероиды группы Аполлон. Многократно проходя вблизи Солнца, комета может полностью потерять свой хвост и кому; оставшееся небольшое ядро будет выглядеть подобно астероиду.

Специалист по метеорам Р. Макнот (R. McNaught; Астонский университет, Великобритания) указывает, что плотность частиц в потоке, образующем Геминиды, намного выше, чем в других метеорных потоках (1,06 г/см<sup>3</sup> вместо 0,8 г/см<sup>3</sup>). Возможно, поэтому, в отличие от разреженной кометной пыли, порождающей другие потоки, Геминиды являются продуктом медленного процесса разлома плотного небесного тела. Такой процесс может быть вызван разогревом, который испытывает 1983 ТВ при каждом сближении с Солнцем.

Пока неясно, что представляет собой 1983 ТВ — комету, астероид или «соединительное звено» между ними.

New Scientist, 1983, v. 100, № 1383, p. 400, 415 (Великобритания).

#### Планетология

### Горы земного типа на Венере

По данным радиолокационных наблюдений американской межпланетной станции «Пи-

онер-Венера», полученным несколько лет назад, поверхность Земли и Венеры значительно отличаются; в частности, на Венере не обнаружены длинные вытянутые хребты, подобные земным Андам или Скалистым горам.

Однако теперь, когда начал работать крупнейший, с диаметром антенны 305 м, радиотелескоп в Аресибо (Пуэрто-Рико), разрешающая способность которого составляет 3 км, этот вывод опровергнут. Правда, с помощью радиотелескопа нельзя измерять высоты на Венере, можно лишь определять отражающую способность поверхности и по ней судить о составе пород или разных углах наклона. Но в сочетании с высотными данными орбитального отсека станции «Пионер-Венера» данные радиотелескопа в Аресибо позволяют более подробно изучить топографию Венеры.

Группа сотрудников обсерватории Аресибо и Браунского университета (штат Род-Айленд, США) установила, что сходство между поверхностями Земли и Венеры весьма велико. Так, плато в районе гор Иштар на Венере, по данным станции «Пионер-Венера», считалось состоящим из плоскости, ограниченной горами Максвелла. Теперь установлено, что район высочайшей на Венере вершины (11 км) отличается большой пересеченностью и состоит из чередующихся элементов, которые на радиолокационном изображении выглядят как темные и светлые полосы. Очевидно, это горные хребты шириной 10—20 км, протянувшиеся на несколько сот километров.

Пришлось также отказаться от гипотезы, согласно которой гора Максвелла является вулканом, возможно действующим. Радарные изображения полос не похожи на лавовые потоки, которые имели бы иную направленность — вниз по склону, а не вдоль него. Скорее, перед нами параллельно вытянутые горные системы, разделенные крутыми депрессиями, причем каждый из трех венерианских горных районов состоит по крайней мере из 5-6 подобных хребтов земного типа.

На Земле аналогичные образования могли возникнуть в результате двух различных тектонических процессов. Так, геологическая провинция Басейнов и хребтов на западе США — пример района, где земная кора подвергалась растяжению, в ходе которого образовались параллельные разломы, причем между ними кора испытывает соскальзывающее движение. Аппалачские горы, наоборот, возникли в ходе сжатия земной коры и процесса проявления складчатости, приводящего к образованию параллельных хребтов. Теперь на Венере обнаружены горные системы обоих типов.

С октября 1983 г. советские космические аппараты «Венера-15 и -16 изучают поверхность Венеры с близкого расстояния. Разрешающая способность их приборов выше американских — она составляет 1—2 км; кроме того, они способны непосредственно измерять высоту местности. Сопоставление данных, полученных советскими и американскими космическими аппаратами, позволит решить многие проблемы сравнительной планетологии, а также ряд вопросов в процессах формирования Земли.

Science, 1983, v. 221, p. 644 США;  
New Scientist, 1983, v. 100 p. 575  
(Великобритания).

#### Метеоритика

### Метеориты с Марса

Неоднократно высказывались предположения, что шерготиты, наклиты и шассиниты (их принято называть SNC-метеоритами) имеют марсианское происхождение. Основаны эти предположения прежде всего на петрологических наблюдениях, из которых следует, что образовались SNC-метеориты из родительского тела планетарных размеров. О том же свидетельствует необычно малый возраст вещества этих метеоритов. Вместе с тем существуют факты, противоречащие их марсианской природе. Рассмотрев все доводы «за» и «против», Л. Найквист

(L. Nyquist; НАСА, Центр космических исследований им. Джонсона, США) попытался оценить их достоверность и решить вопрос о генезисе SNC-метеоритов<sup>1</sup>.

В пользу образования метеоритов из крупного родительского тела свидетельствует их особая структура, возникающая в присутствии сильного гравитационного поля. Кроме того, участки с повышенной концентрацией микроэлементов распределены в образцах SNC-метеоритов неравномерно, что указывает на сложные породообразующие процессы, характерные для крупного планетного тела.

Согласно современным данным, возраст первичного вещества SNC-метеоритов очень велик — по-видимому, он превышает 4 млрд лет. С помощью различных изотопных методов доказано, что 1,3 млрд лет назад вещество этих метеоритов переплавилось и образовались новые минералы. Предполагается, что примерно в это же время возникли кратеры на некоторых марсианских равнинах. Как показали аргоновый и рубидий-стронциевый изотопные методы, 180 млн лет назад SNC-метеориты испытали ударное воздействие и их вещество было метаморфозовано.

Судя по составу SNC-метеоритов, они сформировались в окислительных условиях, подобных тем, в которых возникли земные базальты и, предположительно, базальты Марса. Химический состав шерготитов напоминает состав марсианского грунта. Да и общий элементный состав, рассчитанный для родительского тела шерготитов, согласуется с его оценками для Марса.

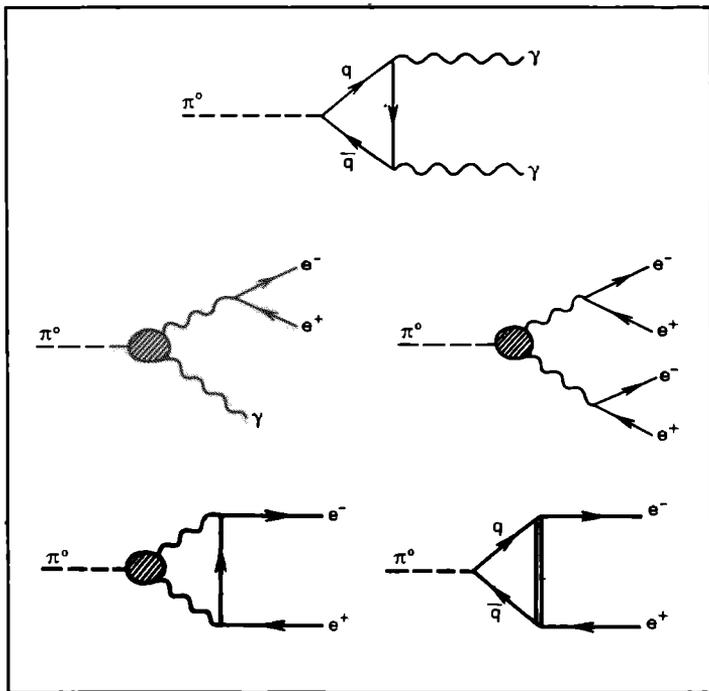
В одном из шерготитов обнаружены импактные стекла, которые содержат аргон, ксенон и азот, близкие по изотопным характеристикам к уникальному изотопному составу марсианского воздуха. Относительное количество благородных газов и азота в импактных стеклах также соответствует со-

<sup>1</sup> Nyquist L. E. Meteorites from Mars.— In: Meteoritical Society 46-th Meeting Mainz '83. Mainz, 1983, p. 140.

держанию этих элементов в атмосфере Марса. Однако изотопный состав и абсолютное содержание благородных газов, азота, углерода и водорода в SNC-метеоритах не соответствует характерным особенностям Марса.

Самые серьезные возражения марсианскому происхождению SNC-метеоритов основаны на баллистике. Недавняя находка лунного метеорита<sup>2</sup> свидетельствует, что выброс пород с лунной поверхности возможен, но не доказано, что подобное событие имело место и на Марсе. Тем не менее Найквист полагает, что косой удар крупного метеорита мог привести к выбросу поверхностного материала как с Марса, так и с Луны. При этом выбитые фрагменты могли аэродинамически ускоряться в газовом облаке, образованном либо за счет удара метеорита о поверхность, богатую летучими компонентами, либо за счет соударения с кометой<sup>3</sup>. Таким образом, Найквист склоняется к мнению, что SNC-метеориты имеют марсианское происхождение.

Л. Д. Майорова,  
Москва



Диаграммы процессов распада  $\pi^0$ -мезона. Вверху — основной распад  $\pi^0$  на два фотона (волнистые линии). Сплошными линиями показаны кварки. На последующих рисунках эта диаграмма будет изображаться заштрихованным кружком. В середине — процессы более редких распадов пиона, когда один (слева) или оба фотона (справа) виртуальны и превращаются в электрон-позитронную пару  $e^+e^-$ .

Внизу — очень редкий распад пиона на электрон и позитрон. Левая диаграмма приводит к нижней границе для относительной вероятности этого распада. Правая диаграмма — пример процесса с участием лептокварка (показан двойной линией).

гиляции кварка и антикварка. Если каждый кварк может находиться в различных цветовых состояниях, то амплитуду процесса надо умножить на число цветовых степеней свободы  $N_c$ , тогда относительная вероятность процесса приобретает множитель  $N_c^2$ . Сравнение теоретической формулы с экспериментальными результатами дает значение  $N_c = 3,06 \pm 0,10$ , в прекрасном согласии с современными предположениями о трех цветах, в которые может быть «окрашен» каждый кварк. Двухфотонный распад нейтрального пиона происходит с вероятностью около 0,988, т. е. в 98,8 % случаев.

Возможность прочих каналов распада  $\pi^0$ -мезона связана с дальнейшей судьбой двух фотонов. Например, один из них может превратиться в электрон-позитронную пару, т. е. выступать как ненаблюдаемая, виртуальная частица. Вероятность такого превращения фотона пропорциональна постоянной тонкой структуры  $\alpha \approx 1/137$ . В итоге распад  $\pi^0 \rightarrow e^+ + e^- + \gamma$

принципов теории. Согласно кварковой модели адронов, нейтральный пион состоит из кварка и антикварка одинаковых сортов. Основной канал его распада  $\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$  определяется процессом двухфотонной анни-

Физика

### Редкий распад нейтрального пиона

Физики Национальной лаборатории в Лос-Аламосе (США) измерили относительную вероятность редкого распада  $\pi^0$ -мезона на электрон-позитронную пару:  $\Gamma(\pi^0 \rightarrow e^+ + e^-) = (17 \pm 6 \pm 3) \cdot 10^{-6}$ . Всего в эксперименте наблюдалось  $59 \pm 21$  подобных событий.

Распады  $\pi^0$ -мезона позволяют проверить ряд основных

<sup>2</sup> Метеорит с Луны? — Природа, 1983, № 10, с. 104.

<sup>3</sup> Singer A. V. Lunar and Planetary Science XIV. Houston, 1983, p. 704.

происходит гораздо реже (в 84 раза) распада на два фотона, т. е. примерно в 1,2% случаев. Еще реже наблюдается распад  $\pi^0 \rightarrow e^+ + e^- + e^+ + e^-$ , когда оба фотона виртуальны и превращаются в электрон-позитронные пары. Вероятность превращения двух фотонов пропорциональна  $\alpha^4$ , и такой процесс происходит в 29 тыс. раз реже распада на 2 фотона:  $V(\pi^0 \rightarrow e^+ + e^- + e^+ + e^-) \approx \approx 3,4 \cdot 10^{-5}$ . Все эти распады наблюдались в экспериментах, результаты которых согласуются с теоретическими предсказаниями.

Еще более редок распад  $\pi^0 \rightarrow e^+ + e^-$ . В нем пион, как и в других процессах, распадается на два фотона; затем происходит процесс, обратный аннигиляции электрона и позитрона, — два фотона превращаются в электрон-позитронную пару. Выражение для относительной вероятности такого распада по сравнению с вероятностью распада  $\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$  содержит два дополнительных множителя —  $\alpha^2$  и  $(m_e/m_\pi)^2$ ;  $m_e \approx 0,5$  МэВ,  $m_\pi \approx 135$  МэВ. В результате  $V(\pi^0 \rightarrow e^+ + e^-)$ , согласно теории, должна составлять  $4,8 \cdot 10^{-8}$ . Иными словами, на электрон и позитрон распадается только примерно 50 пионов из миллиарда.

Однако приведенное число — лишь нижняя граница для вероятности этого процесса. В нем могут участвовать и другие частицы, возникающие на промежуточном этапе в ненаблюдаемом состоянии. Рассматривались даже такие экзотические возможности, как переход кварков в электрон и позитрон вследствие обмена лепто-кварком — гипотетической частицей, испускание или поглощение которой превращает кварки в лептоны. (Существование лепто-кварков требует теориями Великого объединения.) Результаты расчетов зависят от выбранной модели. Обычно вычисления приводили к числам, примерно раза в два большим нижней границы для вероятности этого распада нейтрального пиона. В новых экспериментах его значение гораздо больше. По-видимому, понадобятся более точные опыты, которые позволят судить о причинах рас-

хождения с теорией и о природе различных вкладов в редкий процесс распада л-мезона.

Проведенный эксперимент очень труден. Малая вероятность процесса требует анализа огромного числа распадов пиона. Велик фон от других процессов, ведь электроны и позитроны могут появиться и вследствие прочих распадов пиона, и в результате взаимодействия фотонов, образующихся при распадах, с веществом детекторов. Необходимо создавать мощные пучки пионов, уметь регистрировать рождающиеся электрон-позитронные пары, отделять случаи искомого распада от побочных процессов. Как видно, физики не только преодолели эти трудности, но и обнаружили нечто новое и неожиданное.

Physical Review D, 1983, v. 28, p. 423 (США).



Физика

## Линии электропередач влияют на ионосферу и магнитосферу Земли

Активная промышленная деятельность человека воздействует не только на природу и климат Земли, но и на ближний космос — на магнитосферу и ионосферу. Значительный рост сети промышленных линий электропередач привел к резкому увеличению уровня энергии электромагнитных волн, излучаемых на гармониках промышленных частот 50 и 60 Гц. Значительная доля энергии этих волн содержится в сравнительно высоких гармониках основной частоты ( $N \leq 100$ ), что связано с наличием в электрических цепях нелинейных элементов — моторов, генераторов, трансформаторов, выпрямителей и др.

В диапазоне частот 0,5—10 кГц волны через ионосферу вытекают из «волновода» Земля — ионосфера в магнитосферу, превращаясь в так называемые ОНЧ-колебания. Как показали наблюдения, проведенные в Антарктиде группой

Р. Хелливелла (R. Helliwell; Станфордский университет, США), гармоники линий электропередач могут значительно усилиться в экваториальной области магнитосферы, поскольку плазма здесь неустойчива, и сами вызвать увеличение уровня естественных ОНЧ-шумов.

Группа Т. Кайзера (T. Keiser; Университет Шеффилда, Великобритания) с помощью приборов на спутниках «Ариэль-3, -4» обнаружила возрастание интенсивности ОНЧ-волн в магнитосфере на 10—20дБ (а в максимуме — до 50 дБ) над Северной Америкой и Европой и в магнитосопреженных с ними областях Южного полушария. Дело в том, что ОНЧ-колебания распространяются по волноводным каналам вдоль геомагнитного поля и могут совершить несколько колебаний между сопряженными точками, отражаясь от ионосферы. Этот факт доказывает искусственное происхождение повышенной волновой активности в магнитосфере. Взаимодействуя с электронами высоких (до 100 кэВ) энергий из радиационных поясов, волны вызывают их «высыпание» в атмосферу Земли. Значительное увеличение энергии ОНЧ-волн как раз совпадает по высоте с «целью» в электронном радиационном поясе Земли. По оценкам, поток высыпавшихся частиц может превысить величину  $10^6$  частиц/см<sup>2</sup>. с и существенно изменить проводимость ионосферы, а также структуру ионосферных токов. Такие изменения способны через мезосферу повлиять на процессы, происходящие в атмосфере Земли. Имеются, в частности, доказательства влияния гармоник промышленной частоты на грозовую активность в некоторых районах Северной Америки. Возможно также влияние излучаемых гармоник на геомагнитную активность.

Все эти важные для человечества вопросы требуют тщательного экспериментального исследования. Поскольку явление носит глобальный характер, необходимо тесное международное сотрудничество в этой области.

Space Science Reviews, 1983, v. 35, № 1, 2 (Великобритания).

## Физика

**Лазерное возбуждение поверхностных волн в твердом теле**

В Институте атомной энергии им. И. В. Курчатова группой сотрудников во главе с Е. П. Велиховым экспериментально обнаружен предсказанный ранее эффект линейного резонансного роста амплитуды поверхностной упругой волны в твердом теле; волна возбуждается при поглощении сфокусированного на поверхность, сканируемого со скоростью поверхностных волн лазерного излучения.

Было известно, что использование движущегося фокусного пятна лазерного излучения позволяет возбуждать упругие волны в жидкости. Оказывается, этим же способом можно создавать упругие поверхностные волны большой амплитуды и в твердых телах. При поглощении энергии излучения в тонком слое вещества возникает область термоупругой деформации, которая перемещается вдоль поверхности с некоторой скоростью, определяемой свойствами материала. Если эту упругую волну сопровождает световое пятно, то деформация, возникающая в каждый момент времени, складывается в фазе с перемещающейся термоупругой деформацией; это приводит к резонансному росту ее амплитуды. В результате при незначительном нагреве поверхности можно получить деформацию, во много раз превышающую величину теплового расширения, соответствующего такому увеличению температуры.

В работе использовался  $\text{CO}_2$ -лазер с постоянной в течение импульса мощностью до 10 кВт. Излучение фокусировалось в полосу длиной 10 мм и шириной 1 мм, которая с помощью вращающегося зеркала перемещалась по поверхности массивного образца из дюралю-

миния. Поверхностную волну регистрировал датчик, расположенный в конце трассы сканирования. Такие же датчики были помещены на смежных и противоположных гранях образца, чтобы регистрировать фоновые волны. Сравнение скорости наблюдавшихся упругих волн со скоростями продольной и поперечной объемных волн, а также отсутствие значительного фонового сигнала позволило утверждать, что в экспериментах получились именно поверхностные волны. Их амплитуда линейно возрастала с увеличением мощности излучения в пределах от 0,5 до 7,0 кВт, свидетельствуя об упругом характере деформации. Максимальная величина смещения поверхности составила 0,1 мкм при нагреве примерно на 3 К.

По оценкам авторов работы, если увеличить поглощенную долю мощности излучения в 100 раз и оптимизировать условия эксперимента, можно будет приблизиться к области нелинейных деформаций. Возбуждение таких волн позволило бы существенно деформировать приповерхностный слой твердого тела, не затрагивая при этом его толщину. Обнаруженный эффект может быть использован для бесконтактной механической обработки поверхности, выявления поверхностных дефектов, исследования нелинейных свойств волн.

Письма в ЖЭТФ, 1983, т. 38, вып. 10, с. 483—486.

## Физика

**Сварка с помощью ионного пучка**

Хотя физические и технологические особенности сварки ионным пучком только недавно стали интенсивно изучаться, уже первые результаты показали, что таким способом можно легировать шов в процессе сварки. Например, при обработке ионным пучком нержавеющей стали в сварочный шов удалось ввести

более 1 % титана, что существенно улучшило качество шва<sup>1</sup>.

При таком способе сварки плазму, диффундирующую из области газового разряда в вакуум, переносят с помощью сильного магнитного поля к поверхности свариваемого металла; поверхность находится под отрицательным (по отношению к плазме) потенциалом до 500 В. При плотности тока ионов до 100 А/см<sup>2</sup> удельная мощность ионного потока достигает  $5 \cdot 10^4$  Вт/см<sup>2</sup>.

Эксперименты, проведенные в Институте электросварки им. Е. О. Патона АН УССР (Киев) под руководством Б. Е. Патона, показали, что ионный пучок не только плавит металл, но и подвергает свариваемую область интенсивной звуковой обработке. Появление мощного ультразвукового поля связано с тем, что в плазме развивается ионно-звуковая неустойчивость, частота которой зависит от размера плазменной области, массы ионов и температуры электронов плазмы; например, для водорода частота возникающего ультразвукового поля равна 10<sup>10</sup> Гц. О высокой интенсивности ультразвука можно судить по нелинейным капиллярным волнам, которые были обнаружены с помощью растрового электронного микроскопа на обратной стороне свариваемого металла, где не было плазмы и электрического поля.

Ультразвуковое поле усиливает выделение пузырьков газа из жидкого металла в области сварки. После воздействия ионным пучком концентрация кислорода и водорода в отвердевшем после сварки металле меньше, чем в исходном материале или, например, чем после его вакуумной переплавки с помощью электронного пучка. В результате интенсивной дегазации концентрация микропор после сварки ионным пучком также становится меньше, чем после электроннолучевой сварки. Еще одним последствием ультразвуковой обработки при

<sup>1</sup> Дыхне А. М., Рысов Б. П.— Поверхность: физика, химия, механика, 1983, № 6, с. 33.

<sup>1</sup> Патон Б. Е., Габович М. Д., Назаренко О. К. и др.— Доклады АН СССР, 1978, т. 239, № 3, с. 576.

сварке ионным пучком является уменьшение размера зерен затвердевшего металла, особенно в тех областях, где интенсивность ультразвукового поля была максимальной.

По мнению Б. Е. Патона, с помощью ионного пучка можно управлять свойствами сварочных швов.

Доклады АН СССР, 1983, т. 273, № 1, с. 104—106.

## Физика

### Фонокинетический аналог фотоэлектрического эффекта!

Физики давно высказывали предположение о существовании фонокинетического эффекта — аналога хорошо знакомого фотоэлектрического эффекта. Если при фотоэлектрическом эффекте фотоны выбивают электроны из поверхностного слоя металла, то фонокинетическому эффекту соответствовало бы выбивание фононами атомов с поверхности сверхтекучего гелия. Энергия единичного фонона расходовалась бы на работу выхода (в данном случае скрытая теплота испарения, отнесенная к одному атому) и на снабжение вырванного атома гелия кинетической энергией.

Английские исследователи М. Бэрд (M. Baird), Ф. Хоуп (F. Hope) и А. Уайетт (A. Wyatt) попытались экспериментально проверить эту идею. В ванне со сверхтекучим гелием, находящимся при температуре 0,1 К, был помещен генератор фононов — миниатюрный импульсный нагреватель; а над поверхностью жидкости в вакууме (поскольку криостат был откачан до очень высокой степени разряжения) — детектор выбитых атомов, в данном случае чувствительный болометр. Скорость фононов низкой энергии сравнительно высока, а их средняя длина свободного пробега мала, в результате они быстро распадаются и порождают в болометре только слабый шумовой сигнал — «термодинамический» фон. Фононы высокой энергии (эквивалентная температура около 10 К) распространяются

медленней, но их средняя длина свободного пробега может достигать многих сантиметров.

Между нагревателем и болометром непосредственно под поверхностью жидкости была помещена узкая коллиматорная диафрагма, а всю систему можно было поднимать и опускать, так что при неизменном расстоянии между нагревателем и болометром «жидкую» и «вакуумную» части пути можно было изменять. (Фактически была использована классическая схема времяпролетного спектрометра.) Исходя из известной величины теплоты испарения гелия, а также измерений промежутка времени между тепловым импульсом нагревателя и попаданием испаряющихся атомов в болометр, удалось показать, что сумма энергии связи атома в сверхтекучей жидкости (до его выбивания фононом) и его кинетической энергии (в «свободном полете» к болометру) в точности равна энергии выбивающего фонона. Таким образом, была доказана справедливость уравнения энергетического баланса, полностью соответствующего фундаментальной формуле фотоэлектрического эффекта.

Были проведены проверочные опыты с введением в сверхтекучий гелий небольших концентраций легкого гелиевого изотопа  $^3\text{He}$ . Эти примесные атомы локализируются на поверхности сверхтекучего гелия; их энергия связи с жидкостью несколько отличается от соответствующей величины для атомов  $^4\text{He}$ . При введении поправки, учитывающей различие в энергиях связи, уравнение «фотоэлектрического» типа оказалось справедливым и для выбитых фононами атомов  $^3\text{He}$ .

Nature, 1983, v. 304, № 5924, p. 305, 325—326 (Великобритания).

## Химия

### Внедрение металла в графит

Как известно, кристаллическая решетка графита образована плоскими, параллельно расположенными углеродными

слоями, которые отстоят друг от друга на 3,35 Å и связаны слабыми межмолекулярными силами. В пространстве между углеродными слоями могут внедряться молекулы и атомы различных веществ. Так, расплавленные щелочные металлы или их пары образуют соединения внедрения состава  $\text{C}_x\text{M}$  (для лития, например, получено соединение  $\text{C}_6\text{Li}$ ). В этом случае упаковка атомов щелочного металла в слое не самая плотная, поэтому предполагалось, что при высоком давлении можно получить соединения внедрения с более высоким содержанием металла (т. е. более плотной упаковки).

К. Н. Семененко, В. В. Авдеев и В. З. Мордкович (Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова) при давлении 2—8 ГПа и температуре 473—573 К получили соединения включения лития и калия в графит предельного состава:  $\text{C}_{2-2,5}\text{Li}$  и  $\text{C}_{4-4,5}\text{K}$ . Реакцию проводили в камере высокого давления; одновременно происходящие процессы регистрировались с помощью дифференциального термического анализа. В тонкостенную медную ампулу помещали таблетки щелочного металла и графитовые диски. В течение реакции цвет продуктов менялся от латуно-желтого у  $\text{C}_6\text{Li}$  до золотисто-желтого у  $\text{C}_2\text{Li}$ ; от темно-оранжевого у  $\text{C}_8\text{K}$  до золотисто-желтого у  $\text{C}_4\text{K}$ . Как показал рентгенофазный анализ, в полученных соединениях расстояние между атомами щелочных металлов в слое графита составило 2,46 Å; это свидетельствует о том, что атомы щелочных металлов сжимаются не только в направлении, перпендикулярном плоскости слоя, но и в самой плоскости слоя.

Интерес к подобным сложным соединениям связан с тем, что они обладают ценными свойствами: являются сверхпроводниками, катализируют реакции изомеризации и полимеризации олефинов, превращение орто-водорода в пара-водород, реагируют с азотом и водо-

Доклады АН СССР, 1983, т. 271, № 6, с. 1402—1405.

## Молекулярная биология

**Синтез поверхностного антигена вируса гепатита В**

Одним из наиболее эффективных средств борьбы с гепатитом В — тяжелым инфекционным заболеванием — является вакцинация. Однако потребность в вакцине не может быть полностью удовлетворена, так как материалом для ее производства служит поверхностный антиген вируса гепатита В (HBsAg), находящийся в крови у носителей этой болезни.

В последние годы антиген HBsAg пытались получить с помощью методов генной инженерии<sup>1</sup>. В Советском Союзе определенный успех в решении этой проблемы достигнут коллективом сотрудников из Института органического синтеза АН Латвийской ССР и Института микробиологии им. А. Кирхенштейна АН Латвийской ССР под руководством Р. А. Кукайн. Успеху работы в значительной мере способствовало то, что в последние годы удалось клонировать и определить первичную структуру генома вируса гепатита В; это позволило локализовать гены, кодирующие антиген HBsAg — основной компонент наружной оболочки вирусной частицы, определяющий антигенные свойства вируса гепатита В. Рижские исследователи с помощью плазмиды рНВ 320 ввели в геном кишечной палочки *E. coli* последовательность нуклеотидов, кодирующих антиген HBsAg, и добились достаточно высокой эффективности его работы. Хотя у белков, синтезированных кишечной палочкой, не все последовательности аминокислот точно соответствовали аминокислотным последовательностям в антигене HBsAg, тем не менее после очистки синтезированные белки специфически реагировали в реакции преципитации с антисыворотками, полученными против антигена HBsAg.

Выработка антигена HBsAg, осуществленная с помощью методов генной инженерии, помимо теоретического, имеет немаловажное прикладное значение. Этот антиген можно использовать как для создания диагностических препаратов, так и для получения вакцины против гепатита В. Приготовление такой вакцины станет не только проще и дешевле, чем с использованием крови доноров, но и получать эту вакцину можно будет почти в неограниченных количествах.

Доклады АН СССР, 1983, т. 271, № 1, с. 230—234.

## Молекулярная биология

**Поведение контролируется сложными белками**

В последние годы большое внимание уделяется изучению нейропептидов (пептидов, синтезируемых в нервных клетках), которые участвуют в регуляции самых разных реакций поведения. К числу таких реакций, по-видимому, можно отнести и поведение морской улитки *Aplysia*, связанное с кладкой яиц. Оказалось, что весь комплекс событий контролируется родственной группой пептидов, синтезированных в различных нейронах. Самый крупный пептид, называемый гормоном яйцекладки, — это основной продукт, образующийся в нейронах. Именно с изучения гена этого гормона Р. Шеллер и Дж. Джексон с коллегами (R. Sheller, J. Jackson; Колумбийский университет, США) начали исследование регуляции процесса кладки яиц. Выделив этот ген, они с его помощью обнаружили целое семейство тесно связанных генов, продукты которых контролируют кладку яиц.

Выяснилось, что за начальные этапы кладки отвечают два пептида, А и В, которые на 90 % повторяют гормон яйцекладки. Отсюда возникла интересная гипотеза: компоненты, управляющие одним комплексом поведения, работающие вместе и связанные функцио-

нально, образовались из одного прародительского гена.

Шеллер с коллегами определили структуру пока только 3 генов, представителей данного семейства. Эти гены обладали всеми характерными чертами генов, кодирующих нейропептиды. Во-первых, их продуктом является большой полипептид с сигнальной последовательностью, свойственной всем секреторным белкам. Во-вторых, этот полипептид под действием трипсиноподобных протеаз распадается на целый ряд отдельных пептидов. Например, полный ген гормона яйцекладки имеет последовательность, кодирующую не только гормон яйцекладки, но и еще 3—4 небольших пептида.

В настоящее время группа из Колумбийского университета ведет поиски нейронов, в которых синтезируются продукты подобных генов. Ген гормона яйцекладки используется в данном случае как зонд, с помощью которого можно выявить всю сеть нейронов, вовлеченных в кладку яиц. Предполагается установить последовательность в работе нейронов и их генов.

По существовавшим представлениям, нейропептидный контроль за кладкой яиц представляет собой очень сложный процесс, в который вовлечено довольно большое количество пептидов. Молекулярно-биологический подход к этой проблеме уже на первых этапах позволил выявить скрытый ранее порядок. Сделан еще один важный шаг в понимании отношений между функцией мозга и поведением.

Nature, 1983, v. 303, № 5915, p. 285 (Великобритания).

## Молекулярная биология

**Механизм действия онкогенов**

До последнего времени оставалось неясным, как происходит превращение здоровой клетки в злокачественную с помощью онкогенов (т. е. генов развития опухолей). Недавно группа Р. Дулиттла (R. Doolittle; Калифорнийский университет,

<sup>1</sup> Вакцина против гепатита В.— Природа, 1982, № 11, с. 110.

Сан-Диего, США) и М. Уотерфилда (М. Waterfield; Королевский фонд исследования рака, Лондон, Англия) удалось показать, что онкоген вируса саркомы обезьян кодирует образование белка, очень близкого по химическому составу к уже известному белку, представляющему собой фактор роста клеток. Этот фактор был ранее выделен из тромбоцитов крови и получил название PDGF (platelet derived growth factor — фактор роста, происходящий из тромбоцитов). При повреждении сосудов его молекулы соединяются со специфическими рецепторами, расположенными на поверхности клеток соединительной ткани, образующей стенки и перегородки сосудов. Комплекс PDGF — рецептор стимулирует деление клеток с целью «заделать» брешь, образовавшиеся в стенках сосудов.

Пока трудно понять, чем обусловлено сходство PDGF и белка, кодируемого онкогеном; наличие лишь способность обоих стимулировать клеточное деление.

Nature, 1983, v. 304, p. 35 (Великобритания); Science, 1983, v. 221, p. 248 (США).

#### Молекулярная биология

### Рецепторы Т-лимфоцитов

Как известно, Т-лимфоциты убивают попавшие в организм чужеродные клетки, содержащие чужеродные антигены, а также регулируют другие иммунные ответы организма, включая выработку антител В-лимфоцитами. Распознавание чужеродных антигенов происходит с помощью специальных рецепторов, находящихся на поверхности Т-лимфоцитов. Однако четкого представления о процессе распознавания до сих пор не существует, причина этого — недостаток наших знаний о строении Т-рецепторов.

Недавно четыре группы исследователей, работающие в различных научных центрах США, получили важные данные о природе Т-рецепторов. В опытах использовались монокло-

нальные антитела<sup>1</sup>, направленные против этих рецепторов и способные распознавать входящие в их состав белки. Было показано, что моноклональные антитела тормозят реакции только тех линий Т-лимфоцитов, против которых они были получены. Установлено, что белки рецепторов различных линий Т-лимфоцитов отличаются один от другого, что указывает на их антигенную специфичность.

Полученные данные позволили заключить, что в состав рецептора Т-лимфоцитов входит белок, состоящий из двух полипептидных цепей, которые соединены дисульфидными мостиками. Молекулярная масса этого белка составляет примерно 39—41 тыс. дальтон. Кодирование молекулы белка Т-рецептора осуществляется, по-видимому, двумя отдельными генами.

Сейчас существуют две теории распознавания чужеродных белков. Согласно одной из них — теории двойного распознавания, — Т-рецепторы содержат компоненты для распознавания отдельно чужеродного антигена и отдельно — антигена гистосовместимости, находящегося на поверхности клеток, «представляющих» чужеродный антиген. Согласно другой теории, рецептор действует как единое целое и распознает антиген гистосовместимости после его видоизменения в результате соединения с чужеродным антигеном.

Дж. Клаппер и Ф. Маррак (J. Klapper, Ph. Marrack; Колорадский центр исследования здоровья, США) с помощью моноклональных антител к Т-рецептору получили факты, свидетельствующие в пользу второй теории распознавания. Полный Т-рецептор, как оказалось, включает в себя, помимо уже описанного белка, еще и так называемый белок Т-три. Этот белок появляется на поздних этапах созревания Т-лимфоцитов в тимусе, когда они становятся иммунокомпетентными. Видимо, белок Т-три не вовлекается в

распознавание антигена, так как его структура не меняется у разных линий Т-лимфоцитов. Тем не менее моноклональные антитела против этого белка блокируют антигенспецифическую активность Т-лимфоцитов.

Science, 1983, v. 220, № 4600, p. 937—939 (США).

#### Вирусология

### Индукторы интерферона усиливают эффективность вакцинации

Исследования, проведенные в последние годы, показали, что вещества, стимулирующие синтез интерферона в организме (или индукторы интерферона), как правило ускоряют иммунный ответ, тогда как введение препаратов самого интерферона может привести к иммунодепрессии.

Сотрудники Института вирусологии АМН СССР во главе с Ф. И. Ершовым изучали влияние индукторов интерферона на эффективность вакцинации. Опыты проводились на мышах. Использовалось комбинированное воздействие индукторов интерферона и вакцины для создания невосприимчивости к гриппу и герпетическому энцефалиту, а также для получения лечебного эффекта против бешенства и клещевого энцефалита. Стимуляторами синтеза интерферона служили синтетический полинуклеотид поли G· поли C, репликативная форма фага f<sub>2</sub> (RFf<sub>2</sub>) и препарат РНК. Введение этих веществ животным вызывало синтез больших количеств интерферона — более 1000 ед./мл.

Было показано, что комбинированное применение индукторов интерферона и вакцины в 3—6 раз увеличило защиту организма против заболевания по сравнению с введением только одной вакцины или только одного индуктора интерферона. Максимальный эффект получен при использовании поли G· поли C.

Предварительное введение противогерпетической вакцины и одного из индукторов интерферона также заметно

<sup>1</sup> Подробнее об этом см.: Кобринский Г. Д. Получение антител повышенной специфичности. — Природа, 1980, № 11, с. 111.

увеличивало процент выживаемости мышей, зараженных затем смертельной дозой вируса герпеса. Введение антирабической вакцины (против бешенства) и индуктора интерферона проводили спустя сутки после заражения животных вирусом бешенства. При этом получали процент выживаемости мышей в 1,5—4,5 больший, чем при введении им одного из индукторов интерферона (введение только вакцины против бешенства животных не спасало).

При заражении животных клещевым энцефалитом предварительное введение вакцины и индуктора интерферона было в 2,3—6,5 раз эффективнее введения только вакцины (использование только индуктора интерферона не защищало животных от заболевания).

Данные, полученные сотрудниками Института вирусологии, имеют важное научное значение. Особенно это касается бешенства — заболевания для человека смертельного. Возможно, дальнейшие исследования по применению индукторов интерферона приведут к разработке методов лечения этой болезни.

Вопросы вирусологии, 1983, № 4, с. 74—79.

#### Микробиология

### Борьба со стафилококковой инфекцией

Лечить заболевания, вызванные стафилококками, очень трудно, поскольку эти бактерии устойчивы к широкому кругу лекарственных препаратов. Для борьбы с носителями стафилококковой инфекции предлагается использовать препараты живых микробов, безвредных для организма человека, но весьма активных по отношению ко многим патогенным видам бактерий.

Сотрудники Ереванского медицинского института, Института эпидемиологии и микробиологии им. Н. Ф. Гамалеи и Института микробиологии АН Армянской ССР изучали антагонистическую активность

молочнокислых бактерий по отношению к госпитальным штаммам золотистого стафилококка (*Staphylococcus aureus*). Штамм молочнокислых бактерий № 317/402 был выделен в институте микробиологии АН Армянской ССР. Его действие было испытано на 147 штаммах *St. aureus*, выделенных у больных, находящихся в госпиталях и страдавших различными заболеваниями. Штаммы *St. aureus* обладали устойчивостью к широкому кругу антибиотиков.

Оказалось, что на жидких питательных средах молочнокислые бактерии выделенного штамма подавляли рост госпитальных штаммов золотистого стафилококка в 99,9—100 % случаев. На твердых питательных средах наблюдалась значительная зона задержки роста стафилококка.

Поскольку молочнокислые бактерии безвредны для организма человека, их решили использовать для лечения носителей *St. aureus*. С этой целью среди сотрудников различных лечебных учреждений было отобрано 108 человек, постоянных носителей золотистого стафилококка. В полость носа им вводили препарат молочнокислых бактерий, приготовленный из выделенного штамма, в количестве 0,5 мл в каждый носовой ход. Введение проводили в течение 5 дней по 3 раза в день. В результате у 82 % носителей стафилококка наблюдалось либо полное отсутствие этих бактерий, либо количество бактерий уменьшалось до 15—20 колоний, тогда как до лечения число таких колоний превышало 1000.

По мнению авторов работы, препарат, приготовленный из молочнокислых бактерий, можно с успехом использовать для лечения носителей золотистого стафилококка, находящихся в госпиталях. Препарат можно вводить многократно в течение длительного времени. Возможно, его применение позволит существенно ограничить число носителей золотистого стафилококка и добиться тем самым снижения внутрибольничной заболеваемости.

Журнал микробиологии, эпидемиологии и иммунологии, 1983, № 8, с. 36.

#### Физиология

### «Пептид сна» из яда морской улитки

У морского брюхоного моллюска-рыбоеда (*Conus geographus*) клетки стенок ядовыводящих протоков вырабатывают по крайней мере три класса пептидных нейротоксинов, блокирующих нервно-мышечную передачу в синапсах позвоночных животных. Все эти пептиды в общем сходны по своей химической природе. С их помощью морская улитка обездвигивает свою жертву.

Недавно группа американских биохимиков из Университета штата Юта (J. McIntosh et al.) выделила из яда этого моллюска новый пептид, резко отличающийся по структуре от остальных. Он состоит из 15 аминокислотных остатков, причём 10 — остатки обычных аминокислот, а 5 — остатки гамма-карбоксиглутаминовой кислоты, которую ранее никогда в организме животных не обнаруживали. Очищенный пептид, как оказалось, обладает уникальным физиологическим свойством: после внутримозгового введения мышам в дозе 1 мкг он вызывает у них снаподобное состояние на протяжении 12—36 часов. Дальнейшее изучение этого вещества представляет значительный интерес для физиологов.

Federation Proceedings, 1983, v. 42, No 7, p. 1811 (США).

#### Биология

### Новая функция митохондрий

В. В. Роговин и В. А. Фомина (Институт химической физики АН СССР, Москва) установили, что митохондрии, основная функция которых — осуществлять клеточное дыхание, способны также поглощать часть клеточной цитоплазмы, изолируя ее в виде замкнутой вазуоли. Последовательность фаз этого процесса была прослежена с помощью трансмиссионной

электронной микроскопии на митохондриях клеток костного мозга весенней лягушки.

Захват зон цитоплазмы происходит путем постепенного изгибания митохондрии, принимающей сначала куполообразную (на срезах — подковообразную), а затем сферическую форму (на срезах — кольцевидную). Внутри образовавшейся в результате этого полости наблюдается распад цитоплазмы.

Похожие подковообразные срезы митохондрий наблюдали и описывали ранее и другие авторы<sup>1</sup>, отмечавшие, например, широкое распространение «купольных» митохондрий в тканях скорпиона, опоссума, клетках гидры, яйцеклетках дрозофилы, клетках поджелудочной железы мыши. Однако ни разу при этом не сообщалось о формировании замкнутых полостей в результате изгибания митохондрий: очевидно, этому явлению не придавалось никакого физиологического значения.

Роговин и Фомина предполагают, что захваченные митохондриями цитоплазматические компоненты могут разрушаться под действием митохондриальных гидролитических ферментов, подобно тому как это происходит в специализированных клеточных органеллах — лизосомах. Таким образом, считают авторы, митохондрии конкурируют с лизосомами или же действуют параллельно с ними.

Известия АН СССР, серия биологическая, 1983, № 6, с. 923—924.

#### Психология

### Как ребенок рисует человечка

Как правило, дети начинают рисовать человеческую фигуру в возрасте 3—4 лет, причем очень часто прикрепляют конечности непосредственно к голове,

игнорируя туловище. Интересно, что эту ошибку они совершают и тогда, когда составляют фигурку из уже имеющихся частей. Связаны ли эти ошибки с невнимательным восприятием или с непониманием значения отдельных частей тела?

Американские психологи У. Бриттен и Ю. Чен (W. Brittain, Yu. Chen; Корнуэллский университет, Итака, штат Нью-Йорк) просили детей 3—4,5 лет, во-первых, нарисовать человечка или составить фигурку из готовых бумажных частей (2 руки, 2 ноги, голова, туловище), во-вторых, назвать эти части (либо самостоятельно, либо при подсказке экспериментатора). Как и предполагалось, с наибольшим затруднением дети называли туловище, и именно оно часто «забывалось» при воспроизведении.

Таким образом, умение рисовать туловище и включать его при составлении человечка из частей связано с умением его назвать: почти все дети, затруднявшиеся назвать туловище, нарисовали «головонного человечка». Однако из тех, кто правильно назвал туловище (даже без подсказки), далеко не все включили его в рисунок и в собираемую фигурку. По-видимому, понимание значения части тела — условие хотя и необходимое, но не достаточное для ее обязательного графического изображения.

Этот результат показывает, что уже в раннем возрасте ребенок, воспринимая какой-либо объект, не просто копирует его части, а руководствуется определенным пониманием этого объекта, понятийным представлением о нем.

Perceptual and Motor Skills, 1983, v. 57, № 1, p. 19—24 (США).

#### Физиология

### Сон у морских котиков

Группа исследователей из Института эволюционной морфологии и экологии животных им. А. Н. Северцова АН СССР (В. М. Ковальзон, О. И. Лямин, Л. М. Мухаметов, И. Г. По-



Северный морской котик во время регистрации физиологических показателей.

лякова), изучая физиологические характеристики естественного сна морских млекопитающих, обнаружили ряд новых и неожиданных явлений. Оказалось, что у дельфинов медленноволновый сон протекает то в одном, то в другом полушарии попеременно, а парадоксальный сон вообще отсутствует. У каспийских тюленей (семейство настоящих тюленей) медленноволновый сон протекает в обоих полушариях одновременно, как и у всех млекопитающих; парадоксальный сон выражен хорошо<sup>1</sup>. Сейчас получены первые данные о сне другого вида ластоногих — северного морского котика (*Callorhinus ursinus*) из семейства ушастых тюленей. У этого вида, в отличие от каспийских тюленей, можно зарегистрировать во время медленноволнового сна периоды резко выраженной межполушарной асимметрии, однако этот феномен по ряду существенных признаков отличается от однополушарного сна дельфинов.

Подопытные животные — три неполовозрелых самца, имевших возраст 2—3 года и вес около 20 кг, — содержались в

<sup>1</sup> Подробнее см.: Ковальзон В. М. Сон у дельфинов. — Природа, 1982, № 6, с. 111; Уникальный сон дельфинов. — Там же, 1983, № 2, с. 115; Сон у ламантина. — Там же, № 4, с. 21; Сон у тюленей. — Там же, № 6, с. 111.

<sup>1</sup> Christensen A. K., Chapman G. B. — Exptl. Cell Res., 1959, v. 18, p. 576.

небольшом вольере с приподнятым над водой помостом (дно вольера было покрыто тонким слоем воды, чтобы животные не перегревались). Вначале животным под наркозом были введены постоянные электроды для регистрации электрической активности коры головного мозга, глаз и мышц шеи. Через 2—3 суток, когда их состояние после операции полностью восстановилось, вели с помощью гибкого длинного кабеля непрерывную регистрацию электрической активности коры головного мозга на протяжении 3—4 суток.

Котики много времени проводили в неподвижности с закрытыми глазами, однако это состояние не обязательно означало сон; почти 2/3 суток животные бодрствовали. Медленноволновый сон занимал 30 % времени, а парадоксальный — 6 %. Наряду с обычным двухполушарным медленноволновым сном у всех трех животных обнаружены периоды резко выраженной межполушарной асимметрии, в сумме занимавшие половину всего времени сна. От однополушарного сна дельфинов эти периоды отличались следующими важными деталями: во-первых, периоды наиболее глубокого медленноволнового сна у дельфинов всегда однополушарны, а у котиков могут быть и одно- и двухполушарными; во-вторых, периоды асимметрии у котиков короткие (обычно по несколько минут), а у дельфинов могут длиться до двух часов; в-третьих, эти периоды у котиков вообще менее контрастны, чем у дельфинов, и проявляются в большинстве случаев в том, что одно из полушарий как бы опережает другое при засыпании. Периоды парадоксального сна у котиков отчетливо выражены и всегда были двухполушарными, как и у других млекопитающих.

Таким образом, сон морских котиков представляет собой как бы промежуточный вариант между обычным двухполушарным медленноволновым сном всех млекопитающих, включая настоящих тюленей, и чередующимся однополушарным сном дельфинов. Будущие исследования покажут, характе-

рен ли подобный необычный сон также и для взрослых самцов и самок северного морского котика.

Доклады АН СССР, 1983, т. 273, № 5, с. 1264.



Экология

## Судьба нефти «Амоко Кадис»

Подведены первые итоги исследований, проводившихся группой экологов из Франции, США, Канады и Великобритании по оценке физико-химических и биологических процессов самоочищения среды от нефти после катастрофы японского супертанкера «Амоко Кадис» у побережья Бретани в марте 1978 г.<sup>1</sup> Главный вопрос, который был поставлен перед исполнителями программы этих исследований: куда уходит нефть?

Из модельных экспериментов следовало, что разлитые в море нефтепродукты могут разлагаться или диспергироваться в результате различных физико-химических и биологических процессов, основные из которых — растворение, биодеградация, эмульгирование, испарение, фотохимическое окисление, агломерация и осаждение. Наблюдения показали, что за первые две недели после катастрофы выброшенные в море 223 тыс. т нефти распространились по акватории в 15 млн км<sup>2</sup> и загрязнили побережье Франции на протяжении 300 км. Эмульгированные компоненты проникли в толщу воды и донные осадки на литорали<sup>2</sup> и сублиторали. Через месяц после разлива 67 тыс. т нефти испарилось; 62 тыс. т достигло берега; 30 тыс. т распределилось в водной толще, из них 10 тыс. т подверглось разложению неф-

теоокисляющей микрофлорой; 18 тыс. т поглощено осадками на мелководье, а остальные 46 тыс. т были собраны с поверхности воды и с берега механическим путем.

Самый большой вклад в процесс самоочищения морской среды (около 30 %) дало испарение. Это обусловлено высоким содержанием летучих низкокипящих компонентов в смеси аравийской и иранской нефти, находившейся в танкере «Амоко Кадис». Активному проникновению нефти в водную толщу, внедрению ее в донные осадки и грунт побережья способствовала большая энергия волн, характерная для всей акватории разлива нефти. Процесс фотохимического окисления оказался незначительным, несмотря на высокую дозу солнечной радиации в этом районе.

В дальнейшем вывод продуктов разложения нефти из водной среды и донных осадков осуществлялся главным образом благодаря сильному волнению и интенсивному перераспределению осадков в прибойной зоне, а также вследствие биодеградации. Сильное перемешивание водных масс способствовало более интенсивному испарению легких фракций, образованию из тяжелых компонентов нефти агломератов и выпадению их на дно. Биодеградация остатков на поверхности дна вела к частичному возвращению в водную среду легких компонентов нефти, которые затем либо разлагались водной нефтеокисляющей микрофлорой, либо испарялись. Многократное взаимодействие таких процессов привело к тому, что инертные, химически труднорастворимые и биологически трудноокисляемые нефтепродукты стали постепенно накоп-

<sup>2</sup> Литораль — прибрежная зона между уровнями самого высокого прилива и самого низкого отлива. Для этой зоны характерны периодические осушения дна, обилие света, наличие сильных движений воды (прибой, волнения, течения), резкие колебания температуры и солености, разнообразие грунта, существование весьма различных фитоценозов и биоценозов.

<sup>1</sup> Подробнее см.: 1978 год — рекордный по загрязнению морей.— Природа, 1979, № 12, с. 99; Последствия нефтяной катастрофы.— Там же, 1983, № 6, с. 113.

ливаться в донных осадках, проникая на глубину 20 см, а в некоторых местах и до 1 м.

К весне 1981 г., т. е. спустя три года после катастрофы, нефтяные остатки сохранялись в основном в донных осадках сублиторальной зоны. В зависимости от типа осадков, от условий аэробного или анаэробного разложения нефти микрофлорой биодеградация инертных компонентов может продолжаться годы.

Хотя основные параметры среды в настоящее время постепенно возвращаются к своим исходным значениям, для восстановления экологического равновесия дикой природы потребуются годы, а для возобновления работы промысловых хозяйств марикультур на прежнем уровне необходимы колоссальные экономические затраты.

Science, 1983, v. 221, № 4606, p. 122—129 (США).



Экология

## Международная программа «Региональные моря»

Под эгидой ООН разработана международная программа «Региональные моря», в которой ныне участвуют 120 государств и 26 различных международных организаций. Это начинание представляет собой крупнейший раздел общей Экологической программы ООН и охватывает следующие области: Средиземноморье; Красное море и Аденский залив; моря Восточной Азии; юго-западную часть Тихого океана; юго-восточную часть Тихого океана; Карибское море; воды, омывающие Западную и Центральную Африку; Восточно-Африканский бассейн; юго-западную часть Атлантики. Для каждой из этих 10 областей разработан свой конкретный план действий.

В Средиземноморье за десятилетие (1964—1974) население 18 прибрежных государств увеличилось на 50 млн человек, причем большая часть живет в узкой приморской зоне,

которую ежегодно посещают еще 100 млн туристов. Около 80 % сточных вод, поступающих в море, или совсем не очищены или очищены недостаточно. Между тем в Средиземном море водится около 500 видов рыб, 100 из которых нигде более не встречаются. В рамках новой программы 18 средиземноморских государств подписали обязательства полностью исключить сброс в море веществ, содержащих ртуть, кадмий, ДДТ, полихлорбифенилы, некоторые пластические массы, смазочные масла и радиоактивные вещества, а также взять под контроль сброс несколько менее опасных — свинца, цинка, меди, мышьяка, кобальта и др. Принято решение о сотрудничестве в ликвидации последствий загрязнения моря нефтью в случае аварий. На о-ве Мальта создан Региональный центр борьбы с нефтью, который осуществляет координацию ответствующих органов стран — участниц программы. Каждая страна взяла обязательство контролировать находящиеся на ее территории источники загрязнения моря и обмениваться раз в два года информацией об уровне загрязнения и принятых мерах. Недавно государства — участники Средиземноморской подпрограммы согласились создать в своем регионе в дополнение к существовавшим здесь 15 морским паркам и другим охраняемым территориям около 100 новых зон, где природа будет взята под защиту.

В сферу действия Красноморско-аденской части программы входит бассейн, еще сравнительно мало загрязненный человеком. Однако из-за бурного экономического роста, главным образом — развития нефтедобычи, перевозок нефтепродуктов и массового притока переселенцев, и в этом регионе уже наметились тревожные признаки загрязнения природы. Этот опасный процесс может быстро усилиться в связи с открытием на дне моря месторождений металлов с весьма значительным экономическим потенциалом. Семь государств этого региона договорились о совместных природоохранительных действиях.

Персидский залив имеет

длину около 1200 км и среднюю глубину всего 35 м; прибрежное мелководье (менее 10 км глубины) простирается здесь на многие километры от суши. По Персидскому заливу и Ормузскому проливу транспортируется около 60 % всей перевозимой в мире нефти (до 1 млрд т в год). С танкеров в залив ежегодно сбрасывается более 988 тыс. т — загрязненность этих вод нефтью в 47 раз превышает среднюю по Мировому океану. Восемь государств этого региона принадлежат к числу наиболее быстро развивающихся в мире. За ростом городов (численность населения которых за 4 года удвоилась) не поспевает строительство очистительных систем. В рамках новой программы на о-ве Бахрейн создается Центр взаимной помощи при нефтяных катастрофах; принимаются практические меры против сброса в залив балластных вод с нефтепродуктами; в Кувейте и Катаре строятся крупные системы очистки стоковых и канализационных вод; ведутся физико-океанографические исследования бассейна; создается план организации морских парков.

Регион действия Карибской части программы отличается большим разнообразием уровня промышленного развития и культурного наследия. Карибское море становится важным районом нефтедобычи; ежегодно по нему перевозится до 800 тыс. т нефти. Еще один фактор загрязнения — сток вод, содержащих химические удобрения и инсектициды с плантации тропических фруктов, сахарного тростника, хлопка, риса и т. п. В последние годы в ходе плохо планируемого строительства многочисленных отелей и центров отдыха отмечается разрушение коралловых рифов и мангровых зарослей — естественного барьера, охраняющего острова от штормового и приливного воздействия. С гибелью рифов исчезают и места обитания приспособленных к жизни среди них рыб и других морских организмов. Ныне вступает в действие совместный план, объединяющий природоохранительные усилия 28 государств, расположенных в Карибском

регионе или имеющих там территории.

Западно - центральноафриканская часть программы распространяется на побережье Атлантики от Мавритании до Намибии, включая весь Гвинейский залив. Здесь важным источником загрязнения тоже служит танкерный флот. Из-за отсутствия должных систем очистки промышленных и бытовых стоков в ряде мест существенно пострадали экологические системы лагун и маршей (заболоченных побережий). Ныне 20 стран этого региона договорились о совместных мерах контроля за главными источниками загрязнения.

В Восточноазиатской подпрограмме участвуют Индонезия, Малайзия, Филиппины, Сингапур и Таиланд. Омывающие их моря страдают от разрушения коралловых построек (в частности, при глушении рыбы взрывами), сброса нефти с танкеров, поступления неочищенных канализационных вод, вырубки лесов и мангровых зарослей. Намечаются первые согласованные шаги по охране этого бассейна.

Вдоль всего западного побережья Южной Америки, от Панамы до м. Горн, протянулась область действия Юго-восточной тихоокеанской подпрограммы. Она охватывает тропики, субтропики, умеренную и субантарктическую зоны. Все 5 стран региона омываются течением Гумбольдта, оказывающим на их природу существенное воздействие. К числу отрицательных антропогенных факторов здесь относятся загрязнение портовых территорий химикатами и отходами горнодобывающей промышленности, канализационный сброс вблизи крупных городов, отходы пищевой промышленности, нефтяное загрязнение. Составлены планы международного сотрудничества для противодействия этим факторам.

В жизни народов юго-западной части Тихого океана море играет особую роль, являясь главным источником пищи и важнейшим средством передвижения. Задешние островные государства, занимающие 600 тыс. км<sup>2</sup> суши, окружены акватори-

ей в 20 млн км<sup>2</sup> (если считать только 200-мильную прибрежную зону). 21 страна этого региона подписала совместную декларацию против проведения здесь атомных испытаний и захоронения радиоактивных отходов; решено добиваться охраны среды в условиях начинающегося развития горнодобывающей промышленности.

Восемь стран Восточной Африки, а также Франция от имени о-ва Реюньон (ее заморский департамент) разработали программу охраны вод этой части Индийского океана. Здесь необходимо сохранить 3—4 тыс. видов рыб, богатые коралловые постройки, мангровые заросли; падает численность морских черепах и дюгоной (отряд сирен). В 1984 г. вступает в силу соглашение, обязывающее все страны региона координировано действовать против существующей угрозы их исчезновения.

В районе юго-западной Атлантики объединили усилия для защиты природной среды омывающего их моря Аргентина, Бразилия и Уругвай.

Таким образом, несмотря на все имеющиеся трудности, впервые создан и уже частично действует глобальный механизм защиты природы Мирового океана.

Ambio, 1983, v. XII, № 1, p. 2—12 (Швеция).



Охрана природы

## Индийский океан должен быть чистым

В любой данный момент времени в юго-западном бассейне Индийского океана находится в среднем 224 нефтеналивных судна, причем 48 из них относятся к классу гигантских «стотысячников». По этому важнейшему в мире пути перевозки нефтепродуктов из добывающих стран Персидского залива в страны Западной Европы, Северной Америки, Южной и Восточной Азии ежегодно доставляется около 475 млн т жидкого топлива. До сих пор, к счастью, в Индийском океане

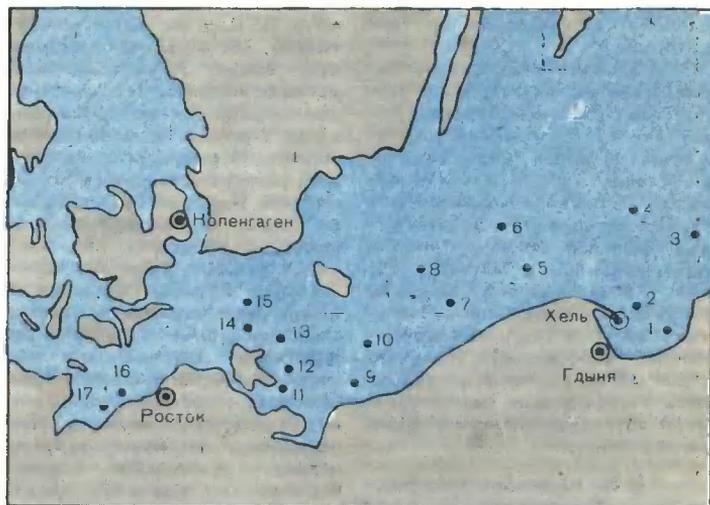
не произошло ни одной достаточно крупной аварии с выбросом нефти за борт, за исключением гибели в 1970 г. танкера «Эннердейл» грузоподъемностью 60 тыс. т в открытом море и аварии танкера «Бритиш Кавалир» в порту Момбаса (Кения), причинивших сравнительно небольшой ущерб природной среде.

Тем не менее загрязненность вод, омывающих побережья стран Восточной Африки, Мадагаскара, Сомали, Маврикия, Сейшельских и Коморских о-вов, продолжает возрастать. Основная причина заключается в том, что многие нефтеналивные суда случайно или преднамеренно оставляют за бортом немалое количество перевозимого груза. Согласно оценкам, танкеры, доставляющие нефтепродукты непосредственно в страны данного региона, теряют около 0,4 % нефти, что составляет примерно 20,5 тыс. т в год. Транзитные наливные суда ежегодно перевозят через юго-западный бассейн Индийского океана около 450 млн т, оставляя при этом за бортом не менее 11,25 тыс. т в год. Сброс танкерами трюмных вод поставляет в море ежегодно еще около 410 т нефтепродуктов. Кроме того, свой вклад в загрязнение Индийского океана нефтью, исчисляемый в 460 т в год, вносят не менее 5 тыс. судов, которые перевозят 20 млн т различных грузов, экспортируемых и импортируемых по морю странами Восточной Африки. 200 рыболовных судов, находящихся в этих водах в любое время, добавляют еще не менее 820 т в год. И наконец, еще 6,65 млн т дают 5 нефтеочистительных заводов, работающих в Могадишо (Сомали), Момбаса (Кения), Дар-эс-Саламе (Танзания), Матоле (Мозамбик), Тоамасине (о. Мадагаскар). Хотя добыча собственной нефти в Восточной Африке практически не ведется, ее разгрузка и переработка на этих нефтеочистительных заводах существенно загрязняет соответствующие гавани; лишь в Момбаса имеется оборудование для очистки от нефти. Но даже если исключить вклад нефтепромышленности, и в этом случае количество углеводородов, ежегод-

но поступающих в воды Индийского океана, превысит 33,4 тыс т.

Экипажи судов и самолетов нередко наблюдают в этом регионе большие нефтяные пятна и «хвосты». На побережья Коморских, Сейшельских о-вов, Кении и Сомали волны часто выносят нефтегидроновые шары. Надежды на улучшение подобной ситуации связываются с проведением международной подпрограммы «Региональные моря Восточной Африки».

Ambio, 1983, v. XII, № 6, p. 354—357 (Швеция).



#### Геофизика

### Вековой ход магнитного поля Земли

В рамках Проекта 1 «Геофизическая и геодинамическая модель литосферы Восточной и Центральной Европы», осуществляемого под эгидой Комиссии академий наук социалистических стран по геофизике, специалисты Ленинградского отделения Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн АН СССР (ЛО ИЗМИРАН), Института геодезии и картографии ПНР, Центрального института солнечной и геофизической физики АН ГДР ведут исследования векового хода магнитного поля Земли в южной части Балтийского моря.

Как известно, постоянное магнитное поле Земли на самом деле испытывает медленные изменения, получившие название вековых вариаций. Магнитные карты в связи с этим стареют. Кроме того, при составлении сводных карт по материалам магнитных съемок, проведенных в разные годы, неизбежно возникает задача приведения магнитного поля к единому уровню, для чего тоже необходимо знать вековые вариации. Особый интерес представляют локальные быстро изменяющиеся аномалии векового хода (так называемые фокусы), появление и эволюцию которых принято связывать с резкими глубинными локальными неоднородностями.

Впервые созданная в мировой практике сеть морских пунктов векового хода магнитного поля Земли. 17 пунктов заложены у побережья ПНР и ГДР в 1981 и 1982 гг.

Вековая вариация, обычно описываемая разностью среднегодовых значений магнитного поля Земли в одной и той же точке (вековой ход), на суше определяется по результатам наблюдений на обсерваториях или на специально создаваемых пунктах векового хода. На акватории Мирового океана изучение вековой вариации осложняется отсутствием таких пунктов, в экстраполяция данных береговых определений может привести к большим ошибкам, вплоть до пропуска фокусов векового хода. Поэтому разработка методов изучения вековых вариаций на акватории весьма актуальна.

В 1981 и 1982 гг. группа специалистов из СССР, ПНР и ГДР в ходе 22-го и 23-го рейсов научного-исследовательского судна «Заря», принадлежащего ЛО ИЗМИРАН, выбрала в южной части Балтийского моря 17 точек, образовавших квазирегулярную сеть морских пунктов векового хода (МПВХ). Измерения осуществлялись способом, разработанным сотруд-

ником ЛО ИЗМИРАН Л. Г. Касьяненко. В течение 1—2 суток «Заря» проходит до 30—35 раз на разных курсах через заданную точку, выбранную в слабоаномальном магнитном поле. Последующее введение поправок и осреднение показаний магнитометров в момент прохождения этой точки обеспечивает существенное уменьшение случайных и некоторых систематических ошибок, позволяя получить значения компонент магнитного поля Земли, относящиеся к середине временного интервала наблюдений. Дальнейшая обработка и анализ материалов с привлечением результатов наблюдений в ближайших обсерваториях — Воейково, Хель, Нимегк, а также на нескольких временных магнитовариационных станциях, установленных на побережье Балтики на период морских измерений, позволили определить среднегодовые значения элементов магнитного поля: вертикальную и горизонтальную составляющие и модуль его полного вектора. При этом погрешность определения значений магнитного поля Земли, оцененная по данным повторных измерений на этих же пунктах через короткий интервал времени (не более трех недель), характеризуется величинами всего  $\pm(1-8)$  нано-тесла. Это позволяет рассчитывать на достаточно надежное определение векового хода

при повторных измерениях через 3—4 года.

Опыт заложения сети МПВХ будет использован при исследовании векового хода магнитного поля в Атлантическом океане, которое начинается в 1984 г. 25-м рейсом НИС «Заря».

**А. М. Карасик,**  
доктор геолого-минералогических наук  
Ленинград

Сейсмология

**Предсказанное землетрясение**

Десять лет назад в Заалайском хребте землетрясением, происшедшим 11 августа

Таблица  
Сопоставление прогноза землетрясения с реальным событием

Ожидание с 1980 г.	Координаты	Опасный период с 1980 по 1995 г.	Магнитуда 6,7
	39°,5 с. ш. 73°,0 в. д. ±0,3		
Реальность	39°,5 с. ш. 73°,0 в. д.	1983 г.	6,0

1974 г. и имевшим магнитуду 7,2, началась фаза долговременной сейсмической активности в Южной Киргизии. В связи с этим землетрясением автор этого сообщения впервые высказал гипотезу миграции сильных землетрясений вдоль основных зон разломов Средней Азии<sup>1</sup> и затем на основании этой гипотезы предсказал возможность следующего сильного землетрясения на северном склоне Заалайского хребта (по северной границе Памира) в течение предстоящих лет. Сейсмическое событие с магнитудой 6,8 и интенсив-

ностью до 8 баллов действительно произошло на указанном участке 1 ноября 1978 г.<sup>2</sup> После этого первого из долгосрочных прогнозов сильных землетрясений в Средней Азии региональный прогноз был уточнен и вновь опубликован.

16 декабря 1983 г. в той же зоне произошло следующее сильное землетрясение; оно имело магнитуду 6,0, интенсивность 7 баллов и вызвало значительные повреждения в нескольких поселках Алайской долины. По трем главным показателям (место, магнитуда и период) это землетрясение снова оказалось соответствующим сделанному в 1980 г. и уточненному в 1983 г.<sup>3</sup> долгосрочному прогнозу (см. табл.).

К сожалению, долгосрочный прогноз не был в свое время подкреплен сейсмологами и геофизиками средние- и краткосрочными прогнозами. Это упущение должно быть ликвидировано, поскольку район про-

должает находиться в фазе сейсмической активности и на определенных участках сохраняется опасность новых сильных землетрясений в долгосрочном аспекте.

**А. А. Никонов,**  
доктор геолого-минералогических наук  
Москва

<sup>2</sup> См.: Никонов А. А. Успехи и просчеты прогноза землетрясения в Алайской долине.— Природа, 1980, № 10, с. 83.

<sup>3</sup> Никонов А. А., Ваков А. В., Вселов И. А. Сейсмоструктура и землетрясения зоны сближения Памира и Тянь-Шаня. М., 1983, с. 196—197, 239.

Археология

**Серебро в древнем Средиземноморье**

Кипрский археолог В. Карагеоргис (V. Karageorghis) при раскопках в Пила-Коккинокремосе (юго-восточное побережье о-ва Кипр) нашел два слитка серебра в развалинах жилища, относящегося к раннему бронзовому веку (III тысячелетие до н. э.). Столь древние предметы из серебра находили на острове и раньше, но необработанное серебро обнаружено впервые. Это особенно интересно в связи с тем, что залежей серебряной руды на Кипре нет.

Департамент древностей Кипра пригласил для изучения находки специалистов из Оксфордского университета (Англия) Н. Гейла и З. Стос-Гейл (N. Gale, Z. Stos-Gale). По химическому составу слитки оказались в общем сходны с серебром из Древнего Египта, однако по содержанию изотопов свинца и золота они существенно различаются. В то же время химический состав слитков близок к составу тех образцов серебра, которые известны по раскопкам древних серебряных копий в районе Лавриона, расположенного к юго-востоку от Афин.

Из археологических источников известно о торговле серебром между Кипром и Египтом, существовавшей в XIV в. до н. э. Можно предположить, что в те времена серебро, добытое и переплавленное в слитки в Лаврионе, было продано в Египет, а затем перепродано на Кипр. По-видимому, ювелир, в доме которого были найдены слитки, в момент приближавшейся опасности закопал их.

«Коммерческий» путь слитков свидетельствует о разветвленной торговле в Восточном Средиземноморье в раннем бронзовом веке.

Antiquity, 1983, v. 57, № 221, p. 211; New Scientist, 1983, v. 100, № 1385, p. 573 (Великобритания).

<sup>1</sup> Никонов А. А.— Доклады АН СССР, 1975, т. 225, № 2, с. 306.

## Настольная книга физика-экспериментатора

**Д. Н. Никогосян,**  
кандидат физико-математических наук  
Москва



**А. П. Сенченков. ТЕХНИКА ФИЗИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА.** Изменение электрических величин. Работа с высоким напряжением и ядерными излучениями. Вакуумная техника. М.: Энергоатомиздат, 1983, 238 с.

Существует великое множество книг по физике. Для каждого, кто пожелает освежить в памяти или заново освоить тот или иной раздел этой науки, в библиотеке любого научного института непременно отыщется подходящая литература как общеобразовательного, так и специального характера. В то же время существует громадная область физических

знаний, практически не отраженная в учебных и справочных пособиях. Как это ни парадоксально, речь идет о технике современного физического эксперимента.

Зачастую исследователь-физик, обладая глубокими познаниями в определенных областях техники физического эксперимента, малоопытен или вовсе не осведомлен в других. Между тем выполнение каждого нового эксперимента всегда требует видоизменения экспериментальной установки; иногда — небольшого изменения параметров, иногда существенного. Так, например, бывает необходимо добавить к установке высокий вакуум, низкие или, напротив, высокие температуры, магнитное поле, новый источник излучения или, наоборот, новый приемник, поднять чувствительность, автоматизировать эксперимент и т. д.

Перед исследователем, решившимся на кардинальное видоизменение экспериментальной установки, сразу возникает множество технических вопросов: как это сделать? какое стандартное оборудование можно при этом применить? какие узлы нужно сделать самому? каковы известные технические решения? как предусмотреть хотя бы в первом приближении поведение будущих установок? в чем состоят «слабые» места создаваемых конструкций и на что надо обратить особое внимание при их разработке? От успешного решения этих вопросов зависит как быстрота ввода в строй новых экспериментальных установок, так и их будущая надежность и долговечность. А этим определяется производительность научного труда физика-экспериментатора и, в конечном итоге, успешное развитие всей физической науки.

Автору данной рецензии, пятнадцать лет проработавшему в экспериментальной физике в одном из институтов АН СССР, неоднократно приходилось и приходится сталкиваться с по-

добными «техническими» сторонами физического эксперимента. В большинстве случаев ему удавалось получать необходимую информацию из уст своих коллег-физиков, реже — из чтения специальных журналов «Приборы и техника эксперимента» и «Review of Scientific Instruments». Однако в этих журналах обычно описываются новые оригинальные конструкции, а не устоявшиеся и проверенные временем технические решения. Следует также отметить, что в научных журналах в последние годы стало плохой модой выбрасывать из описаний экспериментов крайне важные для их воспроизведения технические детали.

В свете сказанного крайне ценным и своевременным представляется выход в свет книги А. П. Сенченкова «Техника физического эксперимента». Конечно, у нее были предшественники. Такое же название имели две монографии — Д. Стронга (пер. с англ. М., 1948) и Э. Ангерера (пер. с нем. М., 1964), ранее изданные на русском языке. Но эти книги уже во многом устарели. Кроме того, они посвящены в основном различным приемам лабораторной техники: как отшлифовать линзу, как согнуть стеклянную трубку, как сделать полосовой или отрезающий фильтр, как изготовить катод или фотозэлемент и т. д.

Рецензируемая книга выгодно отличается от предшествующих тем, что в ней (наряду с описанием различных конкретных приемов лабораторной работы, узлов установок и современных схемных решений — на примере высоковольтной техники, вакуумной техники и техники работы с ядерными излучениями) рассмотрен ряд общих методических вопросов, таких как оптимальное планирование эксперимента, оптимальный выбор времени и затрат на создание установки, необходимость и масштабы автоматизации, об-

работка экспериментальных данных, борьба с наводками и др.

Как пишет сам автор, его цель — «на ограниченном материале путем анализа накопленного опыта указать читателю на особенности данного раздела техники и помочь формированию самостоятельных решений: выбрать правильную стратегию, т. е. оптимально спланировать эксперимент, отбросить нерациональные и принять рациональные решения, определить базовое и стандартное оборудование из числа разработанных и выпускаемых промышленностью приборов и, наконец, помочь в поиске и осуществлении оригинальных технических решений там, где этого требуют обстоятельства» (с. 4). И еще одно авторское определение: «Задача этой книги — дать представление о принципах, а не набор решений, и если уж и предлагать решения, то в небольшом количестве и достаточно проверенные» (с. 127).

Естественно, что книга А. П. Сенченкова представляет большой интерес не только для сравнительно узкого круга физиков-экспериментаторов. Она принесет несомненную практическую пользу многочисленной армии специалистов, работающих в смежных с физикой областях науки и техники и использующих в своей работе методы современного физического эксперимента.

Кроме того, обсуждаемые в рецензируемой книге вопросы имеют, на мой взгляд, большую ценность и для воспитания молодого поколения физиков-экспериментаторов. Дело в том, что современное обучение студентов-физиков построено таким образом, словно профессора и доценты вузов готовят, прежде всего, замену себе, в меньшей степени — специалистов по теоретической физике и в последнюю очередь — физиков-экспериментаторов. Об этом свидетельствует громадное преобладание общенаучных и теоретических курсов над практическими занятиями. К тому же те немногие физические практикумы, в которых доводится работать студентам, далеки от современной физической лабо-

ратории и служат скорее иллюстрациями к читаемым курсам, чем средством воспитания в будущих экспериментаторах самостоятельного мышления и творческой активности.

В ряде вузов (например, в МФТИ) этот недостаток современного физического образования частично компенсируется более ранней работой студента в базовом институте. Тем не менее необходимо признать, что в большинстве случаев студенты-физики, заканчивающие вузы, обладают довольно разносторонней и глубокой теоретической подготовкой и крайне недостаточной и очень узкой подготовкой в смысле эксперимента. Книга А. П. Сенченкова, безусловно, будет служить путеводной звездой для молодых экспериментаторов.

Рассмотрим более подробно ее содержание. Глава I — вводная и посвящена общим вопросам, возникающим при создании и эксплуатации экспериментальных устройств. Основная мысль, которую проводит автор в данной главе и которая красной нитью проходит сквозь всю книгу, сводится к совету не изобретать велосипеды, а обходиться известными приборами и техническими решениями. «Быстрое и правильное решение технических вопросов, — пишет автор, — умение избежать лишнего, не жертвуя возможными установками, требует от экспериментатора зрелости, когда за кажущейся легкостью, а иногда и тривиальностью решений стоит большой опыт, огромный багаж наигранных комбинаций и тренированная мысль. Всякая «красивость» нового узла в установке должна быть оправдана, ибо его придется создавать и отлаживать с большим трудом, всякая «очевидность» решения должна быть обдумана прежде всего с точки зрения возможности нежелательных взаимодействий различных элементов и условий в установке» (с. 9).

В главе I изложены также методы автоматизации эксперимента, в том числе автоматизация поддержания параметров, изменение параметров по заданной программе, автоматизация защиты установок. В ряде случаев (даны примеры)

необходимость автоматизации физического эксперимента автором оспаривается и представляется «целесообразной и эффективной не более, чем автоматизация управления автомобилем на проселочной дороге» (с. 16).

А вот что говорится по поводу сверхавтоматизированных устройств: «Такая техника отделяет от экспериментатора объект исследования, создает обманчивую иллюзию, будто лаборант низкой квалификации с помощью супертехники может решить задачу быстрее и безошибочнее, чем ее решали ветераны экспериментальных батальонов обычных добротных приборах высокого разрешения» (с. 17).

Глава II посвящена обработке экспериментальных данных. В ней коротко рассматриваются такие вопросы, как особенности применения измерительных и регистрирующих устройств, графическая, аналитическая и машинная обработка результатов эксперимента, оценка погрешности полученных результатов.

В главе III речь идет об измерении и регистрации электрических величин. Особое внимание уделено борьбе с наводками, что крайне ценно в экспериментальном плане. Дается описание различных экспериментальных устройств, преобразующих электрический сигнал от датчика к регистрирующему прибору, таких как усилители, демодуляторы, преобразователи формы сигналов, дискриминаторы, интеграторы, пересчетные устройства, а также выходные регистрирующие и показывающие устройства.

В главе IV подробно описаны методы работы с высоким напряжением. Здесь можно найти типовые схемы высоковольтных выпрямителей (в том числе высоковольтных умножителей, высокочастотных выпрямителей, импульсных источников высоковольтного напряжения), сведения о свойствах различных диэлектриков, применяемых для изоляции высоковольтных схем, а также о приемах работы с ними. Описаны также вакуумные высоковольтные устройства, электронные и ионные ускоряющие трубки, а также сильно-

точные импульсные устройства (накопители, тиратроны, импульсные модуляторные лампы, игнитроны, искровые разрядники, тиристоры). Заканчивая главу, автор советует физикам, создающим высоковольтную технику, «стараться использовать максимальное количество проверенных решений» (с. 105).

Глава V посвящается новой технике. Это, на мой взгляд, лучший раздел книги. Подробно говорится о материалах вакуумных систем: различных металлах, резине, тефлоне, стекле, кварце, керамике. Дается характеристика типовых элементов вакуумной арматуры, таких как разъемные уплотнения, вентили, запоры, быстродействующие клапаны, кинематические вводы и т. д.

Книга написана простым, доходчивым и даже красочным языком. По сути дела она представляет собой энциклопедию методов современного физического эксперимента. Правда, пока это еще не полная энциклопедия. В настоящее время «Энергоиздат» готовит к печати вторую книгу А. П. Сенченкова, в которой будут затронуты такие вопросы, как техника высоких температур, техника высоких давлений, криогенная техника, работа с магнитным полем, оптическая и лазерная техника, техника газового разряда.

К сожалению, «Техника физического эксперимента», столь актуальная и полезная для большого круга специалистов, вышла малым тиражом (4500 экз.) и мгновенно разошлась. Хотелось бы порекомендовать издательству переиздать ее — она должна стать настольной книгой физика-экспериментатора.

## Популярно о биоакустике

О. Л. Силаева

Москва

Наша жизнь немислима без голосов животных и птиц. И тем не менее люди в век технического прогресса все



Владимир Морозов. ЗАНИМАТЕЛЬНАЯ БИОАКУСТИКА. Рассказы о языке эмоций в мире животных и человека. М.: Знание, сер. «Наука и прогресс», 1983, 184 с.

больше отдаляются от естественных звуков природы. Книга В. П. Морозова «Занимательная биоакустика» возвращает нас в прекрасный мир звуков животных. Из подзаголовка — «Рассказы о языке эмоций в мире животных и человека» — видно, что речь в ней идет не только о чисто коммуникативных функциях языка, но и об обязательном его компоненте — эмоциональном факторе.

Читатель знакомится с новой увлекательной областью на стыке биологии и физики — с одной стороны, психологии и лингвистики — с другой; областью, о существовании которой он или вообще не подозревал, или судил по отдельным публикациям, нерегулярно попадавшим на страницы научно-популярных журналов. Теперь же в литературе этого жанра появилась книга, охватывающая в большей или меньшей степени все основные разделы биоакустики.

Получив в 1956 г. «официальные права» на I Международном биоакустическом

конгрессе (США), биоакустика к настоящему времени накопила огромный фактический материал по всем группам животного мира.

Автор не только органически связывает материал по акустической сигнализации разных групп животных — от насекомых до приматов, но, что очень важно, логически переходит к голосу человека, обладающего наивысшей выразительностью и коммуникативной ценностью. Особое внимание уделено сложнейшей проблеме эволюции речи. Голос и речь человека как результат эволюционного преобразования голоса животных автор включает в число биоакустических проблем, неоднократно подчеркивая сходство звуковой сигнализации высших животных с речью человека, особенно эмоционально-выразительных свойств голоса человека и животных. Здесь можно провести большое количество параллелей.

Боевые кличи, свисты, барабанная дробь, сирены и прочие голосовые и инструментальные сигналы способствуют мобилизации готовящихся к наступлению людей, а также направлены на устрашение врага, — здесь есть сходство с сигналами угрозы у животных, которые могут предшествовать нападению. Наши далекие предки при охоте методом загона тоже использовали устрашающие крики. Это были первые попытки управления поведением животных. И в наше время не потерял силу этот древний способ. Когда нам нужно отпугнуть птиц, мы кричим им «кыш», и этот шипящий звук напоминает угрожающее шипение змеи, ежа или кошки.

Интересный аспект затрагивает автор книги, рассказывая о том, как животные подражают человеческой речи. Известны не только «говорящие» птицы: американские дрозды-пересмешники, скворцы, сойки, вороны, сороки и др., но и говорящие млекопитающие, например описанный в книге «говорящий» тюлень по кличке Гувер. Еще Дарвин писал, что животным, а также человеку свойственно подражать звукам окружающей среды. Подражания животных голосу человека

можно рассматривать как результат постоянного общения с человеком.

В нашем языке имеется большое количество слов, появившихся в результате подражания человека голосу животных и птиц. Послушайте: кукушка, чибиб, удоо, ворона, чирок-свистунок, чирок-трескунук — в названиях этих птиц отразились их голоса. Звучание таких названий бывает сходным даже в неродственных между собой языках. В настоящее время выявлены сходно звучащие названия на 30—40 языках. Это явление было открыто советскими орнитологами Г. П. Дементьевым и В. Д. Ильичевым<sup>1</sup> и названо биолингвистическими параллелизмами. В настоящее время биоакустики, лингвисты и орнитологи ведут совместные исследования в этом направлении.

Человек подражает также звукам неживой природы. Журчание ручья, шум листвы, завывание ветра, треск деревьев послужили основой для возникновения соответствующих слов. Можно даже сказать, что большинство слов, связанных с различными звуками, являются подражательными: треск, свист, щелчок, шипение, шуршание, бульканье. Звукоподражательные слова ближе всего к языку животных, к звукам природы, хотя теперь мы уже не воспринимаем их как эмоционально-образное отражение действительности — слова эти, как и другие слова нашей речи, стали для нас словами-символами. Но у маленьких детей более непосредственное восприятие действительности, они характеризуют предмет по его самому яркому, понятному признаку, который можно услышать и воспроизвести с помощью голоса,— им еще неизвестны наши абстрактные символические понятия. Автор книги приводит здесь выразительные примеры детского словообразования на основе звукоподражания: собачка — «гав-гав», машина —

«ту-ту» или «бибика», идти — «топ-топ».

Звукоподражания были, возможно, зачаточной формой речи, они появились в процессе формирования абстрактного мышления. Вначале простейшее подражание крику птицы, затем что-то похожее на междометия типа «ку-ку», «кар-кар». Эти подражательные возгласы стали, вероятно, первыми названиями соответствующих птиц. Невелика здесь степень абстрагирования. Лишь гораздо позднее чистые звукоподражания и междометия трансформировались в настоящие слова с присущими им грамматическими категориями.

Большое внимание автор уделяет жестам и мимике человека, сопоставляя их с позами и телодвижениями животных. Ведь жесты — это как бы застывшие звуки и являющиеся дополнительным эмоциональным и информативным компонентом звуковой речи. Приведенные в книге результаты исследования голоса певцов и актеров показали, какую выразительность приобретает их голос, насколько эмоциональна звуковая картина, созданная голосом талантливого актера.

Чтобы проследить развитие жесто-мимического «языка», автор снова обращается к детям от одного до полутора лет, еще не владеющим членораздельной речью, но уже способным выразить свои эмоции с помощью «экстралингвистических знаков». В этом возрасте (это, впрочем, не чудно взрослому человеку) ребенок обнаруживает свои эмоции восклицаниями, выражающими радость, гнев, недовольство, скуку. В период становления речи ребенок часто что-то мелодично бормочет; эти звуки похожи на пение, малыш еще не говорит, но уже поет.

Таким образом, автор подводит читателя к мысли о древнейшем происхождении эмоционального языка, т. е. языка жестов, мимики, пения, естественных возгласов, выражающих радость, страх, удивление, боль, гнев. В этом ряду стоят и звукоподражания голосам животных и птиц.

Биоакустика молода и переживает период своего становления. Заимствуя методы био-

логии, физики и других наук, она только еще создает свой собственный научный арсенал, свою терминологию. Книга одного из крупных специалистов, активно работающих в биоакустике, не могла объективно не отразить этой картины. Вместе с тем она ярко обрисовала общие контуры многого из того, что уже достигнуто, и некоторые области, где находятся самые горячие точки. Правда, немало интересного осталось и за бортом книги. Поэтому очень бы хотелось увидеть ее переиздание в расширенном объеме, тем более, что, несмотря на большой тираж, «Занимательная биоакустика» в первые же часы исчезла с прилавков магазинов.

Следуя законам избранного жанра, автор пытается не просто пробудить общий интерес к новой области исследований. Молодой читатель, еще не выбравший профессию, получит возможность продумать еще один вариант. Этому читателю будут особенно интересны сообщаемые в книге сведения об основных центрах, где ведутся исследования по биоакустике, о местонахождении крупнейших фонотек с записями голосов животных.

К числу чрезвычайно полезных следует отнести сведения и другого рода — о приоритетных работах советских ученых — основателей новых направлений биоакустики: В. Р. Протасова (биоакустика рыб), В. Д. Ильичева (биоакустика птиц) и др. «Это несомненная заслуга автора,— пишет в предисловии к книге академик Е. М. Крепс,— так как поистине достижения отечественной науки в этой области столь же велики, как мало известны широким кругам читателей». Продолжая эту мысль, следует, может быть, напомнить, что именно в СССР с 1966 г. впервые в мире создан и читается университетский курс биоакустики и на базе этого курса издательством «Высшая школа» уже несколько лет тому назад выпущен первый учебник<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Дементьев Г. П., Ильичев В. Д. Голос птиц и некоторые аспекты его изучения.— В сб.: Орнитология. М., 1963, вып. 6.

<sup>2</sup> Ильичев В. Д. и др. Биоакустика. М., 1975.

---

 Физика

**ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ СТРУКТУРА МАТЕРИИ.** Под ред. Дж. Малви. Пер. с англ. В. П. Павлова, Ю. Г. Рудого. Под ред. и с предисл. А. Д. Суханова. М.: Мир, 1984, 312 с., ц. 80 к.

За последние 10—15 лет произошел коренной пересмотр наших представлений о структуре материи. Упрочились и развились получившие экспериментальные подтверждения представления о кварках как о составных частях нуклонов и других сильновзаимодействующих частиц. Появилась новая теория ядерных сил, которая, несмотря на свою незавершенность, уже дает гораздо больше подтверждаемых опытом предсказаний, чем старая. Электромагнитные и слабые силы были сведены в единую систему на основе модели, получившей в настоящее время почетный титул «единой теории электрослабых взаимодействий». Промежуточные бозоны, переносящие, согласно этой теории, слабые взаимодействия, были обнаружены в 1983 г., окончательно подтвердив правильность выработанного общего подхода к описанию элементарных частиц и их взаимодействий. На этом уже испытанном пути предпринимаются попытки совершить «великое объединение» сильных и электрослабых взаимодействий, которые привели к очень интересной модели эволюции Вселенной на самых ранних ее этапах. И наконец, обозначились перспективы «суперобъединения», в котором найдут себе место и гравитационные силы. Достиженные успехи были бы немислимы без современных ускорительных установок и детекторов, которые по своим размерам и стоимости оставили далеко позади все остальные инструменты экспериментальной физики.

Даже столь сжатое перечисление открытий, совершен-

ных в физике высоких энергий за последние годы, дает представление о том потоке информации, который обрушился на всех, кто интересуется достижениями современной научной мысли. Разобраться в этом водовороте событий очень непросто. Настоящая книга предоставляет читателям возможность узнать об этих событиях и свершениях непосредственно от их участников. В ее основу положены публичные лекции, прочитанные в 1980 г. в Оксфордском университете видными специалистами в области физики элементарных частиц — А. Саламом, М. Гелл-Маном, Д. Уилкинсоном, Р. Пайерлсом, К. Льюэлином-Смитом, Д. Перкинсом, Дж. Эллисом и Дж. Адамсом. «Написанные буквально по «горячим следам», эти лекции ярко показывают, какие усилия — как технические, так и интеллектуальные — потребовались для решения загадок, поставленных перед наукой миром элементарных частиц», — пишет в предисловии редактор русского перевода А. Д. Суханов.

---

 Физика

**М. Саложников. АНТИМИР — РЕАЛЬНОСТЬ?** М.: Знание, сер. «Наука и прогресс», 1983, 176 с., ц. 30 к.

Мы являемся свидетелями взаимопроникновения идей физики микромира и космологии. Этот процесс ярко проявляется в развитии наших представлений о проблеме антивещества, которой посвящена популярная книга физика из Дубны М. Г. Саложникова. Как пишет в предисловии Б. М. Понтекорво, эту проблему можно сформулировать в виде «детского» вопроса: почему наш мир состоит из материи, а не из антиматерии, в то время как все элементарные частицы имеют своих двойников — античастицы.

В последнее время в связи с развитием космологии и теорий, описывающих поведение элементарных частиц при сверхвысоких энергиях, стал вырисовываться ответ на этот вопрос. Была предложена красивая схема, в которой шаг за шагом прослеживается процесс возникновения избытка вещества над антивеществом в нашей Вселенной после Большого взрыва. Для этого пришлось призвать на помощь обнаруженное 20 лет назад Дж. Кроинином и В. Фитчем нарушение CP-четности и пойти на такой решительный шаг, как отказ от необходимости сохранения барионного заряда.

Последнее обстоятельство несколько ослабляет нашу уверенность в стабильности мира, поскольку ведет к возможности распада протона — одной из трех частиц, из которых фактически построено все вещество в окружающей нас Вселенной. Правда, возможность такого распада содержится в современных моделях, сводящих воедино сильные, слабые и электромагнитные взаимодействия — так называемых теориях великого объединения.

Обсуждению всех этих идей и посвящена, в основном, книга М. Г. Саложникова. Однако вначале автор переносит нас к истокам, очень живо излагая возникновение самих представлений об антивеществе, историю открытия первых античастиц, и по ходу дела рассказывает о тех замечательных людях, которые разработали идею Антимира.

Книга адресована широкому кругу читателей, интересующихся развитием физики элементарных частиц и космологии.

---

 Биология

**В. И. Гевало. ПАРАДОКСЫ ИММУНОЛОГИИ.** М.: Знание, сер. «Народный университет. Естественно-

научный факультет», 1983, 168 с., ц. 55 к.

Иммунология — наука о биологической индивидуальности, одна из самых бурно развивающихся и потому необыкновенно увлекательных областей современного естествознания. Автор не случайно назвал свою книгу «Парадоксы иммунологии»: их в иммунологии было много с самого начала ее развития, ими полон и сегодняшний день. Рассказывая о современных проблемах, будь то роль тимуса (маленькой вилочковой железы) или иммунологический парадокс при беременности, разбирая вопросы, связанные с трансплантацией или с возникновением опухоли, автор неизменно выделяет те горячие точки, которые вызывают самые живые дискуссии.

В книге много истории. И здесь автор обращает наше внимание на то, как в иммунологии парадоксы постепенно превращались в парадигмы и как одни парадигмы сменялись другими.

В самом начале книги автор говорит о парадоксе другого рода — парадоксе современного научного языка. Существует грустная шутка, что в иммунологии один специалист не понимает другого. Все в большей степени эта наука заимствует, часто без всякой надобности, термины из английского языка. Все это не только мешает популяризации иммунологии, но и задерживает развитие самой науки.

Новая книга В. И. Говало «Парадоксы иммунологии», предназначенная для самого широкого круга читателей, — наглядный пример того, как можно легко и доступно рассказать о самых сложных проблемах этой увлекательной науки.

#### Охрана природы

А. В. Яблоков, С. А. Остроумов. ОХРАНА ЖИВОЙ ПРИРОДЫ: ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ. Под ред. Н. Ф. Реймерса. Рец. В. Е. Флинт. М.: Лесная промышленность, 1983, 269 с., ц. 1 р. 30 к.

Об охране природы сейчас говорится очень много. Од-

нако, как это ни странно, до сих пор многочисленные природоохранные проблемы не систематизированы, не выделены главнейшие из них, а при таком положении планомерные действия затруднены. Этот пробел и заполняет новая книга А. В. Яблокова и С. А. Остроумова. Написанная на основе анализа огромного числа зарубежных и отечественных исследований, она составлена из двух частей: в первой четко определены основные проблемы, а во второй сделана попытка показать пути их решения.

Оказывается, все проблемы охраны природы можно объединить в следующие группы: 1) по уровням организации жизни; 2) по географическим зонам и типам ландшафтов; 3) по таксономическим группам; 4) по факторам воздействия на живые организмы и причинам вымирания. В каждой из этих групп основные проблемы не только выявлены; изложены также и последствия, которые могут возникнуть, если не начать действий по их предупреждению или устранению.

Однако только в эти четыре группы вся охрана живой природы не укладывается: существуют еще проблемы экономические, организационно-правовые и экологического прогнозирования.

Во второй части книги, предваряя рассмотрение важнейших путей в решении природоохранных проблем — от сохранения естественных местобитаний до создания генетических банков, авторы пишут: «Иногда эти пути уже видятся достаточно ясно, порой же с трудом намечаются лишь принципиальные их контуры». В последней главе говорится о связи охраны природы с конкретными биологическими исследованиями; главная роль в решении кардинальной проблемы взаимоотношения человека и биосферы отведена биогеоэкологии.

В книге, которую сами авторы адресуют не только ученым, занятым охраной природы, но и специалистам, чья деятельность затрагивает живую природу, много схем, таблиц и графиков, которые наглядно подтверждают мысли авторов.

#### География

П. Ф. Швецов, А. Ф. Зильберборд. ПОД ЗЕМЛЮ, ЧТОБЫ СБЕРЕЧЬ ЗЕМЛЮ. Отв. ред. В. М. Мостков. М.: Наука, сер. «Человек и окружающая среда», 1983, 144 с., ц. 55 к.

Какие перспективы открывает перед людьми хозяйственное освоение подземного пространства? В интересной популярной книге П. Ф. Швецова и А. Ф. Зильберборда рассказывается, что под землей можно строить специальные камеры для размещения электростанций, складов, создавать резервуары для хранения нефти и газа.

Особенное внимание авторы уделяют важной проблеме использования пространства, которое образуется в результате подземных горных работ. Читатели познакомятся с примерами великолепного использования выработок. В частности, как бы выбывают с экскурсией на Криковском винзаводе в Молдавии, представляющем собой своеобразный подземный город с улицами шириной около 6 м и протяженностью в 20 км; в Среднем Поволжье, где в выработках известняковой шахты создан крупный холодильник, рассчитанный на хранение 15 тыс. т мяса; в больницах и санаториях, построенных в старых соляных рудниках.

В книге показана высокая экономичность камерно-столбовой системы отработки месторождений, при которой на подземных работах применяется мощная самоходная техника, достигается большая производительность труда. В то же время камеры шириной от 5 до 30 м могут использоваться как самые лучшие хранилища и помещения для разнообразных производств.

Очень живо описывают авторы, например, историю освоения подземного пространства в VI—XIII вв., когда строились подземные монастырские крепости в Грузии и Армении.

Специальный раздел книги посвящен освоению подземного пространства городов. Это сфера будущего размещения складов, рынков, гаражей, магазинов, коммуникационных путей, т. е. всего того, что обезображивает пейзаж и отравляет атмосферу. И в настоящее время в нашей стране подземное про-

странство городов используется не только для сооружения метроролитена и подземных переходов. Так, магазины на Калининском проспекте в Москве снабжаются товарами по подземному тоннелю, там же под землей построены склады, небольшие гаражи, подсобные и технические помещения. К сожалению, подземное строительство в городах, как объясняют авторы, осложняется и удорожается из-за наличия под землей водопровода, канализации, теплотрасс, электрокабелей. Это заставляет увеличивать глубину подземных сооружений.

Книга дает представление о важности проблем использования подземного пространства, в ней намечены пути к их решению.

Академик **М. И. Агашков**,  
**В. С. Сидорова**,  
кандидат технических наук

Москва

#### Археология

**Ю. Л. Щапова. ОЧЕРКИ ИСТОРИИ ДРЕВНЕГО СТЕКЛОДЕЛИЯ.** М.: Изд-во Моск. ун-та, 1983, 200 с., ц. 2 р. 50 к.

До сравнительно недавнего времени древнее стекло (это понятие объемлет период с момента зарождения стеклоделия до конца XVII в.) изучалось главным образом в историко-художественном и историко-культурном аспектах. Ю. Л. Щапова — историк-археолог по образованию — прошла специальную подготовку на специальных факультетах МГУ и разработала собственную методику исследования древнего стекла, включающую правила определения его химического типа, видов использования сырья, приемов составления шихты и т. п. В книге исследован огромный археологический материал, описана история возникновения и развития стеклоделия, формирование разных школ, восстановлена технология древнего стекловарения (от составления шихты до воссоздания инструментов, приемов и методов изготовления изделий).

Автор доказывает, что по составу шихты и технологии изготовления изделий можно достаточно достоверно судить

о степени развития добычи различных полезных ископаемых в древности и об уровне развития производства. Точный химический анализ древнего стекла проливает также новый свет на экономические связи, существовавшие в тот или иной период, поскольку позволяет с большой степенью вероятности проследить путь изделий от места находки до места их изготовления и т. п. Наконец, предложенная Ю. Л. Щаповой методика дает возможность определять подделки под древнее стекло. Все это делает специальную историческую монографию интересной для довольно широкого круга читателей.

#### История науки

**В. Чолаков. НОБЕЛОВИТЕ НАГРАДИ: УЧЕНИ И ОТКРИТИЯ.** 1901—1982. Физика, химия, физиология и медицина. София: Партиздат, 1983, 328 с.

Нобелевским премиям по науке посвящена новая книга научно-популярной серии «Горизонты» издательства Болгарской коммунистической партии «Партиздат». Автор книги — болгарский биолог и историк науки Валерий Чолаков — интересно рассказывает о жизни и деятельности А. Нобеля, создании Нобелевского фонда и организации Нобелевских комитетов, приводит статистические данные о присуждениях премий: с 1901 по 1982 гг. Нобелевской премии удостоены 355 ученых, в том числе 121 — по физике, 99 — по химии, 135 — по физиологии и медицине.

Основная часть книги посвящена популярному описанию достижений современного естествознания, точнее, тех его направлений, представители которых отмечались Нобелевской премией. Таким образом, рассказывается о деятельности более 700 ученых, из которых половина — нобелевские лауреаты.

Впервые в одной книге сделан обзор всех научных открытий, удостоенных Нобелевской премии. Книга снабжена указателем имен, поэтому мо-

жет быть использована как справочник по Нобелевским лауреатам. Приложенный список литературы позволяет читателю воспользоваться источниками более подробной информации, среди которых, к сожалению, мало названий на русском языке. Кроме этого, к числу недостатков книги следует отнести отсутствие иллюстраций, хотя публикация портретов в этом случае должна была бы рассцениваться не как украшение издания, а как необходимость.

**В. М. Тютюнник**

Тамбов

#### ПОПРАВКА

В № 5 (1984) легенду к рисунку на с. 23 следует читать:

-  Ультрабазиты
-  Второй и третий слои океанической коры
-  Основные вулканиты
-  Метаморфические сланцы
-  Кремнисто-глинисто-карбонатные отложения
-  Рифовые известняки
-  Кремни
-  Флиш
-  Зоны переплавления пород
-  Граниты

## Вариации на тему «Уральских напевов»

«Уральские напевы» получили свое название не по географическому признаку. Это цикл мелодий, сочиненных электронно-вычислительной машиной «Урал» по программе, разработанной автором публикуемых ниже очерков.

Вот уже 25 лет Р. Х. Зарипов занимается машинным моделированием творческих процессов в области музыки. Его по праву можно считать одним из первопроходцев этого направления, входящего в разработку проблем искусственного интеллекта — наиболее динамично развивающейся отрасли кибернетики.

Результаты, полученные Р. Х. Зариповым, носят фундаментальный характер и привлекают широкое внимание и в нашей стране, и за рубежом. Наиболее подробно эти результаты изложены в его монографиях: *Кибернетика и музыка*. М.: Наука, 1971; *Musica con il calcolatore*. Padova: Muzzio, 1979; *Машинный поиск вариан-*

тов при моделировании творческого процесса. М.: Наука, 1983. Кроме того, перу Р. Х. Зарипова принадлежит большое число специальных и популярных статей, а также популярная брошюра «Кибернетика и музыка», вышедшая в издательстве «Знание» в 1963 г. (в 1967 г. она переведена в Болгарии, а в 1969 г. — в США).

В очерках, с которыми предстоит познакомиться читателям «Природы», Р. Х. Зарипов почти беллетристично и с присущим ему юмором рассказывает о различного рода обстоятельствах, сопутствующих его сложной и трудоемкой работе.

Член-корреспондент АН СССР Г. С. Поспелов, председатель секции «Искусственный интеллект» Совета по комплексной проблеме «Кибернетика» при Президиуме АН СССР

**Р. Х. Зарипов,**  
кандидат физико-математических наук

Москва

### МНЕНИЯ, МНЕНИЯ, МНЕНИЯ... О МАШИННОЙ МУЗЫКЕ

«Страшно не то, что машина сочиняет музыку. Страшно то, что есть люди, которые принимают это за музыку», — так писал литератор Б. А. Бялик, известный в прошлом критик и противник исследований художественного творчества методами кибернетики<sup>1</sup>.

Что же это за люди, так напугавшие Б. А. Бялика? В фильме «Ищу законы творчества» (Центрнаучфильм, 1966, режиссер А. Буримский) показано, как Тихон Николаевич Хренников играет на рояле музыкальную пьесу, сочиненную машиной «Урал-2», и комментирует ее: «Так! ...Вообще мелодия приятная. Напоминает прелесть детского примитива. Когда у нас юные музыканты пытаются сочинить музыку, они сочиняют приблизительно такую».

Во Всесоюзном Доме композиторов 5 октября 1967 г. состоялся тематический вечер «Музыка и наука», где выступал и я и где был показан упомянутый выше фильм. Вначале музыковеды, устроители вечера, сомневались, удобно ли в таком доме проигрывать машинную музыку. Но увидев на экране Хренникова, решились.

Машинные мелодии в тот

вечер исполнялись на кларнете и виолончели. Одну из мелодий виолончелистке В. Яглинг пришлось по просьбе председательствующего — композитора Г. С. Фрида — сыграть дважды. В ответ на вопрос, как профессионалы оценивают машинную музыку, Григорий Самуилович сказал: «Музыка вполне качественная. Я не случайно просил повторить первую мелодию — это вполне профессиональная музыка, несмотря на то что исполнение одноголосно. Если ее оркестровать, то она ничем не будет отличаться от профессиональной. И не всякий профессиональный композитор может похвастаться такими удачами»<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Бялик Б. В чем же смысл пятилетней дискуссии? — Звезда, 1965, № 4, с. 193.

<sup>2</sup> Цит по: Гутчин И. Б. Кибернетические модели творчества. М., 1969, с. 49.

В феврале 1963 г. председатель Симпозиума по комплексному изучению художественного творчества литератор Б. С. Мейлах, увидев, что я собираюсь во время доклада играть на виолончели мелодии, сочиненные машиной «Урал», категорически запротестовал: «Это может скомпрометировать идею симпозиума». Однако А. Н. Колмогорову и И. А. Полетаеву, присутствовавшим при нашем разговоре, удалось переубедить его, и участники симпозиума услышали «кромольную» музыку. Вопреки опасениям Бориса Соломоновича, ничего «страшного» не случилось, и, довольный этим, он говорил мне в перерыве: «Ну, спасибо, вы внесли оживление в работу симпозиума».

Однажды во время кибернетической конференции показывали научно-популярные фильмы. В одном из них («Кибернетика ставит задачи») звучали довольно приятные и знакомые мне мелодии. Я как-то не сразу сообразил, что это моя машинная музыка, а потом все понял: фильм выпущен Киевской студией, режиссер — Ю. И. Аликов. За несколько лет до этого (году в 1962-м) он приехал в Москву, чтобы договориться со мной об использовании машинных мелодий в фильме о кибернетике, который собирался снимать, и обещал указать мою фамилию в титрах. Ноты он от меня получил, но, как это нередко бывает, от своего обещания забыл. Что музыка моя все-таки была использована в фильме, узнал я совсем случайно, но результатом оказался весьма доволен: мои «Уральские напевы», которые я не сразу признал, мне понравились.

Машинная музыка, моделирующая мелодии композиторов, должна быть похожа на них. Многие воспринимают такое сходство как недостаток, не понимая, что это критерий правильности принятых принципов моделирования:

«Я слышал эту музыку — несколько вполне грамотных пьес для виолончели, и некоторые из них доставили мне удовольствие. Правда, когда слушаешь эти пьесы, то кажется, что слушаешь уже знакомую музыку известных композито-

ров. Но такое иногда случается, даже когда присутствуешь на концерте живого композитора...»<sup>3</sup>

«Мы слышали эту музыку электронного композитора. Зарипов сам прекрасно исполнял ее на виолончели. Она звучит вполне профессионально и, к сожалению, очень похожа на ту, что часто приходится слышать по радио»<sup>4</sup>.

А вот что пишет И. Грекова по поводу одной из телепередач, посвященных машинному творчеству: «Зрители не были предупреждены о том, что передачу сопровождает машинная музыка; им об этом сообщили только в самом конце. И что же? Практически никто не заметил в музыке ничего особенного, не заподозрил ее «нечеловеческого» происхождения (впрочем, никто специально не отмечал и каких-либо особых художественных ее достоинств). Во всяком случае музыка воспринималась как вполне «нормальная», не отличающаяся от обычного музыкального сопровождения телепередач...»<sup>5</sup>

И еще одно мнение: «Можно считать, что в среде профессиональных музыкантов и музыковедов в настоящее время почти утвердилось представление о позитивном значении кибернетического моделирования музыки для развития и совершенствования наших взглядов о природе музыкального творчества и его закономерностях»<sup>6</sup>.

А теперь давайте забудем немного вперед и попробуем представить завтрашний день ЭВМ-музыкантов.

Выдающийся педагог и пианист Г. Г. Нейгауз высказал интересную мысль. В статье, посвященной подготовке ко Второму конкурсу имени П. И. Чайковского 1962 г., он, в частности, говорит о том, что объективности оценки исполнения на конкурсах музыкантов могут помочь кибернетические машины, способные воспринимать и анализировать музыкальное исполнение: «Быть может, в наш век кибернетики недалек тот день, когда главную роль в суждениях и оценках исполнительских достижений на конкурсах будут выполнять высокоорганизованные ... электронно-счетные машины, конечно, при содействии и соучастии людей-музыкантов... Между прочим, я ожидаю от этих будущих машин той точности и безошибочности, на которую люди неспособны»<sup>7</sup>.

Хочется привести и другие его слова, как будто специально адресованные негативистам, которые до сих пор боятся проникновения количественных методов в исследование музыки и уверены в непознаваемости механизмов творчества, «тайн» искусства, хотя и «признают» всеобщую познаваемость мира (как говорится: «Легко полюбить все человечество, а ты полюби своего соседа»):

«И чем больше он (пианист.— Р. З.) сумеет привести свои знания к точным формулировкам, имеющим силу закона, хотя бы и отдаленно приближенным к математическим, тем прочнее, глубже и плодотворнее будет его знание. Кто с этим сразу же не согласится, тому помочь нечем.

И пусть не беспокоятся те, кто так дорожит «тайной» искусства; тайна искусства, непознанная, остается во всей своей силе, во всем объеме, совершенно так же, как в жизни. Только не надо видеть «непознаваемое» там, где здравый смысл, «перед которым мы так грешны», прекрасно все может понять»<sup>8</sup>.

<sup>3</sup> Хургин Я. И. Ну и что? М., 1967, с. 271.

<sup>4</sup> Католин Л. Кибернетические путешествия. М., 1967, с. 88.

<sup>5</sup> Грекова И. Полемика и ее издержки (по поводу спора «машина и творчество»).— Кибернетика. Современное состояние. М., 1980, с. 196.

<sup>6</sup> Завадский С. А. Теория и практика «машинного искусства».— В кн.: Искусство и научно-технический прогресс. М., 1973, с. 392.

<sup>7</sup> Советская музыка, 1962, № 3, с. 113.

<sup>8</sup> Нейгауз Г. Г. Об искусстве фортепианной игры. М., 1967, с. 104.

## СПОР: ЭВМ — КОМПОЗИТОРЫ

Это был спор достойных соперников. О сложных его перипетиях рассказывает В. Орлов в романе «Альтист Данилов»:

«Устный журнал уже начинали [...] Встал худой подвизный человек в сатиновых наруканниках, по виду бухгалтер, но на самом же деле конструктор машины, писавшей музыку, Лещов [...]»

— А теперь мы попросим, — сказал конструктор Лещов, — солиста театра товарища Данилова Владимира Алексеевича сыграть нам на скрипке шестнадцать пьес, восемь из них написала машина, восемь люди с консерваторским образованием. А потом пусть уважаемая публика и ученые умы определят, что писала машина [...]»

Люди посмелее выкрикивали с места, что первые три, а больше машина ничего не писала. Встал юный лаборант и сказал, что, напротив, все сочинила машина, и она же все сыграла, а солист из театра вынул смычком для видимости под фонограмму, как это делается на телевидении. Лаборант стал срамить, обозвали дураком, технократом, козлом нечесанным, хотели запретить ему смотреть «Серенаду солнечной долины». Ученые умы, сидевшие за столом, тоже склонялись к тому, что машина сочинила первые опусы. Спросили Данилова, что он думает. Он сказал, что он ничего не думает. Тогда Лещов с торжеством, с каким принцесса Турандот объявляла ответы на загадки, гибельные для ее женихов, сказал, что машина написала пьесы вторую, четвертую, пятую, восьмую и с десятой по тринадцатую. Зал затих, пристыженный<sup>9</sup>.

Эксперимент, со знанием дела описанный в романе В. Орлова, действительно проводился, и вот зачем. Исследования по моделированию музыкального творчества на ЭВМ ведутся для выявления его скрытых закономерностей, о которых было бы опрометчиво судить по види-

мым связям. Приведем поясняющий пример на тему «В мире животных»:

Наблюдение: бык при виде красной тряпки бесится.

Вывод: беспокойство быка вызывается красной тряпкой.

На самом же деле красная тряпка раздражает не быка, а корову. Бык же бесится оттого, что его принимают за корову.

Необходимым этапом моделирования является массовый эксперимент по сравнительной оценке мелодий, сочиненных машиной и композиторами.

Я-то догадывался, что мои «Уральские напевы» не хуже многих мелодий, которые сочиняют композиторы — не только самодеятельные, но и профессиональные. Но мне хотелось получить подтверждение этому в массовом эксперименте — ведь я мог и ошибаться.

Из опубликованных песенных сборников я отобрал восемь малоизвестных мелодий советских композиторов и столько же мелодий, сочиненных машиной «Урал-2». Но слушать да еще оценивать 16 неизвестных мелодий утомительно, поэтому «для разрядки» я добавил еще 4 популярные мелодии. Мелодии я проигрывал в произвольном порядке, неизвестном слушателям-экспертам, которые должны были каждую из них оценить по пятибалльной системе и оценки записать на бланках-протоколах.

Эксперимент проводился в разных аудиториях слушателей, всего в нем участвовало более 600 человек, и среди них профессиональные музыканты.

До объявления результатов некоторые из экспертов высказывались весьма категорично: «Вся машинная музыка — не музыка, нет чувства»; «Да чтобы я не отличил машинную музыку от человеческой?!»; «Много чрезмерно периодических, туповато-машинных тем». Но — ирония судьбы — именно эти эксперты оценили машинную музыку выше, чем музыку композиторов. Уже узнав о результатах, некоторые утверждали, что, мол, все ясно: человеческие мелодии выбраны «серые», даже «бездарные», а машинные — «хорошие». Подобные заявления ставят критиков в невыгодное положение. Не с

музыкой самодеятельных сочинителей предлагают они сравнивать машинные мелодии, а, например, с мелодиями Шуберта. Что же это как не признание высоких достоинств машинных мелодий?

Мелодии композиторов в эксперименте — независимо от их качества — это результат того вида деятельности, который применительно к человеку называется творчеством. А работа заключалась в моделировании творчества. Призная это, музыковеды — участники эксперимента и дискуссии на симпозиуме «Проблемы художественного восприятия» (Ленинград, 1968 г.) — говорили, в частности, что «проведение экспериментов такого рода заставит некоторых композиторов-песенников более ответственно отбирать свои мелодии в сборники песен, не полагаясь только на то, что мелодию «вывезут» его известное имя, удачные слова песни или исполнение модного певца, и о том, что «стыдно должно быть тем композиторам, чьи мелодии оценивают хуже, чем машинные».

С этими мнениями вполне солидарен и А. А. Нуйкин: «Издательству «Музыка» и приемной комиссии Союза композиторов есть о чем задуматься в итоге данного эксперимента. И тоже предлагает брать «мелодии бесспорно талантливых композиторов и с ними проводить сопоставление»<sup>10</sup>. Пусть и не с Шубертом, но тоже приятно.

Но тут опять заковыка — поди узнай, как выявить «бесспорно талантливого композитора», если нет табеля о рангах. А судьи кто? Ведь люди с восторгом слушают и романсы Чайковского и песни А. Пугачевой. Мне вспомнилось, как писал П. И. Чайковский: «Иногда в музыке нравится что-то совсем неуловимое и неподдающееся критическому анализу. Я не могу без слез слышать «Соловья»:

<sup>9</sup> Орлов В. Альтист Данилов. М., 1981, с. 48—53.

<sup>10</sup> Нуйкин А. А. О критических критериях в искусствоведении. — В кн. Искусство и точные науки. М., 1979, с. 57.

Алябьев!!! А по отзыву авторитетов, это верх пошлости<sup>11</sup>.

Интересно и отношение к популярным мелодиям, которые я проигрывал в эксперименте. На мой вопрос: «Почему вы поставили «тройку» за мелодию булаховского «Свидания»? — один эксперт ответил: «Я не люблю Козловского» (!?)

Или возьмем знаменитую «Мурку». Мелодия интересная, насыщенная бытующими интонациями, но многие оценивают ее низко. «Почему же «Мурке» ставят двойки и даже единицы?» — спросил я, обращаясь в зал. Мне ответили: «Потому что эта пошлая, блатная песня». Но причем тут «песня», ее слова, если требовалось оценить лишь одну мелодию? И, оказывается, очень трудно — подчас невозможно — отвлечься от всего комплекса ассоциаций, связанных с определенной мелодией.

Весьма показателен «плебисцит», проведенный по первой программе Всесоюзного радио 29 июня 1976 г. Результат опроса в отношении одной из машинных мелодий превзошел все мыслимые ожидания. Авторы 125 писем из 130, поступивших

в редакцию, были твердо убеждены, что эта мелодия написана композитором. В своих письмах они отмечали, что в этой мелодии «чувствуется душа», «она пленяет слух, проникает в сердце», что «можно слушать ее много раз, и она не надоеет», что, «конечно же, такую музыку мог написать только человек», что «никакая машина не сможет заменить человека в этом тонком творческом процессе, и не надо пытаться это делать».

Подобные плебисциты и примерно с такими же результатами были проведены на радио 25 августа 1973 г. и 15 июля 1980 г.

Пора пришла — вернемся хоть ненадолго к «Альтисту Данилову». На этот раз — расшеять возможные иллюзии читателей в отношении прототипов его героев.

Мне достоверно известно (есть свои люди в «Музыке»), что заглавный герой — лицо не вымышленное. Его прототип — артист оркестра Большого театра, тоже альтист, его однофамилец и друг автора романа. С этим дело ясное.

Теперь о другом герое. Если читатели думают, что «конструктор машины, писавшей музыку, Лещов» — это я, то они заблуждаются. «Подвижный человек в сатиновых нарукавниках, по виду бухгалтер», — не я,

а И. Б. Гутчин, что мне удалось установить «дедуктивным» методом.

Дело, видите ли, в том, что не я, а он проводил такой эксперимент 16 декабря 1970 г. во время своей лекции «Кибернетика и искусство» для артистов Большого театра, о которой и мог знать автор романа от прототипа заглавного героя. Эксперимент, правда, получился урезанным, И. Б. Гутчин показал не все 20 мелодий, как это делаю я, а только 16, как в романе, — 8 человеческих и 8 машинных, убоявшись, что в оперном театре неправильно поймут «Мурку» и другие подобные мелодии. А поскольку к тому же Израиль Борисович не умеет играть на виолончели (равно как и на трубе), то по моим «скрипичным» нотам вынужден был играть скрипач из оркестра.

Результат эксперимента уже знаком читателю по приведенному выше отрывку из романа. После упомянутой лекции — совсем как в романе — началась дискуссия, искусство направляемая И. Б. Гутчиным. Вконец растроганные, как писала газета Большого театра «Советский артист» (от 12 марта 1971 г.), «артисты прямо говорили... о необходимости в театре кибернетической машины».

(Продолжение следует)

<sup>11</sup> Чайковский П. И. Переписка с Н. Ф. фон Мекк. Т. I. М., 1934, с. 19.

В номере использованы фотографии ВАСЬКОВСКОГО Ю. Т., ЛЮБИНСКОГО Е. Г., ОМЕЛЬЯНЕНКО А. А., ПОЛЯКОВА Я. Г., ЧЕГОДАЕВА А. Е., ТАСС.



— символ межправительственной программы ЮНЕСКО «Человек и биосфера» (The Man and the Biosphere). Этим символом обозначены материалы, которые журнал «Природа» публикует в рамках участия в деятельности этой программы.

Художник П. Г. АБЕЛИН  
Художественные редакторы  
Л. М. БОЯРСКАЯ, Д. И. СКЛЯР

Корректоры:  
Э. А. ГЕОРГАДЗЕ, Т. Д. МИРЛИС

Адрес редакции:  
117049, Москва, ГСП-1,  
Мароювский пер., 26  
Тел. 238-24-56, 238-26-33

Сдано в набор 27.04.84  
Подписано к печати 8.06.84  
Т—09666  
Формат 70×100 1/16  
Офсет  
Усл.-печ. л. 10,32  
Усл. кр.-отт. 1429,5 тыс.  
Уч.-изд. л. 15,6  
Бум. л. 4  
Тираж 53 400 экз. Зак. 1198.

Ордена Трудового Красного Знамени Чеховский полиграфический комбинат ВО «Союзполиграфпром» Государственного комитета СССР по делам издательства, полиграфии и книжной торговли.  
г. Чехов Московской области



## В следующем номере

Исследование почвенных карт Куликова поля, изучение и пересмотр известных письменных источников и новых архивных материалов свидетельствуют, что битва между войсками Дмитрия Донского и Мама в 1380 г. произошла на левом берегу Непрядвы.

### ЗАГАДКА КУЛИКОВА ПОЛЯ

Флоренский К. П. Где произошло Мамаево побоище?

Кучкин В. А. О месте Куликовской битвы.

Долгова С. Р. История Куликова поля в документах XVI—XVII вв.

$$T(t) = \left\{ \begin{array}{l} x^2 \rightarrow x^2 t \\ \alpha \rightarrow \bar{\alpha}(t, \alpha) \end{array} \right\}$$

$$T_\lambda = \left\{ \begin{array}{l} \beta \rightarrow \beta + \lambda \\ a \rightarrow A(\lambda, a) \end{array} \right\}$$

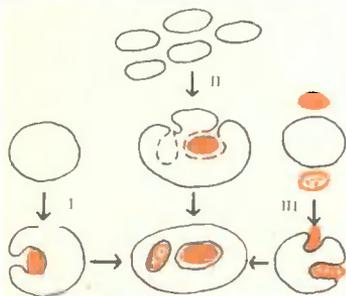
Особая группа преобразований, впервые обнаруженная в квантовой теории поля в связи с операцией устранения бесконечностей, позволяет улучшить приближенные решения уравнений многих физических теорий.

Боголюбов Н. Н., Ширков Д. В. Ренормгруппа? Это очень просто.



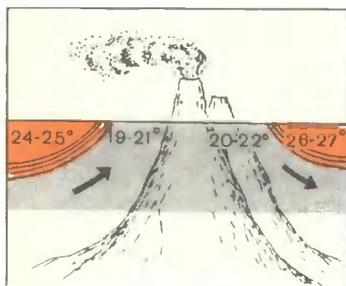
Эрнсту Геккелю в первую очередь обязано учение Дарвина победоносной поступью на Европейском континенте и бурным почкованием новых научных направлений — экологии, филогенеза, онтогенеза.

Воронцов Н. Н. Эрнст Геккель и судьбы учения Дарвина.



В развитии живой материи было три основных этапа: возникновение клетки, появление эукариот и образование многоклеточных организмов. По-видимому, в каждом из них мембраны — белково-липидные пленки — сыграли решающую роль.

Островский Д. Н. Мембраны в эволюции живого.



Проясняется загадка Эль-Ниньо, аномального потепления Тихого океана у побережья Эквадора и Перу, потепления, приводящего к уходу рыбы, гибели птиц и ухудшению погоды в этом регионе.

Федоров К. Н. Этот капризный младенец — Эль-Ниньо!

Цена 80 коп.  
Индекс 70707

