

ISSN 0032-874X

7

1986

# ПРИРОДА





## 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

Член-корреспондент АН СССР  
Р. Г. БУТЕНКО

Доктор географических наук  
А. А. ВЕЛИЧКО

Академик  
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

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

Ответственный секретарь  
В. М. ПОЛЫНИН

Доктор исторических наук  
П. И. ПУЧКОВ

Заместитель главного редактора  
академик  
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

Доктор физико-математических наук  
А. М. ЧЕРЕПАЩУК

Доктор физико-математических наук  
В. А. ЧУЯНОВ

На первой странице обложки. Снежный баран охотского подвида (*Ovis pivicola alleni*). См. в номере: Сопин Л. В., Ермолин А. Б. Снежный баран в Забайкалье может исчезнуть.

Фото И. А. Мухина.

На четвертой странице обложки. Агат. См. в номере: Ерофеев В. С., Мацуй В. М. Агаты Прииртышья.

Фото Н. Н. Алексева.

## В НОМЕРЕ

- Канторович Л. В., Фет Я. И.** Архитектура будущих ЭВМ 3  
 Архитектура существующих ЭВМ пока еще сильно отстает от возможностей, предоставляемых современной технологией. Это несоответствие можно устранить, реализуя принципы одновременной, параллельной обработки информации.
- Руденко О. В.** Нелинейная акустика: достижения, перспективы, проблемы 16  
 Как распространяются интенсивные звуковые и ультразвуковые волны в различных средах? Как влияет на них среда и как они влияют на среду? Как усилить слабый сигнал за счет энергии мощной волны? Ответы на эти и многие другие вопросы, исследуемые нелинейной акустикой в течение четверти века, сегодня важны для самых разных отраслей народного хозяйства — от рыболовства до электроники.
- Бахурин Н. Н.** Летящие ящеры 27  
 В разных частях света найдены костные остатки более чем 100 видов летающих ящеров. И каждая новая находка дополняет сведения об этих древних покорителях воздушного пространства.
- Ерофеев В. С., Мацуй В. М.** Агаты Прииртышья 37  
 В изумительном соцветии красок и разнообразии форм этих агатов отражена сложность породивших их природных процессов.
- Добрецов Н. Л.** Метаморфизм, континенты и зоны субдукции 40  
 Изучение метаморфизма, т. е. процессов преобразования пород под действием высокой температуры и давления, дает ключ к решению некоторых общегеологических проблем — таких как происхождение континентов или механизм погружения океанических блоков земной коры под континентальные.
- Цверева Г. К.** Дополнительные страницы к биографии Г. В. Рихмана. (К 275-летию со дня рождения) 52  
 Со школьных лет каждому знакомо имя русского академика Г. В. Рихмана: выдающийся физик погиб, экспериментируя с атмосферным электричеством. Менее известно, что в первые годы академической деятельности он успешно занимался картографией России.
- Новиков И. Д.** Электродинамика черных дыр 59  
 Для исследования электродинамических свойств черных дыр астрофизики рассматривают идеализированные модели и весьма абстрактные конструкции. Однако аналоги этих конструкций, правда в гораздо более сложном виде, осуществлены природой в центрах галактик и квазаров.
- Антонов А. С.** Эволюция генов растений: вызов теории «молекулярных часов» 68  
 Закономерности эволюции имеют больше сходств, чем различий, на всех уровнях организации живого. Данные геносистематики — науки, занимающейся сравнительным анализом ДНК, — позволяют утверждать, что теория молекулярной эволюции должна строиться на основе классической концепции.
- КРАСНАЯ КНИГА**
- Сопин Л. В., Ермолин А. Б.** Снежный баран в Забайкалье может исчезнуть 78  
 Хребет Кодар — последнее убежище снежного барана в Забайкалье. Но и здесь он может исчезнуть, если не создать сначала заказник, а потом заповедник.

- Авдейко Г. П., Гавриленко Г. М., Черткова Л. В.** «Вулканолог» исследует подводный факел **80**  
 Насыщенный металлами, кремнием, водородом подводный факел у о-ва Парамушир «вырывается», вероятнее всего, из расположенного на глубине 820 м подводного гидротермального источника
- Фикс В. Б., Каганов М. И.** Электролиз в металлах **88**  
 Если через электронный проводник пропускать ток достаточно долго, в нем начинается направленное движение ионов металла — электролиз. Явление, обнаруженное более ста лет назад, оказалось очень непростым, и понять его удалось лишь недавно.
- Эрдниев У. Э.** Из Центральной Азии — в степи Нижней Волги **98**  
 Монголоязычные скотоводческие племена ойратов из-за острой нехватки пастбищ и постоянных конфликтов с воинствующими соседями в XVI в. стали откочевывать из Западной Монголии к границам России. Часть их осела в Прикаспийской низменности, часть снова ушла на восток. Осевшие стали называться калмыками, что значит «оставшиеся на месте».
- ДИАЛОГ С ЧИТАТЕЛЕМ**
- Не Архимед, а Паскаль **101**
- НОВОСТИ НАУКИ** **104**
- Пролет «Джотто» через комету Галлея [104] • Международные исследования ионосферы [104] • Два стадии вспышки сверхновой звезды [105] • Еще одна загадка  $\gamma$ -всплесков [106] • Оптическая переменность ядра галактики M 33 [106] • Подтверждено существование квантовых аномалий [107] • Повышение коэффициента усиления лазерного усилителя [108] • «Сжатое» состояние света [108] • Способ «упаковки» ДНК в ядре [109] • Вирус-контрабандист [110] • Родственники или соседи? [110] • Рыбы — объекты генной инженерии [111] • Новые варианты  $\alpha$ -антитрипсина [111] • Фторуглероды влияют на ферменты печени [111] • Исследуется механизм иммунного распознавания [112] • Аминокислоты и иммунитет [112] • Причины паркинсонизма [113] • Еще одна роль феромонов [113] • Тип поведения крыс и их плодовитость [113] • Рыбы и стресс [114] • Способности вюста [114] • Как строят гнезда муравьи-ткачи [114] • Почему выжил колючий латук? [115] • Косули возвращаются [115] • Проблема сохранения однополых «популяций» птиц [116] • Земные токи и землетрясения [116] • Новый глубоководный аппарат [117] • Извержение Невадодель-Рунса [117] • Пыль Сахары над Англией [119] • Искусство ледникового периода [119]
- РЕЦЕНЗИИ**
- Киржниц Д. А.** Физик о своей науке (на кн.: В. Л. Гинзбург. О физике и астрофизике) **120**
- Заварзин Г. А.** Эволюция живой природы и состав атмосферы (на кн.: М. И. Будыко, А. Б. Ронов, А. Л. Яншин. История атмосферы) **122**
- НОВЫЕ КНИГИ** **124**
- Яблоков А. В., Остроумов С. А.** Уровни охраны живой природы [124] • **Ефремова С. В.** Магматические линии и кольца Земли [125] • **Агбунов М. В.** Загадки Понта Эвксинского. (Античная география Северо-Западного Причерноморья) [125] • **Ньютон Роберт Р.** Преступление Клавдия Птолемея [125]
- В КОНЦЕ НОМЕРА**
- Гулма Н. В.** Маховик и... антигравитация? **126**

**Продолжить создание и повысить эффективность работы вычислительных центров коллективного пользования, интегрированных банков данных, сетей обработки и передачи информации.**

Основные направления экономического и социального развития СССР на 1986—1990 годы и на период до 2000 года

## Архитектура будущих ЭВМ

Л. В. Канторович, Я. И. Фет



Леонид Витальевич Канторович (1912—1986), академик, заведовал лабораторией системного моделирования научно-технического прогресса Всесоюзного научно-исследовательского института системных исследований АН СССР и Госплана СССР. Один из основателей современной вычислительной математики и теории оптимального планирования. Автор ряда новых концепций в области программирования и архитектуры вычислительных систем. Лауреат Ленинской премии (1965 г.), Государственной премии СССР (1949 г.), Нобелевской премии (1975 г.)



Яков Ильич Фет, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Вычислительного центра Сибирского отделения АН СССР. Специалист в области теории и проектирования ЭВМ. Основные интересы — архитектура параллельных вычислительных систем, теория однородных функциональных структур. Автор монографий: Массовая обработка информации в специализированных однородных процессорах. Новосибирск, 1976; Параллельные процессоры для управляющих систем. М., 1981.

Архитектура — это искусство строить здания, сооружения и их комплексы для обслуживания социально-бытовых и идейно-художественных потребностей человеческого общества, а также и сами эти сооружения, здания, комплексы. Архитектура — искусство древнее, но в наше время этот термин применяется не только по отношению к зодчеству. С развитием вычислительных машин и систем возникло понятие архитектуры ЭВМ.

### КЛАССИЧЕСКАЯ АРХИТЕКТУРА ДЖ. ФОН НЕЙМАНА

Одним из первых архитекторов ЭВМ был Дж. фон Нейман, который в середине 40-х годов предложил структуру вычислительной машины, до сих пор используемую в подавляющем большинстве компьютеров (рис. 1). Данные, подлежащие обработке, поступают с внешних запоминающих устройств (ЗУ) в оперативное

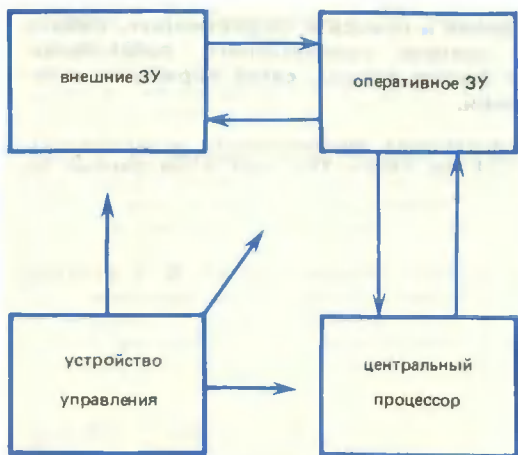


Рис. 1. Фон-неймановская архитектура.

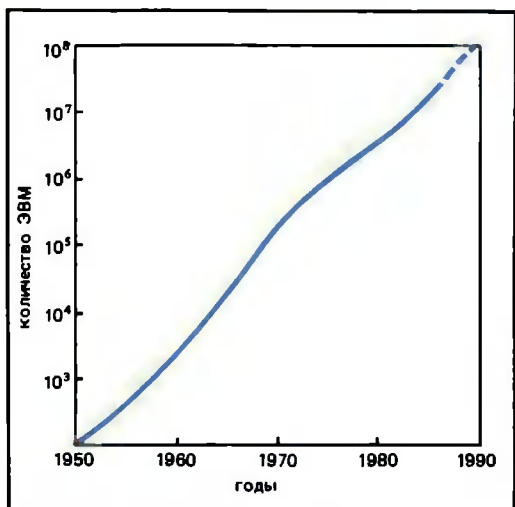


Рис. 2. Развитие мирового парка ЭВМ.

запоминающее устройство. Они кодируются двоичным кодом (в «алфавите» внутреннего языка ЭВМ только две «буквы» — 0 и 1). Туда же вводится и программа. Устройство управления считывает из оперативного запоминающего устройства очередную команду, затем в соответствии с этой командой считывает и передает в центральный процессор один или два аргумента, адреса которых указаны в данной команде. Центральный процессор выполняет над ними заданную операцию (например, сложение) и возвращает результат в оперативное запоминающее устройство.

Так, команда за командой, шаг за шагом, выполняется вся программа.

Эта классическая (фон-неймановская) архитектура оказалась весьма удачной и универсальной: любая, самая сложная и большая по объему задача, любой алгоритм обработки информации сводится к последовательному выполнению ряда команд над индивидуальными числами (двоичными «словами»).

Необходимо отметить, что в литературе последних лет под архитектурой ЭВМ понимается комплекс аппаратных и программных средств. Мы в данной статье ограничиваемся рассмотрением только аппаратной архитектуры. Такое выделение (и даже некоторое противопоставление аппаратуры программированию) оправдывается удивительным прогрессом технологии производства интегральных схем. По мнению многих советских и зарубежных специалистов, в идейном, алгоритмическом отношении аппаратная архитектура ЭВМ сильно отстает от возможностей, предоставляемых современной технологией.

В 50-е и 60-е годы происходил необычайно быстрый рост производства и применения универсальных ЭВМ фон-неймановской архитектуры (рис. 2). В те годы в журналах охотно приводили перечни сфер человеческой деятельности, в которые проникло использование ЭВМ. Сейчас составить подобный перечень невозможно. Легче назвать области, где ЭВМ не применяются. Но стоит выделить такую область и сформулировать ее проблемы, как обнаружатся неиспользуемые пока по тем или иным причинам возможности развития и усовершенствования этой области с помощью ЭВМ.

Вначале вычислительные машины были громоздкими и дорогими. Отечественная универсальная ЭВМ «первого поколения» М-20 содержала около 3000 вакуумных ламп, занимала площадь 200 м<sup>2</sup> и потребляла 100 кВт электроэнергии. Она могла выполнять 20 тыс. операций в секунду и хранить в оперативной памяти всего 4 тыс. слов. Стремительное развитие микроэлектроники, технологии интегральных схем привело к тому, что сейчас машину, подобную М-20, можно разместить на пластинке кремния размером 5×5 мм, причем она может иметь значительно большее быстродействие и емкость памяти, а потребление энергии составит доли ватта. Век ЭВМ гораздо короче человеческого. За 30 лет сменилось четыре поколения компьютеров (см. таблицу). К началу 90-х годов планируется получить опытные образцы ЭВМ



## Характеристики поколений универсальных ЭВМ

Поколение	Годы	Элементная база	Производительность, операций в секунду	Емкость оперативного запоминающего устройства, кол-во слов
I	1950—1958	Электронные лампы	20 тыс.	4 тыс.
II	1958—1965	Транзисторы	100 тыс.	32 тыс.
III	1965—1975	Малые и средние интегральные схемы	1 млн	250 тыс.
IV	1975—н. в.	Большие и сверхбольшие интегральные схемы	10 млн	2 млн

пятого поколения, с которыми пользователь сможет общаться на естественном языке. А на горизонте уже возникают очертания шестого и даже седьмого поколений...

#### ДЛЯ ЧЕГО НУЖНА НОВАЯ АРХИТЕКТУРА?

50-е, 60-е, 70-е годы. Вакуумные лампы, транзисторы, интегральные схемы... Изменяются строительные материалы, «кирпичики», а архитектура остается прежней, фон-неймановской. Собственно вычислительной работой занимается в центральном процессоре по-прежнему единственное «орудие производства» — сумматор, который, в сущности, представляет собой арифмометр, хотя — электронный и сверхбыстродействующий. Обработка данных ведется с помощью мелких (по сравнению с задачами) машинных команд (или базовых операций, как их иногда называют), например: «сложить содержимое сумматора с числом, находящимся в таком-то регистре», «сдвинуть содержимое сумматора на столько-то разрядов вправо (или влево)», «заслать содержимое сумматора в такую-то ячейку оперативного запоминающего устройства» и т. д.

Для того чтобы свести к таким операциям решение сложных, разнообразных задач, требуются все новые и новые программы, иногда — очень сложные. Создаются различные языки программирования, трансляторы для перевода программ с этих языков на языки машинных команд, а также многочисленные вспомогательные, «служебные» программы. Возникают громоздкие системы математического обеспечения ЭВМ. Так, операционная система мощной универсальной ЭВМ третьего поколения содержит сотни тысяч команд. Подобные системы часто бывают недостаточно надеж-

ными, значительную часть времени и памяти они используют для своих внутренних, системных работ.

Составление хорошей программы зависит от искусства и остроумия программиста. Соревнуясь между собой, тысячи программистов постепенно накапливают огромные «фонды программ» для решения наиболее распространенных и важных задач. Доля математического обеспечения в суммарной стоимости вычислительной системы становится все большей. Эта диспропорция все время усиливается, поскольку стоимость аппаратуры по мере совершенствования технологии и автоматизации производства уменьшается, а стоимость программирования увеличивается, так как требует использования высокооплачиваемого труда квалифицированных программистов.

Специалисты давно ощущали эту диспропорцию и предлагали использовать новые архитектурные принципы, позволяющие совершенствовать вычислительные системы за счет более интенсивного использования аппаратуры. Большинство предложений так или иначе связано с идеей одновременной, параллельной обработки различных частей задачи или различных наборов данных. Исследования по этой проблеме были начаты в нашей стране более 20 лет назад.

#### КРУПНОБЛОЧНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ЭВМ

Один из главных путей развития архитектуры ЭВМ основан на использовании специальных свойств тех или иных задач, т. е. характерных особенностей исходных данных, подлежащих обработке, и тех операций, с помощью которых производится обработка. В серьезных вычислительных и информационных задачах большинство операций имеют не индивидуальный харак-

тер, а относятся к массивам однотипных данных и сами имеют однородный массовый характер. Это свойство называют естественным параллелизмом.

Например, для того чтобы найти значение скалярного произведения двух  $n$ -мерных векторов (очень распространенная в различных алгоритмах операция!), необходимо вычислить  $n$  попарных произведений одноименных компонент этих векторов. Другой пример: при поиске объектов, обладающих заданными свойствами (типичная задача для автоматизированных систем управления, информационно-поисковых систем, экспертных систем), необходимо сравнить код заданного свойства («ключ» или «признак») с большим количеством соответствующих индивидуальных признаков, которые хранятся в описаниях рассматриваемых объектов (как говорят, в базе данных).

В машинах традиционной архитектуры решение каждой из названных задач сводится к последовательности мелких базовых операций над индивидуальными числами (словами).

При крупноблочной организации в качестве основного, элементарного объекта рассматриваются не отдельные числа или слова, а их совокупности: векторы, матрицы, таблицы и т. д. Вводятся специальные крупноблочные базовые операции над этими массовыми объектами и используются специальные аппаратные средства для параллельной, эффективной реализации таких операций. Так, для первого из рассмотренных выше примеров можно ввести крупноблочную базовую операцию «скалярное произведение» или «покомпонентное умножение», для второго — «поиск по ключу в массиве».

Если воспользоваться аналогией, то можно привести пример управления в армии. Команды там относятся не к отдельным военнослужащим, а к целым подразделениям. Если бы для выполнения какого-либо простого действия, например «поворот направо», выдавалась последовательность команд: «Иванов — направо, Петров — направо» и т. д., то это очень усложнило бы управление. В действительности командир отдает групповую команду: «Напра-во!» и весь массив (взвод, рота, батальон) быстро и одновременно поворачивает направо.

### СКОЛЬКО НУЖНО БАЗОВЫХ ОПЕРАЦИЙ?

На первый взгляд кажется, что требуется очень много разных базовых опе-

раций. Система команд современной универсальной ЭВМ содержит сотни элементарных базовых операций. Они составляют универсальный набор, из которого строятся программы для решения всевозможных задач. А мы хотим снабдить машины новыми, крупноблочными базовыми операциями специального назначения, каждая из которых решала бы некоторую специальную задачу (или вычисляла некоторую функцию) целиком! Сколько же понадобится таких базовых операций? Ведь задач и функций — огромное количество!

Оказывается, что вовсе не обязательно вводить для каждой задачи индивидуальную базовую операцию и создавать особое операционное устройство. Если посмотреть внимательно, каким образом ведется обработка при реализации распространенных вычислительных методов и алгоритмов, то окажется, что вообще существует сравнительно небольшой набор типовых приемов (так сказать, «технологий» обработки). Мы уже упоминали некоторые технологии: покомпонентные арифметические операции над векторами, поиск по признаку в массиве. Можно выделить еще несколько типовых крупноблочных базовых операций. Предположим, что мы нашли достаточно предостойный набор таких операций и построили для каждой из них соответствующее операционное устройство. Тогда, применяя в каждом конкретном случае наиболее подходящую технологию, а если необходимо, чередуя 2—3 вида обработки, можно будет быстро, «большими кусками», решать очень многие серьезные задачи, может быть — почти все.

Кстати, подобная специализация хорошо известна в промышленности. Там всегда возможны два подхода к организации процесса: предметный и технологический. Предметный — когда производство ориентировано на определенный предмет или группу сходных предметов, технологический — когда оно ориентировано на определенные технологические операции (например, литье) и возможность обеспечения этими операциями предметов любой формы и назначения.

В универсальных ЭВМ традиционной архитектуры для выполнения типовых процедур, которые мы называем крупноблочными базовыми операциями, используются стандартные подпрограммы. Тщательно составленные и отлаженные, они хранятся в «библиотеке» стандартных подпрограмм. Для того чтобы использовать некоторую стандартную подпрограмму в общей программе решения большой задачи, програм-



мист записывает «имя» стандартной подпрограммы и задает исходные данные, с которыми она должна работать.

В машинах новой архитектуры наиболее важные стандартные подпрограммы, особенно такие, которые работают над большими массивами, будут выполняться соответствующими функциональными модулями. Теперь вместо того, чтобы «вызвать» стандартную подпрограмму из библиотеки, занести в нее адреса исходных данных и запустить ее в работу, операционная система должна будет просто включить соответствующий функциональный модуль и указать ему, где расположены массивы-аргументы. Такая «аппаратная поддержка» стандартных процедур может существенно ускорить их выполнение и одновременно упростить программирование.

Но это — только первый уровень упрощения. Если аппаратура становится все дешевле, а программирование — дороже, то нельзя ли распространить принцип замены программ «железом» на задачи в целом?

Конечно, можно! Если только задачи достаточно важные. И это уже делается. Появляются специализированные процессоры, в которых не отдельные процедуры, подпрограммы, а целые задачи решаются комплексом специальных цифровых схем, а программные средства значительно упрощаются либо вообще не используются. Среди задач, для которых такие спецпроцессоры сейчас существуют или разрабатываются, можно назвать задачи обработки сигналов (преобразование Фурье), сложных информационных поисков (реляционные базы данных), решение уравнений математической физики (сеточные модели) и др. Это уже следующий уровень специализации. В аппаратуре таких спецпроцессоров широко используются функциональные модули, о которых говорилось выше. В то же время, как мы увидим, функциональные модули могут иметь и различные самостоятельные применения.

Итак, можно предположить, что разумный выбор типовых крупноблочных конструкций позволит обеспечить эффективное решение очень широкого круга задач при умеренном количестве специализированных аппаратных модулей в системе.

#### МИКРОСТРУКТУРА ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МОДУЛЕЙ

Каким образом может быть организована внутренняя структура (микроструктура) специализированных модулей? Для

понимания этих вопросов проанализируем действия человека, решающего какую-либо конкретную задачу. Скажем, при поиске нужной фамилии в телефонном справочнике человек ориентируется очень быстро. Здесь ему существенную помощь оказывает то, что фамилии абонентов предварительно упорядочены по алфавиту («лексикографически»). В списках менее громоздких, чем телефонные справочники, человек легко находит нужные фамилии (или, в общем случае, какие-либо слова), даже если они не упорядочены. При этом желательно, чтобы все фамилии были напечатаны одна под другой и начинались на одной вертикали. Скорее всего, читать весь список не понадобится: быстро пробежав взглядом лист, человек по каким-то признакам (например, таким, как длина разыскиваемой фамилии, либо — по начальной букве) сильно сокращает перебор и «схватывает» нужную информацию.

В некоторых специализированных модулях удастся промоделировать такой человеческий, «глобальный» взгляд на информационный массив. Иногда для ускорения обработки используется предварительное упорядочение (как в телефонных справочниках или словарях). В других функциональных модулях используются совсем иные подходы, не имеющие ничего общего с «человеческим».

Анализ различных крупноблочных операций над массивами показывает, что для многих из них характерна «вертикальная» технология обработки. Исходный массив представляет собой обычно прямоугольную таблицу двоичных чисел. В традиционных машинах используется «горизонтальная» технология: считываются и обрабатываются по очереди отдельные строки таблицы — слова. При «вертикальной» — берутся по очереди не строки, а столбцы («разрядные срезы»), каждый из которых подвергается определенной обработке, зависящей от того, какую операцию нужно выполнить. Такой подход позволяет значительно ускорить многие процедуры обработки массивов.

Еще одной характерной особенностью специализированных функциональных модулей является однородность, регулярность их микроструктуры, что вытекает из однородности самих массивов-аргументов. С точки зрения проектирования и производства интегральных схем, такая микроструктура значительно удобнее, чем структура с «произвольной» логикой.

Какие же основные идеи лежат в основе работы конкретных специализиро-

ванных функциональных модулей? Как устроены «строительные блоки», из которых возводятся или в недалеком будущем будут возводиться «помощники» человеческого разума? Какой может быть внутренняя структура будущих персональных компьютеров и супер-ЭВМ? Какими представлениями мыслит архитектор ЭВМ? Но — обо всем по порядку.

### «СТРОИТЕЛЬНЫЕ БЛОКИ» ЭВМ

**Ассоциативное запоминающее устройство.** В этой схеме (рис. 3) реализуется крупноблочная базовая операция «поиск в массиве по ключу». Ассоциативное запоминающее устройство представляет собой двумерную однородную структуру

(матрицу), состоящую из одинаковых клеток (ячеек). В приведенном примере оно содержит 6 строк по 4 ячейки. В каждой ячейке (изображена крупным планом в правом верхнем углу) содержится, как и в обычном запоминающем устройстве, элемент памяти для хранения одного бита информации (двоичного разряда), например триггер (Т). Кроме того, в каждой ячейке имеется «схема эквивалентности» (на рисунке обозначена символом  $\equiv$ ), которая способна сравнивать между собой два бита и устанавливать их эквивалентность:  $0 \equiv 0, 1 \equiv 1$ .

Все признаки обрабатываемого массива (точнее, их двоичные коды) записываются регулярным образом в запоминающие элементы ячеек ассоциативного запо-

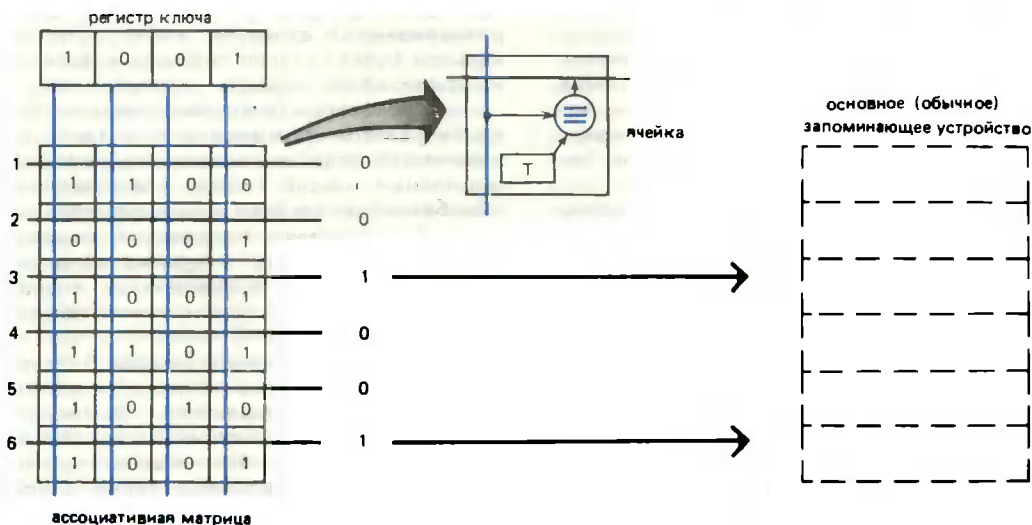


Рис. 3. Ассоциативное запоминающее устройство.

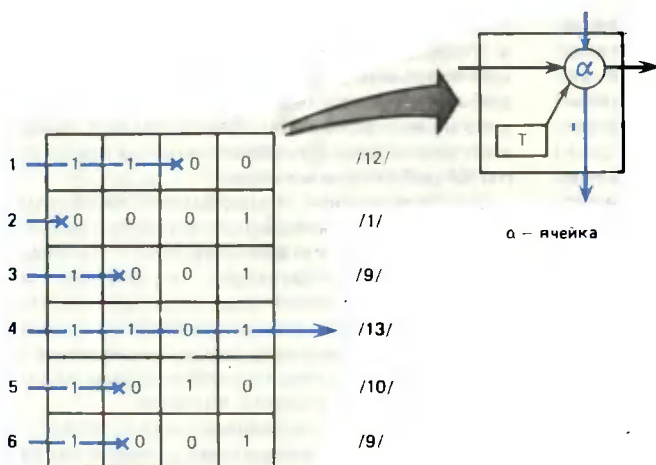


Рис. 4. Устройство поиска максимального числа [α-матрица].

минающего устройства, а в регистр ключа записывается тот признак (ключ), по которому в данный момент ведется поиск. Каждый разряд регистра ключа соединен вертикальной шиной со всеми ячейками одноименного столбца матрицы.

Данный функциональный модуль работает следующим образом. По всей матрице одновременно сравниваются хранимые в запоминающих элементах ячеек биты массива-аргумента с поступающими по вертикальным шинам (цветные линии) соответствующими битами ключа. Схемы эквивалентности всех ячеек каждой строки объединены горизонтальной шиной. Если в некоторой строке все схемы эквивалентности сигнализируют о совпадении сравниваемых битов, то на горизонтальной шине этой строки вырабатывается общий сигнал эквивалентности (например, 1). В нашем случае такие сигналы возникают в 3-й и 6-й строках, так как только в этих строках признаки массива совпадают с ключом (1001). По выработанным таким образом сигналам основная информация, хранимая в соответствующих ячейках обычного запоминающего устройства, может быть выдана пользователю или передана в другие функциональные модули для необходимой обработки.

В принципе ассоциативное запоминающее устройство позволяет за короткое время (время распространения сигналов по логическим и соединительным цепям ассоциативной матрицы) выполнить глобальный поиск в очень большом массиве. Оно может существенно ускорить решение многих задач, связанных с логической обработкой таких массивов (задачи управления базами данных).

**Устройство для выделения максимального числа.** Эта структура, выполняющая крупноблочную операцию «поиск максимального числа» (рис. 4), очень похожа на предыдущий модуль. Она также имеет по одному двоичному запоминающему элементу в каждой ячейке (крупным планом изображена в правом верхнем углу), но логическая схема этой, так называемой  $\alpha$ -ячейки иная. Отличие состоит в том, что здесь не нужен регистр ключа: если в ассоциативном запоминающем устройстве выполнялось одновременное сравнение всех кодов массива с кодом ключа, то в данной структуре происходит «внутреннее» сравнение всех элементов массива «между собой». Обратим внимание еще на одно различие. В ассоциативном запоминающем устройстве можно обрабатывать данные различных типов: в строках

матрицы и в регистре ключа могли быть числа, коды символов, знаков и т. д. В рассматриваемом же устройстве элемент массива — двоичные числа, причем предполагается, что они записаны, как обычно, старшими разрядами слева. Мы оставили в этом примере точно то же содержание массива, что и на предыдущем рисунке. Для ориентировки рядом с каждой строкой указаны в скобках десятичные эквиваленты всех чисел. Горизонтальные связи ячеек нарисованы черными линиями, вертикальные — цветными. В каждой ячейке находится элемент памяти — триггер (Т).

Простая идея, на которой основана работа данной специализированной структуры, заключается в следующем. Если просмотреть первый (левый) столбец матрицы, то сразу становится ясно, что вторая строка не может претендовать на звание «максимальной», потому что у нее в старшем разряде 0, а у остальных строк — 1. Таким образом, вторая строка сразу выходит из игры. На втором этапе (второй столбец) соревнуются пять строк: 1-я, 3-я, 4-я, 5-я и 6-я, и выходят из игры (по указанной выше причине) 3-я, 5-я и 6-я. В конце концов выигрывает 4-я строка, в которой находится максимальное число (13). Некоторое замешательство может возникнуть в 3-м столбце. Здесь соревнуются 1-я и 4-я строки, но обе они содержат в данном столбце нули — «ничья»! Значит, надо допустить обе строки до 4-го этапа, где происходит «доигрывание» и выясняется «победитель» — 4-я строка.

Одновременный «просмотр» всех ячеек очередного столбца выполняется горизонтальной цепью, образуемой логическими схемами  $\alpha$ , а проверка условия, которое свидетельствует о «ничьей» и дает разрешение на продолжение просмотра в младших разрядах, — вертикальной цепью, заложенной в те же схемы  $\alpha$ . Ход «соревнований» для приведенного примера показан на рисунке цветными горизонтальными линиями, на которых крестиками отмечены моменты «выхода из игры».

Описанное устройство получило название  $\alpha$ -структуры. Известны и другие специализированные однородные структуры ( $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ , ...), выполняющие различные крупноблочные операции поиска, например: «поиск числа, ближайшего к заданному», «поиск минимального числа», «поиск всех чисел, расположенных в интервале между двумя заданными» и т. д. Из таких операций можно составлять крупноблочные программы для решения как информационных, так и вычислительных задач. В то

же время некоторые однородные структуры полезны в качестве специализированных обрабатывающих модулей в измерительных и управляющих системах.

**Устройство для сжатия двоичных кодов (компрессор).** Эта однородная структура (рис. 5) выполняет базовую операцию «сжатие», т. е. преобразует произвольный двоичный код (например, 10101011) в «уплотненный», или, как его иногда называют, унитарный код той же длины, имеющий такое же количество единиц, но уже идущих подряд (в данном

«всплывают» вверх, как «пузырьки» воздуха. Постепенно все единицы оказываются внизу. В нашем примере результат — «уплотненный двоичный код» образовался уже после третьего столбца компрессора. Это произошло по той причине, что в исходном коде под единицами оказалось всего три нуля, которые нужно было вытеснить. В остальных четырех столбцах в данном случае никаких преобразований не происходит, но они необходимы, потому что в предельном случае на входе может оказаться код 10000000, и тогда результат

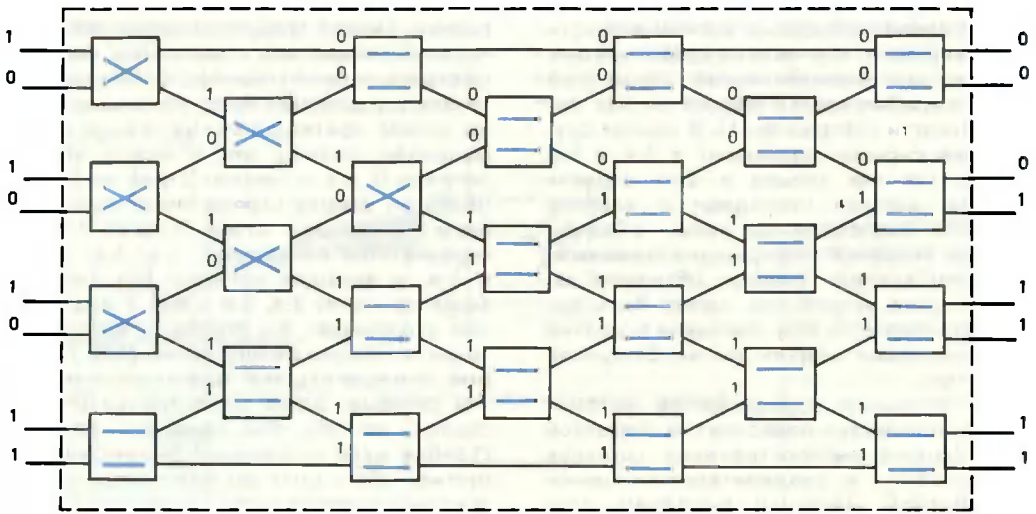


Рис. 5. Компрессор.

случае — 00011111). Каждая ячейка данной структуры — «компаратор» — выполняет следующие функции: если на ее вхо-

ды поступают комбинации сигналов  $\begin{cases} 0 & 0 & 1 \\ 0, & 1, & 1 \end{cases}$  то она передает их на выходы без изменений, но в случае  $\begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$  «перекрещивает»

внутренние соединения и выдает комбинацию  $\begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases}$ . На рисунке внутренние состоя-

ния ячеек («перекрещивает» или «пропускает без изменения») соответственно отмечены скрещенными или параллельными линиями, а виды сигналов (0 или 1) отмечены у входов и выходов каждой ячейки. Понятно, в чем идея работы этой схемы. В каждом столбце некоторые единицы опускаются вниз («тонут»), как более «тяжелые» частицы, а вытесненные ими нули

сжатия (00000001) будет сформирован только после седьмого столбца.

Базовая операция «сжатие» имеет различные применения в крупноблочных программах машин новой архитектуры.

**Соединительная сеть.** Следующая специализированная структура, которую мы рассмотрим, предназначена не для вычислительных или информационных операций, как предыдущие, а для коммутации. В системах новой архитектуры соединения между отдельными блоками, возможность организации быстрой и массовой пересылки информации по заданным маршрутам, играет важнейшую роль. Коммутаторы, выполняющие эти функции, могут быть построены из сравнительно простых соединительных модулей. Примером одного из них является так называемая  $\Omega$ -сеть (рис. 6). Эта структура состоит из таких же ячеек-компараторов, что и ячейки компрессора, но существенно отличается связями между столбцами компараторов. В компрессоре рисунок связи напоминает гамак, а в  $\Omega$ -сети

связи построены по принципу «идеальной тасовки». Представим, что мы разделили колоду карт точно пополам. Если в ней было 36 карт, то получим две полуколоды по 18 карт. Теперь аккуратно раздвинем обе полуколоды и вставим вторую из них в зазоры первой. Получим колоду, в которой порядок следования карт (по отношению к исходному): 1-я, 19-я, 2-я, 20-я, 3-я, 21-я и т. д. Именно так «перетасовываются» в  $\Omega$ -сети выходы компараторов каждого столбца при подключении ко входам компараторов следующего столбца.

после их прохождения по столбцам компараторов (аналогичного происхождению сигналов в схеме компрессора) компараторы автоматически устанавливаются в состояние, соответствующее требуемым соединениям.

Проследим процесс самонастройки  $\Omega$ -сети на приведенном выше примере. 0-й вход должен быть соединен с 6-м выходом. Значит, код цели на первом входе равен 6 (в двоичной системе 110). На рисунке этот код записан у 0-го входа сети старшими разрядами вперед,

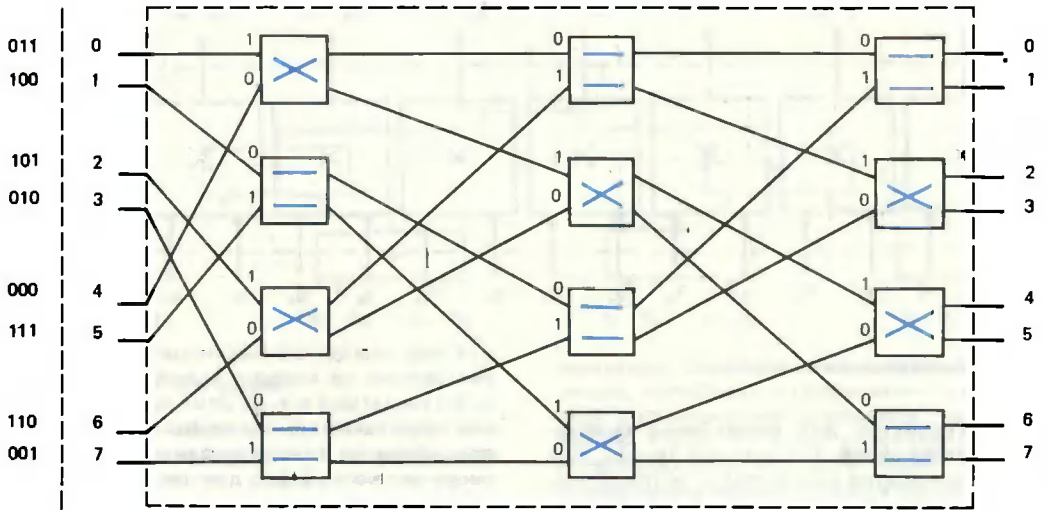


Рис. 6. Соединительная сеть ( $\Omega$ -сеть).

На рисунке каждый столбец имеет 8 входов и 8 выходов, пронумерованных от 0 до 7. Легко убедиться, что соединения, показанные на рисунке, соответствуют «идеальной тасовке»: 0, 4, 1, 5, 2, 6, 3, 7.

Теперь поясним работу  $\Omega$ -сети. Для этого рассмотрим типичную задачу коммутации: на входы сети 0...7 поступают требования от абонентов (это могут быть пользователи, блоки вычислительной системы и т. д.), которым необходимо связаться с другими абонентами, подключенными к выходам 0...7. Пусть требуются следующие соединения входов (источников) с выходами (целями): 0-го с 6-м; 1-го с 1-м; 2-го с 5-м; 3-го со 2-м; 4-го с 0-м; 5-го с 7-м; 6-го с 3-м; 7-го с 4-м.

$\Omega$ -сеть обладает очень интересным свойством: если подавать на ее входы последовательно по разрядам (старшими разрядами вперед) двоичные коды целей, то

т. е. в виде 011. Аналогично записаны коды целей у всех остальных входов сети. Если проследить за тем, каким образом двоичный вектор, образованный старшими разрядами кодов целей, передается на входы компараторов первого столбца, то окажется (см. рисунок), что на первый и третий компараторы поступают комбинации

$\begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$ , и эти компараторы «перекрещивают» свои внутренние соединения, а на второй и четвертый — комбинации  $\begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases}$ , и внут-

ренние соединения остаются «прямыми». Эти состояния, показанные на рисунке скрещенными и параллельными линиями, фиксируются. Второй разрядный срез кодов целей проходит через зафиксированные соединения компараторов первого столбца и настраивает компараторы второго столбца так, как показано на рисунке. Третий разрядный срез передается на входы третьего столбца компараторов в показанных

на рисунке комбинациях и соответственно настраивает компараторы третьего столбца.

На этом настройка в данном случае заканчивается. Легко убедиться, что теперь 0-й вход сети соединен с 6-м выходом, 1-й — с 1-м, 2-й с 5-м и далее — как требуется. Сеть настроена, и через нее можно передавать любую информацию.

Перед началом следующего сеанса передачи фиксирующие триггеры всех компараторов должны быть сброшены в нулевое состояние, после чего начинается новая настройка.

нельзя выполнить каким-либо «чисто параллельным» способом. Суммирование большого массива чисел требует в той или иной форме последовательного накопления результатов. Один из известных подходов к реализации этой операции состоит в том, что строится «пирамида» сумматоров (рис. 8). На первом «этаже» пирамиды устанавливают  $n/2$  сумматоров (каждый обозначен знаком  $+$ ), которые одновременно и независимо суммируют  $n/2$  различных пар исходных слагаемых. На второй этаж поступает уже вдвое меньше, т. е.

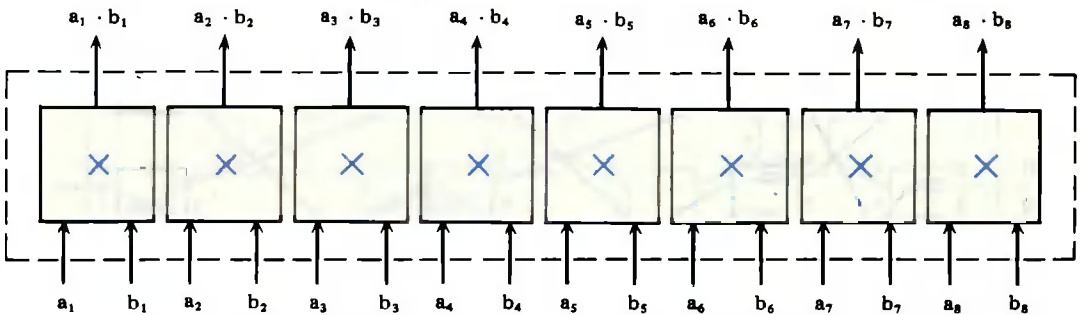


Рис. 7. Покомпонентное умножение.

**Устройство для вычисления скалярных произведений.** Посмотрим теперь, как можно аппаратно реализовать крупноблочную базовую операцию «скалярное произведение».

Скалярное произведение двух  $n$ -мерных векторов  $A$  и  $B$  вычисляется по формуле:

$$A \times B = \sum_{i=1}^n a_i b_i.$$

Значит, необходимо сначала вычислить  $n$  парных произведений одноименных компонент векторов  $A$  и  $B$ , а затем просуммировать все эти произведения. Целесообразно разделить эту работу между двумя базовыми операциями: «покомпонентное умножение» и «групповое сложение». Первая из них может быть выполнена арифметическим модулем (рис. 7), состоящим из одинаковых умножающих устройств. На рисунке показан такой модуль для  $n=8$ . Каждое умножающее устройство помечено символом  $\times$ . Все они выполняют свою работу одновременно и независимо. Это — типичный пример параллельной реализации крупноблочной операции.

Операцию «групповое сложение»

нельзя выполнить каким-либо «чисто параллельным» способом. Суммирование большого массива чисел требует в той или иной форме последовательного накопления результатов. Один из известных подходов к реализации этой операции состоит в том, что строится «пирамида» сумматоров (рис. 8). На первом «этаже» пирамиды устанавливают  $n/2$  сумматоров (каждый обозначен знаком  $+$ ), которые одновременно и независимо суммируют  $n/2$  различных пар исходных слагаемых. На второй этаж поступает уже вдвое меньше, т. е.

на втором этапе используются  $n/4$  сумматора и т. д. Этот процесс «свертки» групповой суммы продолжается до тех пор, пока на самом верхнем этаже пирамиды остаются всего две частичные суммы, которые складываются единственным сумматором последнего этажа. Если  $n=2^k$ , то пирамида имеет в точности  $k$  этажей ( $k = \log_2 n$ ) и содержит  $(n-1)$  сумматоров. В тех случаях, когда требуется групповое сложение многих массивов, следующих друг за другом (а это всегда имеет место при решении реальных задач), в такой схеме организуют так называемую конвейерную обработку, которая состоит в следующем. После того как сумматоры первого этажа вырабатывают свои результаты (частичные, попарные суммы слагаемых 1-го массива), эти результаты передаются на второй этаж, где продолжается обработка слагаемых 1-го массива. К этому моменту сумматоры первого этажа освобождаются и могут приступить к обработке слагаемых 2-го массива и т. д. В случае, показанном на рисунке, первый окончательный результат — сумма первого массива — появится на выходе конвейера через три такта (или «шага») конвейера, но, начиная с этого момента, в каждом такте с выхода конвейера будет сниматься очередной результат.



В рассмотренной структуре параллельный принцип обработки (в пределах каждого этажа) сочетается с конвейерным (между этажами). Если на входах конвейера достаточно «сырья» (массивов чисел), то все его «оборудование» (сумматоры) работают одновременно и обеспечивается высокая производительность. Возвращаясь к задаче вычисления скалярных произведений, отметим, что схема, реализующая покомпонентные произведения, может быть размещена перед конвейером, образуя его дополнительную, предварительную ступень.

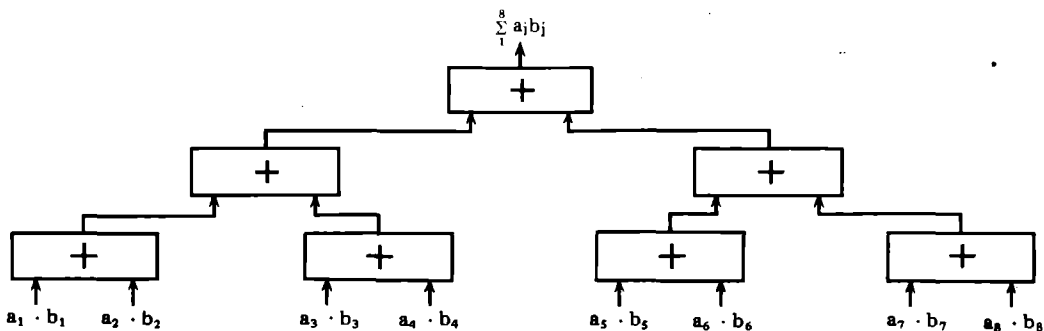


Рис. 8. Пирамида сумматоров.

пень. Таким образом можно получить устройство, реализующее в конвейерном режиме операцию «скалярное произведение».

Конвейерные процессоры различной конструкции получают все большее распространение в ЭВМ новой архитектуры. (Один из первых векторных конвейерных процессоров был разработан в СССР еще в начале 60-х годов.)

#### ОБЩАЯ СТРУКТУРА УНИВЕРСАЛЬНОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Во времена 1-го, 2-го, 3-го поколений все было четко: простые задачи решали на малых ЭВМ, задачи средней сложности — на средних, а очень сложные задачи с большим объемом данных и обработки — на самых больших машинах. В 80-е годы происходит перераспределение задач. Удивительные и быстрые успехи технологии позволяют теперь создавать все более мощные вычислительные системы прямо на рабочем столе, на основе персональных ЭВМ. Все больше задач среднего объема и сложности (обработка экспериментальных данных, значительная часть экономических и статистических расчетов,

задачи инженерного проектирования и т. д.) можно решать теперь этими удобными и миниатюрными средствами. Количество таких задач продолжает быстро расти. Понятие «средней» ЭВМ теряет смысл.

Между тем роль больших машин остается очень важной. Дело в том, что существуют исключительно большие по масштабам обработки и весьма значимые задачи, для решения которых требуются уникальные, сверхмощные вычислительные средства (супер-ЭВМ). К таким задачам относится: моделирование глобальных эконо-

мических, биологических и физических явлений, обработка информации, передаваемой космическими станциями, некоторые задачи искусственного интеллекта и т. д. Необходимость решения таких задач за приемлемое время является одной из главных причин поисков новой архитектуры, создания новых поколений машин. Наиболее известными из супер-ЭВМ четвертого поколения являются «Крэй-1» (максимальная производительность 80 млн операций в секунду) и «Сайбер-205» (400 млн операций в секунду). В ближайшее время должны появиться системы с производительностью в несколько миллиардов операций в секунду.

В составе таких супер-ЭВМ уже используются специализированные процессоры, ориентированные на определенные задачи. Это, прежде всего, конвейерные процессоры для векторных и матричных вычислений.

Еще одно важное направление в развитии вычислительных систем связано с построением сетей ЭВМ. Понятно, что несколько машин, связанных каналами передачи данных, могут коллективно решать более сложные задачи, чем каждая в отдельности. При этом можно объединять машины, расположенные в одном здании, на одном предприятии («локальные сети»), а можно — и весьма удаленные («распре-



деленная сеть»). Последнее позволяет, например, любому пользователю, где бы он ни находился, обращаться к уникальным ресурсам (в смысле объема памяти, наличия спецпроцессоров и т. д.) некоторой супер-ЭВМ, расположенной за тысячи километров от него. Конечно, для успешной работы сетей ЭВМ решающее значение имеют быстрдействие и надежность каналов связи.

Можно предположить, что дальнейшее развитие принципов специализации, аппаратной поддержки наиболее важных вы-

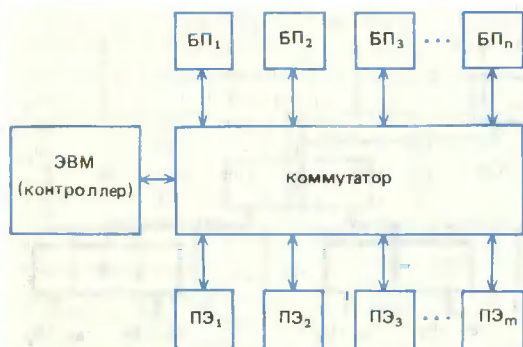


Рис. 9. Архитектура супер-ЭВМ.

числений, организации локальных и распределенных сетей приведет к общей архитектуре супер-ЭВМ на основе специализированных аппаратных модулей (рис. 9).

Блоки памяти (БП) строятся из стандартных полупроводниковых интегральных схем. Процессорные элементы (ПЭ) — это либо функциональные модули первого уровня, реализующие типовые крупноблочные базовые операции, либо спецпроцессоры, ориентированные на отдельные классы задач или вычислительные методы. Набор процессорных элементов может меняться, расширяться — в зависимости от требований пользователей той или иной системы и от возможностей изготовления специализированной аппаратуры. Если система предназначается главным образом для решения вычислительных задач, то в ней должны быть хорошо представлены аппаратные средства для числовой обработки: те же векторные арифметические устройства или матричные сеточные модели. Если задачи нечисловые (например, задачи искусственного интеллекта), то необходимы символьные процессоры, процессоры баз знаний, планировщики и другие средства<sup>1</sup>.

Общее управление системой осуществляет контроллер — стандартная универсальная машина, которая поддерживает необходимое математическое обеспечение, обеспечивает связь с внешними запоминающими устройствами и с пользователями, распределяет работы между процессорными элементами и т. д.

Все составные части системы связаны между собой единой соединительной сетью — коммутатором. Роль этой подсистемы в архитектуре супер-ЭВМ очень велика. В персональных ЭВМ и других малых машинах связь между отдельными узлами осуществляется через общие шины, информация передается последовательно. Если идет «сеанс» связи между двумя какими-либо узлами, то все остальные, нуждающиеся в передаче или приеме данных, ждут своей очереди. В супер-ЭВМ часто бывает необходимо, чтобы многие процессорные элементы одновременно обменивались информацией со многими другими процессорными элементами или блоками памяти и чтобы большие массивы передавались по всем этим одновременно действующим каналам связи как можно быстрее. Это — трудная проблема! В последние годы интенсивно развивается теория соединительных сетей, в которой получены интересные результаты. Как мы видели на примере  $\Omega$ -сети, сама соединительная сеть также является в некотором смысле специализированным процессором. При ее проектировании и изготовлении можно использовать такие же методы, какие применяются для процессорных элементов.

Несмотря на то что габариты и стоимость аппаратных средств все время уменьшаются, некоторые спецпроцессоры системы могут оказаться достаточно объемными и дорогими. Поэтому можно представить себе реализацию системы супер-ЭВМ в виде распределенной сети. Тогда в состав соединительной сети, кроме коммутаторов, будут включаться линии связи.

Можно утверждать, что супер-ЭВМ такой архитектуры будет решать с высокой производительностью самые разнообразные задачи. Таким образом, мы приходим — через специализацию процессорных элементов — вновь к универсальности.

Продолжая аналогию с промышленным производством, можно уподобить за-

<sup>1</sup> Об архитектуре таких систем см.: Поспелов Д. А. Вычислительные машины становятся интеллектуальными // Природа. 1985. № 4. С. 28—39.

поминающие устройства супер-ЭВМ складам материалов, полуфабрикатов и готовых изделий, а процессорные элементы — цехам или производственным линиям, ориентированным на разные технологические процессы.

### ПЕРСПЕКТИВЫ АРХИТЕКТУРЫ ЭВМ

Мы рассказали о применении новой архитектуры в системах, предназначенных для решения больших задач, в супер-ЭВМ. Однако рассмотренные выше принципы массовой обработки, функциональные блоки, «моделирующие» типовые процедуры, найдут различные применения и в «малых» цифровых устройствах, особенно там, где требуется реализация некоторых специальных функций «в реальном масштабе времени», т. е. в ходе какого-либо быстропротекающего процесса, без его замедления, и там, где по условиям эксплуатации система должна иметь малые габариты, вес и потребление энергии. Примерами таких реализаций могут служить схемы управления роботами и некоторыми автоматизированными производствами.

Одна из важнейших задач, которые надо решить при создании ЭВМ новой архитектуры, заключается в том, чтобы выделить наиболее важные типовые алгоритмы, процедуры, «технологии» обработки и отобразить их в схемы функциональных модулей, подобно тому, как мы это сделали в приведенных выше примерах. Для того чтобы набор функциональных модулей был практичным, он должен содержать сравнительно небольшое число разных модулей и в то же время обеспечивать своими базовыми операциями возможность решения как можно большего числа задач.

Специализированные однородные функциональные модули используют преимущества новой технологии гораздо полнее, чем это имеет место в современных стандартных функциональных элементах вычислительной техники (таких как классические арифметико-логические устройства, микропроцессоры и т. д.). С другой стороны, благодаря появлению в аппаратуре новых мощных базовых операций, возникает «обратная связь»: математики и программисты, имея в своем распоряжении такие операции, будут искать новые, более эффективные алгоритмы, по-новому осмысливать весь ход решения своих задач.

Сегодня проблема развития архитектуры ЭВМ стоит так остро, как никогда раньше. Во всех передовых странах развернулись работы по созданию «интеллек-

туальных» машин 5-го поколения. Новая информационная техника будет играть исключительно важную роль в жизни общества. Но для того чтобы практически решать сложные «интеллектуальные» задачи — такие как общение с человеком на естественном языке, представление знаний в памяти машины и работа с ними, использование логического вывода при ответе на вопросы пользователей, — необходимо, чтобы машины стали в тысячи раз быстрее современных и делали миллиарды арифметических и логических операций в секунду.

Как достигнуть такого колоссального быстродействия? Над этим сейчас работают ученые и инженеры разных специальностей, в том числе — архитекторы ЭВМ. Дальнейшее увеличение физического быстродействия элементов вычислительной техники сталкивается с серьезными препятствиями. Поэтому сейчас особое внимание обращается на новые математические и архитектурные решения.

То, о чем мы рассказали в этой статье — один из возможных путей развития аппаратной архитектуры ЭВМ. В специальной литературе рассматриваются и другие предложения. Остается еще немало трудностей, нерешенных вопросов. Но эти проблемы, так же как и другие, стоящие перед разработчиками систем новых поколений, несомненно, будут решены и, может быть, уже к концу этого столетия человека будут окружать умные и добрые помощники, похожие на тех роботов, о которых давно писали фантасты — удивительный слав таких разпичных областей человеческого знания, как математика, лингвистика, физика, технология...

### РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Рафаэл Б. ДУМАЮЩИЙ КОМПЬЮТЕР. М.: Мир, 1979.

Громов Г. Р. НАЦИОНАЛЬНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ РЕСУРСЫ: ПРОБЛЕМЫ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ. М.: Наука, 1984.

Вуд А. МИКРОПРОЦЕССОРЫ В ВОПРОСАХ И ОТВЕТАХ. М.: Энергоатомиздат, 1985.

Симонс Дж. ЭВМ ПЯТОГО ПОКОЛЕНИЯ: КОМПЬЮТЕРЫ 90-х ГОДОВ. М.: Финансы и статистика, 1985.

Фет Я. И. ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ ПРОЦЕССОРЫ ДЛЯ УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ. М.: Энергоиздат, 1981.

## Нелинейная акустика: достижения, перспективы, проблемы

О. В. Руденко



Олег Владимирович Руденко, доктор физико-математических наук, доцент кафедры общей физики и волновых процессов физического факультета Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова. Область научных интересов — физика нелинейных волн, акустика, взаимодействия света со звуком. Соавтор ряда монографий, изданных в нашей стране и за рубежом, в том числе: Теоретические основы нелинейной акустики (совместно с С. И. Солуяном). М., 1975; Нелинейная гидроакустика (совместно с Б. К. Новиковым и В. И. Тимошенко). Л., 1981. Лауреат Государственной премии СССР (1985 г.). В «Природе» опубликовал статью: Акустика интенсивных возмущений: нелинейные волны, физические эффекты и приложения (1978, № 9).

В современной научной и технической литературе все чаще встречается прилагательное «нелинейный». Стали уже привычными выражения «нелинейная волна», «нелинейный процесс», «нелинейная характеристика» и т. п. Это слово вошло в лексикон физиков в 30-е годы, когда бурно развивалась теория нелинейных колебаний, заложившая основу современной техники обработки сигналов. К концу 50-х — началу 60-х годов относится расцвет физики нелинейных волн, вызванный использованием интенсивного лазерного излучения и мощных СВЧ-генераторов, а также исследованием плазмы. На фоне ярких достижений в этих областях менее заметными были результаты нелинейной акустики, изучающей мощные звуковые, ультразвуковые и гиперзвуковые сигналы<sup>1</sup>.

Нелинейная акустика — одно из старейших направлений физики нелинейных волн. В ней впервые обнаружены и описаны такие явления, которые, как оказалось позже, имеют весьма общий характер и наблюдаются в других разделах физики и техники. Весьма универсальны и разработанные здесь математические модели. Сама же нелинейная акустика до сравнительно недавнего времени выглядела наукой, занимающейся проблемами, прямо не связанными ни с познанием новых фундаментальных свойств материи, ни с решением актуальных народнохозяйственных задач. Впрочем, в студенческих учебниках неизменно обращались к ней, демонстрируя на красивых примерах основные особенности нелинейных волн — их способность изменять свою частоту и форму, распадаться на составные части, взаимодействовать друг с другом, а также влиять на свойства среды. Справедливости ради надо сказать, что и развивалась нелинейная акустика в те годы медленнее, чем, скажем, нелинейная оптика, где основные эффекты не только были установлены и поняты, но и

<sup>1</sup> Нелинейной акустикой называют область физики, изучающую взаимодействия акустических волн между собой и с волнами иной физической природы. Обычно такие явления (нелинейные эффекты) возникают при распространении звуковых волн большой интенсивности — так называемых волн конечной амплитуды — и проявляются тем сильнее, чем больше величина возмущений; они отсутствуют в линейном приближении, где выполняется принцип суперпозиции. Напомним также читателю, что упругие колебания с

частотами от 16 Гц до  $2 \cdot 10^4$  Гц (слышимые человеком) принято называть звуковыми, от  $2 \cdot 10^4$  Гц до  $10^9$  Гц — ультразвуковыми и от  $10^9$  Гц до  $10^{13}$  Гц — гиперзвуковыми.

послужили основой промышленного внедрения буквально через несколько лет после создания лазеров.

Что ж, подчас ценность накопленных знаний становится очевидной не сразу, а лишь тогда, когда они проявят себя при решении важных прикладных задач.

Именно так и произошло с нелинейной акустикой. Сегодня, спустя 30 лет после появления первых работ созданы принципиально новые проблемы и измерительные методики, завоевавшие широкое признание в промышленности и различных областях научных исследований. Цикл работ «Разработка физических основ нелинейной акустики и ее приложений» удостоен в 1985 г. Государственной премии СССР.

Нелинейная акустика занимает особое место в физике по разнообразию сред, в которых протекают исследуемые процессы. Изучаемые ею волны возбуждаются в газах, жидкостях, твердых телах и плазме, т. е. присущи всем четырем известным состояниям вещества. Они широко распространены в природе: в атмосфере и океане, под землей и в космических объектах. Нелинейные волны — это и гром, и взрывы, и землетрясения, и многое другое.

Читатель вправе спросить: а имеет ли смысл говорить о нелинейной акустике как об отдельной науке, не правильнее ли вести речь о «нелинейных разделах» физики Земли, атмосферы и океана, твердого тела и других состояний вещества? Тот же вопрос относится и к приложениям — неразрушающему контролю, борьбе с шумами, авиационной и гидроакустике. Ответить, пожалуй, можно так: нелинейная акустика четко выделена на общем «фоне» всех физических дисциплин спецификой своих идей, теоретических моделей и методов, а также техникой эксперимента. Но сегодня полученные в ней результаты уже вышли за рамки одной отрасли и широко используются специалистами разных направлений.

О становлении нелинейной акустики, основных этапах ее развития и достижениях начального этапа ее истории уже рассказывалось на страницах «Природы»<sup>2</sup>. Последнее десятилетие характеризовалось главным образом смещением интересов в сторону прикладных аспектов, среди которых следует прежде всего упомянуть гид-

роакустику и нелинейную акустическую диагностику различных сред. Появились и новые направления исследований. Наконец, в значительной мере прояснилась ситуация в традиционных разделах нелинейной акустики, развиваемых уже много лет, так что для них можно подвести некоторые итоги и обсудить перспективы использования основных результатов. Обо всем этом и рассказывается ниже.

## НЕЛИНЕЙНЫЕ ВОЛНЫ И ПРИЕМ ЗВУКОВЫХ СИГНАЛОВ

Это направление интересно с нескольких точек зрения. Его развитие отмечено логической последовательностью и могло бы служить классической иллюстрацией пути реализации новой научной идеи.

Принцип действия нелинейной (параметрической) антенны был предложен в 1961 г. В. А. Зверевым и А. И. Калачевым в нашей стране и независимо П. Вестервельтом в США. Он основан на свойстве интенсивных волн взаимодействовать между собой. Как известно, линейные (слабые) волны, пересекаясь в пространстве, не влияют друг на друга — для них справедлив известный принцип суперпозиции. Если же слабый сигнал встретит на своем пути мощный волновой пучок, произойдет «запоминание» характеристик сигнала, его «прием». Иными словами, такой пучок служит своеобразной антенной. Эта антенна способна не только принимать, но и испускать сигналы. Для этого нужно возбудить в среде, скажем в воде, интенсивную модулированную волну. Из-за нелинейного взаимодействия волн с различными частотами выделенным окажется низкочастотный сигнал модуляции, который, слабо затухая, может распространяться под водой на значительные расстояния. Важно, что такой сигнал передается узконаправленным пучком — ведь излучается он довольно-таки необычной «бестелесной антенной» — столбом воды протяженностью в десятки и даже сотни метров, в котором сконцентрирована энергия мощной волны (называемой волной накачки).

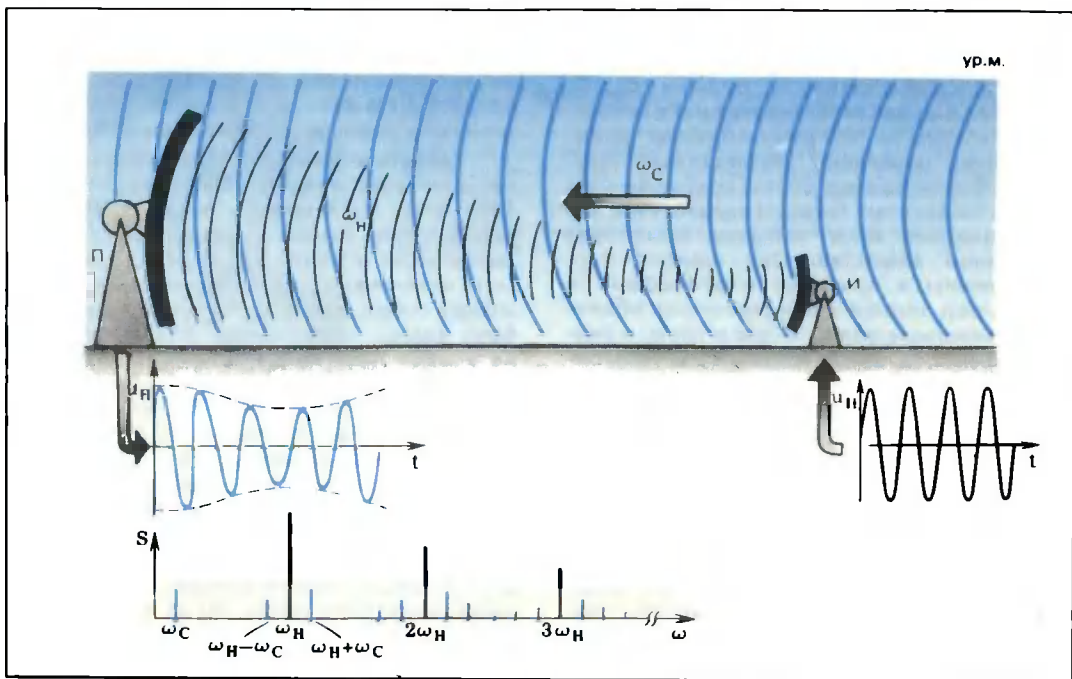
Первые расчеты и лабораторные эксперименты в этой области относятся к концу 60-х годов. Они позволили высветить общие свойства нелинейных антенн. Затем наступил этап создания макетов устройств и натурных измерений в морских условиях. Одновременно разрабатывались инженерные методы расчета и оптимизации характеристик антенн на основе математического аппарата нелинейной акустики, раз-

<sup>2</sup> Красильников В. А. Ультразвук и нелинейные волновые процессы // Природа. 1968. № 1. С. 54—62; Руденко О. В. Акустика интенсивных возмущений: нелинейные волны, физические эффекты и приложения // Природа. 1978. № 9. С. 34—43.

витого академиком Р. В. Хохловым и его учениками<sup>3</sup>. В нашей стране впервые в мире созданы и внедрены приборы с параметрическими антеннами для гидролокации с целью обнаружения косяков рыбы, а также для изучения водной толщи и морского дна. Такие приборы позволяют очень точно построить профиль дна до глубин около 4 км, идентифицировать слои скальных пород, залегающие на глубине до 100 м под дном моря, находить предметы в илистых донных отложениях толщиной до 20 м. Область использования подобных приборов непре-

ривно расширяется. В ближайшее время ожидается их применение для поиска полезных ископаемых на шельфе, контроля загрязнения воды и нарастания донных отложений, для морской археологии и точных подводных измерений и т. д.

Как же работает параметрическая антенна? Уже говорилось, что слабый сигнал низкой частоты  $\omega_c$  оставляет свой «нелинейный отпечаток» на мощном пучке накачки с высокой частотой  $\omega_H$ . При этом изменяется как форма, так и спектр  $S(\omega)$  высокочастотной волны. Обычно прием сла-



Принцип действия параметрической приемной антенны. Источник И испускает в направлении приемника П мощный пучок колебаний накачки с частотой  $\omega_H$  и величиной  $u_H$ , меняющейся со временем  $t$  по гармоническому закону  $u_H \sim \sin \omega_H t$ . В среде между источником и приемником пучок взаимодействует со слабым сигналом низкой частоты ( $u_c \ll u_H$ ,  $\omega_c \ll \omega_H$ ). Если этот сигнал распространяется почти параллельно пучку, напряжение на выходе приемника  $u_H$  оказывается промодулированным частотой  $\omega_c$ , а сами высокочастотные колебания становятся негармоническими, так что принимаемый спектр  $S(\omega)$  состоит из многих компонент (на рисунке показаны только самые низкочастотные из них), среди которых наиболее заметны гармоники  $m\omega_H$ , а наиболее интересны — отмеченные цветом компоненты с комбинационными частотами  $m\omega_H \pm m\omega_c$ , несущие информацию о сигнале [ $m = 1, 2, 3, \dots$ ].

бых сигналов требует чувствительного спектрального анализа, поэтому особенно важна так называемая тонкая структура  $S$ , определяемая наличием в нем компонент (гармоник) с теми или иными частотами.

В нелинейных акустических средах скорость звуковых волн, как правило, почти не зависит от их частоты (дисперсия отсутствует), стало быть, нет и запрета на взаимодействие различных гармоник: лю-

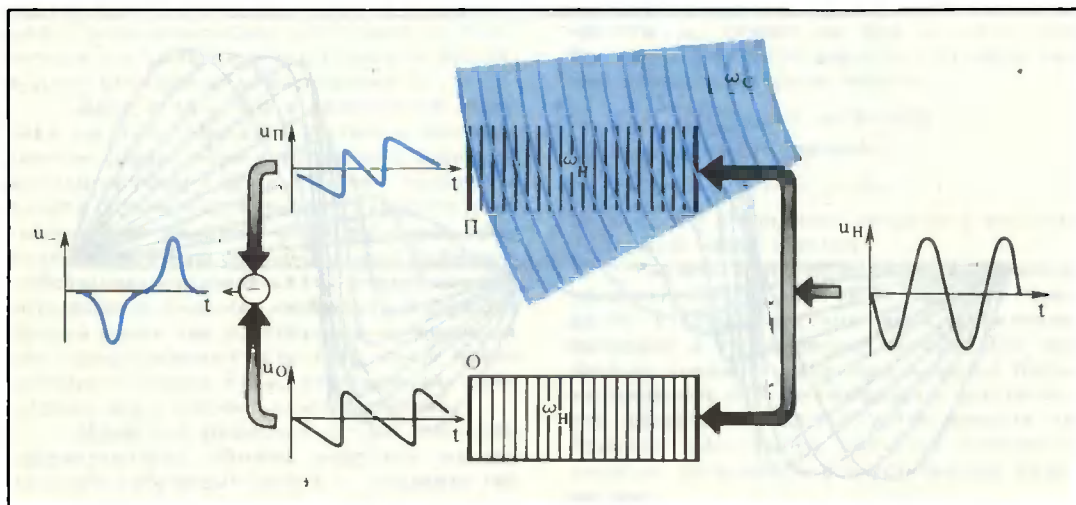
<sup>3</sup> Эти методы описаны в книге: Новиков Б. К., Руденко О. В., Тимошенко В. И. Нелинейная гидроакустика. Л., 1981. Об уравнениях нелинейной акустики и следующие из них результаты см., напр.: Наугольных К. А. Поглощение мощных ультразвуковых волн // Мощные ультразвуковые поля / Под ред. Л. Д. Розенберга. М., 1968. С. 5—48.

бая из них присутствует в спектре, в результате чего энергия исходных колебаний «размазывается» по спектру. Дело в том, что при взаимодействии волн с частотами  $\omega_c$  и  $\omega_n$  образуются колебания с комбинационными частотами  $p\omega_n \pm m\omega_c$  ( $p, m = 1, 2, 3 \dots$ ). Каждое из этих колебаний обычно столь же слабо, как и исходный сигнал, — как говорят, волновое, или параметрическое, предусиление отсутствует, так что антенна лишь выделяет из принимаемых волн параллельные оси пучка и повышает их частоту.

это недостижимо. Но есть и специфические именно для акустики способы усиления сигналов.

Основная идея одного из таких способов<sup>4</sup> — извлечь информацию о сигнале на всех комбинационных частотах, а не на какой-либо одной из них — ведь заметная часть принятого сигнала сосредоточена в высокочастотных компонентах спектра.

Обсудим принципиальную схему подобной обработки, приводящей к усилению принимаемого сигнала<sup>5</sup>. Пусть волны накачки распространяются в двух каналах:



Принцип действия приемника с параметрическим предусилением. Волна накачки  $u_n \sim \sin \omega_n t$  распространяется в опорном  $\text{O}$  и приемном  $\text{П}$  каналах. В опорном канале, где на волну не действует сигнал с частотой  $\omega_c$ , ее синусоидальный профиль трансформируется в пилообразный с симметричными относительно нулевого уровня фронтами. Из-за влияния сигнала на волну накачки в приемном канале образуются несимметричные фронты, движущиеся относительно сопутствующей системы координат. В результате форма возмущений на выходе каналов  $\text{O}$  и  $\text{П}$  оказывается различной, а величина  $u_{\text{П}}$  — разностного сигнала — гораздо больше, чем у любой спектральной компоненты с комбинационной частотой.

Казалось бы, возможности параметрических приемников звука сильно ограничены по сравнению с параметрическими усилителями других волн, испытывающих дисперсию при распространении в среде. Так, при резонансном взаимодействии трех электромагнитных волн с частотами  $\omega_n$ ,  $\omega_c$ ,  $\omega_n - \omega_c$  удается добиться (например, в устройствах нелинейной оптики) значительного усиления сигнала на частотах  $\omega_c$  и  $\omega_n - \omega_c$  за счет передачи им энергии от волны накачки с частотой  $\omega_n$ . В акустике же

приемном ( $\text{П}$ ) и опорном ( $\text{O}$ ). Сигнал воздействует на волну накачки только в приемном канале, в опорном же канале она распространяется, не взаимодействуя с сигналом. Поэтому на выходе этого канала волна искажена только из-за самовоздействия, а в канале  $\text{П}$  дополнительно модулируется сигналом с частотой  $\omega_c$ . Из-за нелинейности при этом образуются движущиеся несимметричные крутые (ударные) фронты и происходит сложная эволюция профиля волны, в частности, ее период изменяется. Вычитая сигналы на выходе каналов  $\text{П}$  и  $\text{O}$ , получим периодическую последовательность импульсов с амплитудой примерно как у волны накачки. Иными словами, в результате такой обработки достигается заметное усиление сигнала.

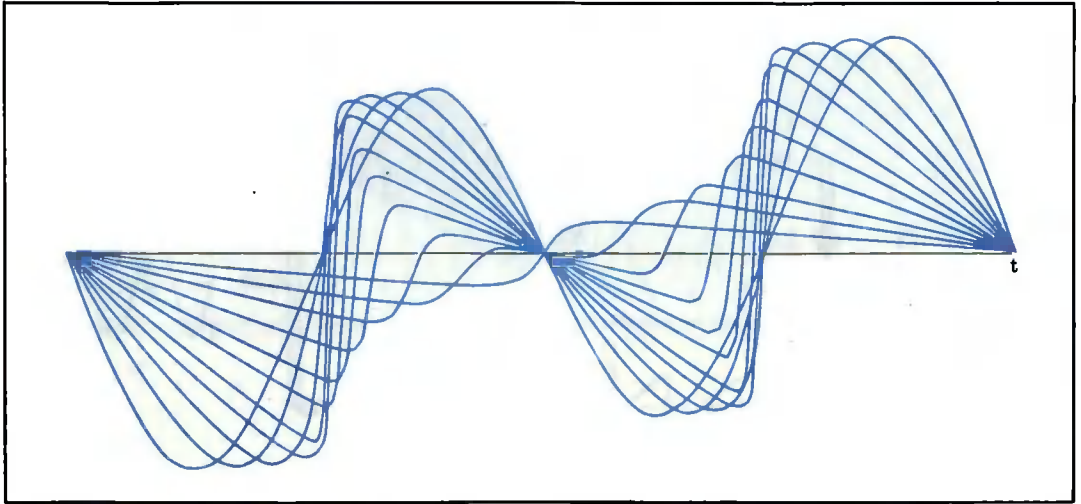
<sup>4</sup> Гурбатов С. Н., Малахов А. Н. // Акустический журн. 1979. Т. 22. С. 53—59. Подробнее см.: Васильева О. А., Лапшин Е. А., Карабутов А. А. и др. Взаимодействие одномерных волн в средах без дисперсии. М., 1983.



Познакомившись с принципом действия параметрического приемника, легче воспринять некоторые общие черты нелинейной акустики. Так, мы видели, что характерная особенность взаимодействия акустических волн — лавинообразное увеличение числа линий в их спектрах. Чтобы разобраться в этой сложной картине, нужно анализировать нелинейные процессы одновременно в обычном пространстве — времени, следя за искажением профиля волны (как в механике), и в пространстве частот — на «спектральном языке» (как в

## КАК УПРАВЛЯТЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН

Практическое применение нелинейных эффектов связано в основном с возможностью передать энергию мощных волн какой-либо одной избранной волне (например, усиливаемому сигналу). Управлять потоками энергии удается, подбирая нелинейную среду с требуемыми свойствами. Эта проблема успешно решена в оптике<sup>6</sup>. Найдено много кристаллов, в которых мощные световые пучки различной поляри-



Нарисованная графопостроителем ЭВМ картина искажения одного периода мощной волны на качки в присутствии сигнала в двое меньшей частотой ( $t$  — время в системе координат, движущейся вместе с волной со скоростью звука). Различные кривые соответствуют изменению профиля волны в ростом пройденного ею расстояния. В соседних четвертях периода профили неодинаковы, из-за чего образуются ударные волны, несимметричные относительно невозмущенного уровня.

радиофизике). Очень часто сравнительно сложному изменению профиля отвечает запутанная спектрограмма, поэтому удобно сначала определить профиль волны, а затем провести его спектральный анализ. Именно наглядность пространственно-временной картины при сравнении волн и послужила отправной точкой на пути к изложенной выше идее обработки сигнала в параметрическом приемнике.

Итак, для эффективного использования нелинейных взаимодействий в акустике необходимо либо извлекать информацию из сложных спектров (когда это возможно), либо управлять обменом энергией между различными волнами.

распространяясь определенным образом относительно кристаллографических осей, могут эффективно обмениваться энергией. Так, когда одинаковые скорости имеют волны с частотами  $\omega_n$  и  $2\omega_n$  (скорости других гармоник при этом обязательно сильно отличаются), теоретически можно добиться полной перекачки энергии во 2-ю гармонику. (Заметим, что в акустике, где скорости всех волн с частотами  $\omega_n$  одинаковы, второй гармонике таким образом передать удается не более 13 % энергии.) Это обстоятельство позволило создать в нелинейной оптике генераторы гармоник и другие приборы для перестройки частоты лазерного излучения.

В акустике же взаимодействуют не две—три волны, а возмущения всех допустимых частот. Поэтому нужно как-то ограничить их число, закрыв тем самым «паразитные» каналы оттока энергии.

В 60-х годах широко обсуждалась воз-

<sup>6</sup> См., напр.: Ахманов С. А., Хохлов Р. В. Проблемы нелинейной оптики. М., 1964.



возможность создания искусственных систем с дисперсией звука. Представлялось, что введение резонансных элементов в среду (например, сделав разными скорости, отделить «полезные» и «паразитные» возмущения. Добиться такой «расстройки» предполагали также, используя взаимное влияние разных типов волн, скажем, продольных и поперечных возмущений в твердом теле, или даже взаимодействие акустических колебаний с волнами иной физической природы. Однако большинство подобных идей, к сожалению, осталось на бумаге (из воплощенного отметим экспериментальные модели параметрических усилителя и генератора ультразвука с акустическим волноводом, обладающим дисперсией<sup>7</sup>).

Дело в том, что в нелинейной акустике на пути создания систем с дисперсией — своего рода акустических аналогов диспергирующих сред, широко используемых в оптике, — возникают трудности двух типов. Либо недоучет ряда факторов приводит к чересчур оптимистичным оценкам, либо проект оказывается технически трудно осуществим. Видимо, необходим более активный поиск как конструктивных решений уже предложенных устройств, так и принципиально новых схем, учитывающих специфику акустических взаимодействий.

Один из реальных путей повысить эффективность обмена энергией между волнами избранных частот — подавить так называемые «ключевые» волны, из-за которых энергия «перебрасывается» в высокочастотную область спектра<sup>8</sup>. С этой целью в обычную акустическую среду вводят избирательно поглощающие элементы (пузырьки газа, узкополосные фильтры, резонаторы и т. д.). Заметим, что для подавления таких волн не обязательно добиваться их диссипации — достаточно вывести их из числа эффективно взаимодействующих, например, за счет резонансного рассеяния на неоднородностях.

Прежде всего попробуем разобраться, как этот способ позволяет избавиться от нелинейных потерь, связанных с образованием ударных волн. Пусть в среду поступает волна накачки с частотой  $\omega_n$ , а избирательно поглощается преимущественно ее 2-я гармоника с частотой  $2\omega_n$ . Ударные волны образуются из-за высших гар-

моник с частотами  $3\omega_n$ ,  $4\omega_n$  и т. д. Но такие гармоники в нелинейных акустических средах возникают главным образом в результате каскадных процессов с непрерывным участием 2-й гармоники. Пожалуй, наиболее понятно это выглядит на языке сопутствующих колебаниям квазичастиц — фононов. Так, фонон с частотой  $3\omega_n$  образуется при слиянии фононов с частотами  $\omega_n$  и  $2\omega_n$ , а фонон с частотой  $4\omega_n$  — при слиянии двух фононов с частотами  $2\omega_n$ . Но если волна с частотой  $2\omega_n$  интенсивно поглощается, высокие частоты в спектре тем самым «обрезаются». Впрочем, заранее не ясно, как это повлияет на волну основной частоты  $\omega_n$ : станет ли она затухать слабее или же просто-напросто откроется новый канал диссипации энергии

$$\omega_n \rightarrow 2\omega_n \rightarrow \text{теплота,}$$

который заменит прежний

$$\omega_n \rightarrow 2\omega_n \rightarrow 3\omega_n, \dots,$$

связанный с передачей энергии в высокочастотную часть спектра.

Расчеты и эксперименты обнаружили удивительный, на первый взгляд, факт: введение в среду диссипативных элементов приводит к уменьшению потерь. Это позволяет увеличить размеры мощных параметрических антенн, передавать акустические колебания высокой интенсивности на большие расстояния, повысить плотность энергии, запасаемой в акустическом резонаторе.

Аналогично удастся «перебросить» значительную часть энергии накачки во 2-ю гармонику, поглощая частоты  $3\omega_n$  и  $4\omega_n$ .

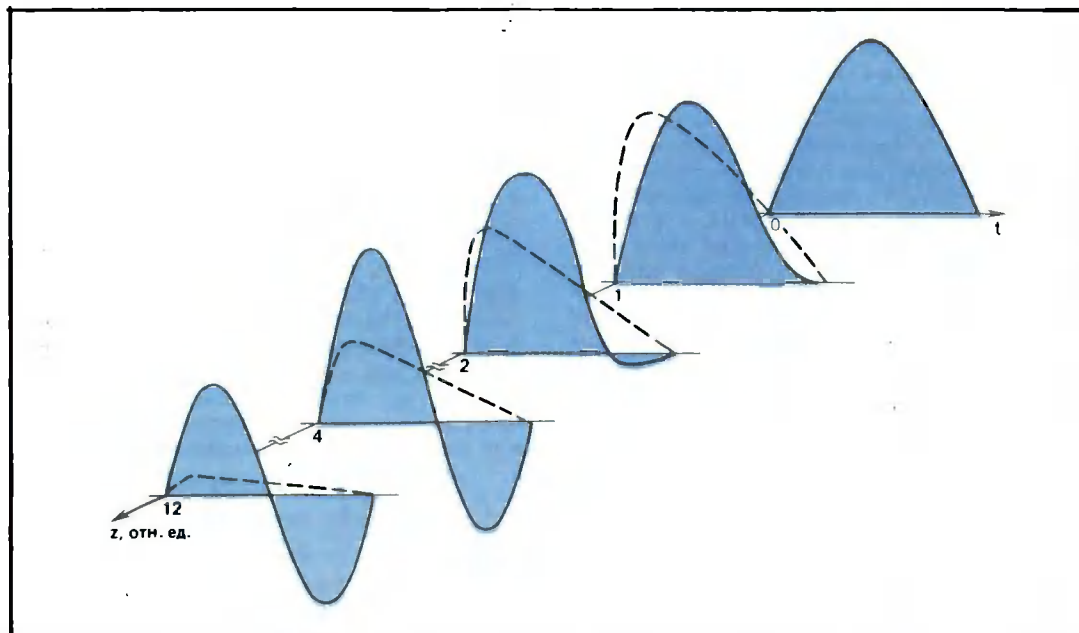
Если избирательно поглощать волны с частотами  $3\omega_n/2$  и  $2\omega_n$ , то почти всю энергию мощной волны с частотой  $\omega_n$  можно передать 1-й субгармонике с частотой  $\omega_n/2$ , т. е. осуществить деление частоты<sup>9</sup>.

Теперь постараемся ответить на общий вопрос: каковы должны быть свойства среды, чтобы волны с частотами  $\omega_i$  и  $\omega_j$  могли эффективно обмениваться энергией? Прежде всего, очевидно, необходимо, чтобы волны этой частоты в среде не поглощались. Напротив, все «паразитные» волны с частотами  $2\omega_i$ ,  $2\omega_j$ ,  $|\omega_i \pm \omega_j|$  и т. д. следует подавить. Таким образом, максимумы избирательного поглощения должны приходиться на эти частоты или принадле-

<sup>7</sup> Островский Л. А., Папилова И. А., Сутин А. М. // Письма в ЖЭТФ. 1972. Т. 15. С. 456—458.

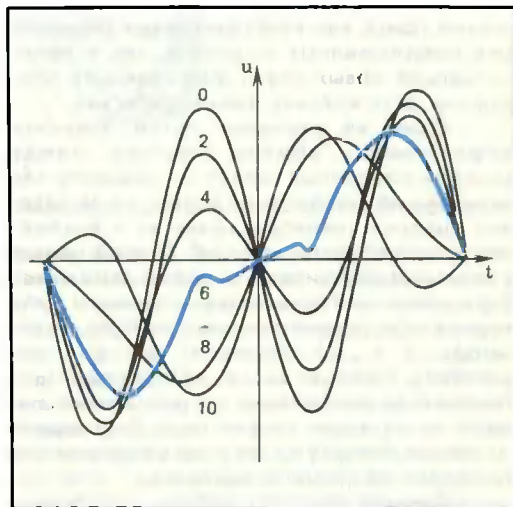
<sup>8</sup> Руденко О. В. // Акустический журн. 1983. Т. 29. С. 398—402.

<sup>9</sup> Андреев В. Г., Васильева О. А., Лапшин Е. А. и др. // Акустический журн. 1985. Т. 31. С. 12—16.



Эволюция при увеличении пройденного расстояния  $z$  профиля одного полупериода волны частоты  $\omega_H$  в генераторе 2-й гармоники с рабочей средой, в которой избирательно поглощаются частоты  $3\omega_H$  и  $4\omega_H$ . Штриховой кривой изображен соответствующий профиль в обычной нелинейной среде, где образуются крутые (ударные) фронты и волна затухает гораздо сильнее.

Эволюция профиля слабого сигнала с частотой  $\omega_c = \omega_H/2$  в поле мощной волны накачки с частотой  $\omega_H$  при параметрическом усилении в среде с избирательным поглощением волн на частотах  $2\omega_H$  и  $3/2\omega_H$ . В результате энергия мощной волны передается слабому сигналу и обратно. По вертикальной и горизонтальной осям отложены величина сигнала  $u$  и время  $t$ , числа у кривых — расстояния  $z$ , пройденные волной (в относительных единицах). Эффект наиболее заметен при  $z = 6$  (цветная кривая), где начальный период сигнала удваивается.



жать полосе частот, перекрывающей их, но не затрагивающей исходные —  $\omega_1$  и  $\omega_2$ . Лишь в этом случае энергия не «растечется» по спектру.

Итак, мы обсудили возможные способы управления взаимодействием интенсивных звуковых волн. Чтобы подчеркнуть основные принципы управления и пояснить особенности взаимодействия этих волн в средах с избирательным поглощением, но без дисперсии, мы противопоставили их хорошо изученным (в оптике) взаимодействиям в средах с дисперсией, но без по-

глощения. В реальных же системах поглощение и дисперсия всегда наблюдаются одновременно, причем они связаны между собой фундаментальными соотношениями, вытекающими из принципа причинности. Поэтому реальный процесс нелинейного взаимодействия нельзя считать чисто «оптическим» или «акустическим»<sup>10</sup>. В общем

<sup>10</sup> Подробнее об этом см.: Андреев В. Г., Сапожников О. А., Хохлова В. А. и др. // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физика. Астрономия. 1985. Т. 26. № 3. С. 58—62.

случае мы имеем дело с обратной задачей теории распространения нелинейных волн — расчетом характеристик среды, в которой данный нелинейный процесс наиболее эффективен. Конечно, поиск и техническое воплощение таких «оптимальных» сред — задача непростая.

### НЕМНОГО ОБ АНАЛОГИЯХ И ПРИМЕНЕНИЯХ

Говоря о нелинейной акустике, нельзя не отметить ее тесную связь с нелинейной оптикой, имеющей дело с лазерным излучением высокой интенсивности, и нелинейной радиофизикой. В нашей стране деятельность специалистов традиционно характеризовалась обменом идеями и опытом, накопленными в этих областях. Напротив, зарубежные исследования по нелинейной акустике оказались в некоторой изоляции от общего подъема «нелинейной физики» в 60-х годах. Опираясь в основном на классическую механику и акустику, они имели и более узкую направленность.

Высокий уровень отечественных работ по физике мощного звука в значительной мере обусловлен личным вкладом Р. В. Хохлова — одного из создателей современной «нелинейной физики». В ставших классическими работах «К теории ударных радиоволн в нелинейных линиях» и «О распространении волн в нелинейных диспергирующих линиях»<sup>11</sup> он изложил общие идеи и развил математический аппарат, пригодный для описания нелинейных волновых процессов различной природы. «Проблему распространения волн в нелинейных средах, — подчеркивал он, — можно условно разделить на две части: распространение волн в условиях сильной дисперсии среды и распространение волн в условиях слабой дисперсии. В первом случае имеющиеся гармонические составляющие волны практически не взаимодействуют друг с другом или же взаимодействие осуществляется между небольшим числом составляющих с близкими по величине фазовыми скоростями. Во втором случае все гармонические составляющие сигнала резонансно взаимодействуют между собой, что создает условия для образования волны с большим содержанием гармоник»<sup>12</sup>.

В упомянутых статьях Р. В. Хохлов рассмотрел оба варианта постановки задачи. Для первого им предложен метод ускоре-

ченных уравнений, описывающих медленные изменения амплитуд взаимодействующих квазигармонических составляющих. Такие уравнения использовались впоследствии при решении многих задач нелинейной оптики и теории нелинейных диспергирующих волн.

Для сред со слабой дисперсией Р. В. Хохлов разработал метод медленно изменяющегося профиля волны и на его основе в 1961—1963 гг. создал математический аппарат нелинейной акустики. Им выведен класс новых уравнений, описывающих нелинейную эволюцию волнового поля для плоских, цилиндрических и сферических возмущений, распространяющихся в средах с разными физическими свойствами.

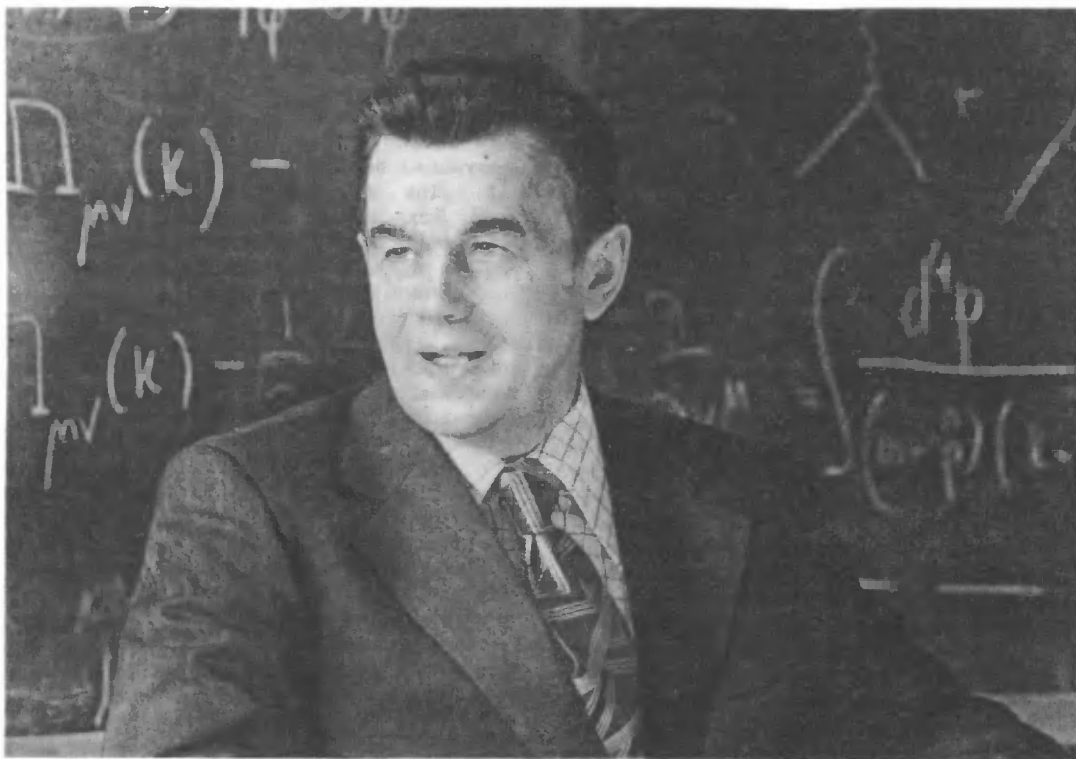
Интересно, что в своих ранних работах Р. В. Хохлов подчеркивал различия нелинейной оптики и акустики как двух полярных разделов физики нелинейных волн. Однако в последующие годы, отмеченные бурным развитием лазерной техники и нелинейной оптики, были открыты принципиально новые волновые явления — различные виды вынужденного рассеяния, самовоздействия и другие. Появилась необходимость от противопоставления перейти к поиску аналогий с целью анализа возможностей наблюдения подобных эффектов в акустике.

Так, после создания параметрических усилителей и генераторов света Р. В. Хохлов предложил ряд конкретных схем параметрических усилителей ультразвука. С его работами по вынужденному комбинационному рассеянию света связаны публикации по комбинационным акустическим взаимодействиям с другими типами возмущений среды, в частности спиновыми волнами, электромагнитными волнами в пьезоэлектриках, вихревыми возбуждениями в газах и жидкостях, температурными волнами в твердом теле и сверхтекучем гелии.

Аналогия — вещь небезопасная, подчас возникает соблазн увидеть ее более глубокой, чем она есть на самом деле. Следуя идеям и технике расчетов, развитых для описания явления-прототипа, можно недооценить специфику рассматриваемого явления. В результате появляются «открытия» не существующих в природе эффектов или излишне оптимистичные оценки условий наблюдения того или иного реального процесса. В истории нелинейной акустики немало подобных примеров, связанных с неправомерной экстраполяцией аналогий. Как правило, для таких работ характерно использование чересчур простых

<sup>11</sup> Хохлов Р. В. // Радиотехника и электроника. 1961. Т. 6. С. 917—925; 1116—1127.

<sup>12</sup> Там же. С. 917.



**РЕМ ВИКТОРОВИЧ ХОХЛОВ**  
(15.VII 1926 г.— 8.VIII 1977 г.)

(укороченных) уравнений. Такой подход применим в нелинейной оптике, но редко когда адекватен специфике акустических задач.

Р. В. Хохлов прекрасно владел математикой, но исходил прежде всего из физической сути явления. Показателен в этом смысле его переход от волн с бесконечным фронтом к ограниченным звуковым пучкам большой интенсивности. Этим направлением исследований Р. В. Хохлов занялся уже после того, как получил важные результаты по самофокусировке света. Через несколько лет выяснилось, что акустические взаимодействия в пучках отличаются от наблюдаемых в оптике. Обычной самофокусировки здесь нет, да и математический аппарат другой. Вместо нелинейного уравнения типа известного уравнения Шредингера, распространение мощных звуковых пучков описывается новым уравнением, получившим название уравнения Хохлова—Заболотской. В 70-х годах проведены систематические исследования его решений. Это уравнение использовалось для расчетов параметрических излучателей,

причем предсказанные с его помощью эффекты неоднократно подтверждались лабораторными и натурными экспериментами.

Рассмотрим, для примера, сравнительно простой и наглядный эффект — тепловую самофокусировку звука, предсказанную Г. А. Аскарьяном в 1966 г. по аналогии с оптикой. Это явление обусловлено поглощением звука и нагреванием среды. С увеличением температуры среды изменяется ее показатель преломления и формируется своеобразная тепловая линза, фокусирующая пучок. Казалось бы, полная аналогия с самофокусировкой света. Из этого в основном и исходили авторы многих теоретических работ, посвященных «переводу» результатов нелинейной оптики на «акустический язык».

Однако между тепловым самовоздействием световых и звуковых пучков имеются и принципиальные различия. Наиболее интересно явление самофокусировки звука из-за нагревания среды при нелинейном поглощении ударных волн — у этой задачи вообще нет оптического аналога. Кроме того, нагревая жидкую среду

звуком, мы передаем ей импульс, в сто тысяч раз больший, чем при поглощении равной световой энергии. Это вызывает своеобразный акустический «ветер», который дефокусирует волну и выносит теплоту из области пучка. Наконец, вблизи акустических излучателей само понятие «граница пучка» теряет смысл. Поэтому акустические измерения нужно проводить лишь в той зоне, где волна станет сферически расходящейся. Но эффект самофокусировки там уже ослаблен.

Все эти отличия выявились в экспериментах, проведенных недавно на физическом факультете МГУ<sup>13</sup>. В этих экспериментах пучок звуковых колебаний мощностью 60 Вт и частотой 1 МГц направлялся вертикально вниз на заполненную глицерином кювету. Сразу после включения звука формировались течения, связанные с акустическим ветром (вблизи от источника) и тепловой конвекцией (на некотором удалении от него). Акустический датчик в дальней зоне регистрировал сигнал, который через 3 мин из-за самовоздействия усиливался в 15—20 раз. Ширина пучка уменьшалась в этом месте примерно в два раза по сравнению со случаем, когда фокусировка отсутствует. Результаты этих опытов показали, что наблюдавшееся явление не укладывается в рамки теорий, развитых по аналогии с оптикой.

Не менее тесно, чем с оптикой, нелинейная акустика связана с волновыми задачами механики. Считается, что по характерным значениям возмущений — умеренные амплитуды — она занимает промежуточное место между линейной акустикой — бесконечно малые возмущения — и механикой ударных волн — сколь угодно сильные возмущения. Если сферу действия нелинейной акустики определить, исходя из применимости эволюционных уравнений Р. В. Хохлова, окажется, что для многих задач она чрезвычайно обширна и простирается вплоть до значений давления в несколько тысяч (для жидкостей) и десятков тысяч (для твердых тел) атмосфер. Затухание сильных волн, образующихся, например, при взрывах, зависит от амплитуды. В результате уменьшения давлений уже на сравнительно малых расстояниях от источника применимы представления нелинейной, а затем и линейной акустики. Влияние протяженной области со слабой нелинейностью становится заметным из-за того, что акустические нелинейные эффек-

ты накапливаются при распространении волны.

Тот факт, что ярко выраженного проявления нелинейности можно добиться при возбуждении слабого, хорошо контролируемого и воспроизводимого сигнала, позволил развить новые методы измерений, диагностики сред и абсолютной калибровки акустических датчиков.

Известно, что нагрузка на современные конструкционные материалы во многих случаях близка к предельной, определяемой их прочностью. Поэтому весьма желательно точно знать свойства материала, в частности его модули упругости. Для этого специалистами по нелинейной акустике предложены и реализованы чрезвычайно чувствительные методы измерения. Оказалось, что вместо обычно используемых мощных прессов, создающих давления до десятков тысяч атмосфер, достаточно воспользоваться простой аппаратурой, которая регистрирует накапливающийся нелинейный эффект в ультразвуковой волне с давлениями всего в десятые доли атмосферы<sup>14</sup>.

Однако разграничивать механику и акустику лишь по величине возмущения неправомерно. Существуют и более глубокие различия, — например, в подходе к задачам. Если механиков интересуют в основном интегральные характеристики волн — положение фронта, пиковые давления и т. д., то акустики рассматривают волну как сигнал сложного спектрального состава, несущий информацию об источнике и трассе распространения. Скажем, при движении интенсивной волны в атмосфере, грунте или океане она непрерывно взаимодействует с неоднородностями, которые служат рассеивателями, естественными волноводами, линзами, фильтрами, и имеют ярко выраженные частотно-избирательные свойства. Поэтому описать такую волну, не прибегая к радиофизическим методам анализа, очень трудно.

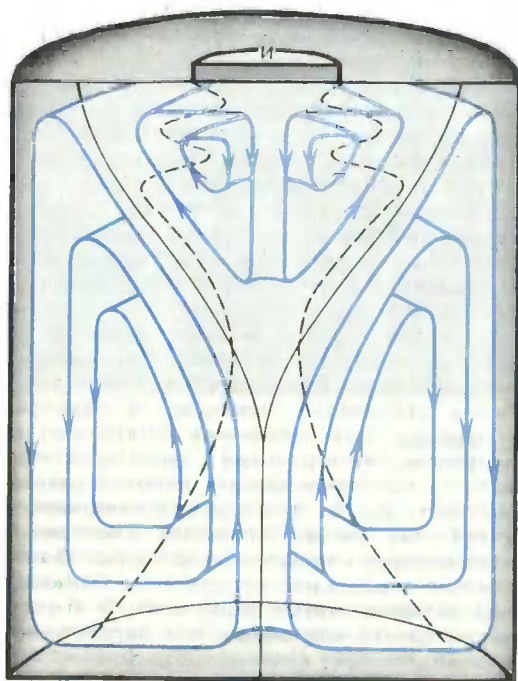
Так, спектральные методы позволяют решить многие задачи диагностики. При использовании перестраиваемого по частоте параметрического ультразвукового гидролокатора для поиска косяков рыбы удается настроиться на резонанс колебаний рыбьего пузыря и добиться увеличения эффективного радиуса обнаружения более чем в 10 раз. В последние годы значительное развитие получили резонансные методы нелинейной спектроскопии микропузырьков жидкости, в частности,

<sup>13</sup> Андреев В. Г., Карабутов А. А., Сапожников О. А. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1985. Т. 41. С. 381—384.

<sup>14</sup> Зарембо Л. К. и др. // Акустический журн. 1973. Т. 19. С. 778—781.

создана аппаратура, позволяющая зарегистрировать даже одиночные пузырьки и определить их размеры<sup>15</sup>. Это важно для многих задач физики океана, а также для исследования крови водолазов при декомпрессии, контроля закипания теплоносителя в энергетических установках и т. д.

У нелинейной акустики давние и тесные связи с физикой твердого тела. Это направление в акустике зародилось в начале 60-х годов. О нелинейных свойствах фононов — тепловых колебаний кристалли-



Картина течений, формирующихся при тепловой самофокусировке звука. Мощный звуковой пучок от источника И направляется вертикально вниз на кювету цилиндрической формы, заполненную глицерином. В ближней к источнику зоне образуются потоки жидкости, вызванные «акустическим ветром» (передачей звуком заметного импульса среде), в дальней — замкнутые циркуляционные ячейки, возникающие из-за тепловой конвекции. Направления потоков показаны цветными стрелками. Акустические и конвективные потоки разделены сепаратрисой (черная сплошная линия, по форме напоминающая рамку). Штриховыми линиями качественно изображены границы пучка.

ческой решетки — разумеется, знали и раньше, ведь многие важные физические свойства твердых тел: теплоемкость, теплопроводность, тепловое расширение — можно объяснить лишь с учетом этой нелинейности. Однако только после создания мощных источников ультра- и гиперзвука удалось осуществить когерентные взаимодействия волн, или взаимодействия фононов, как говорится, «в чистом виде» и появились прямые экспериментальные доказательства реальности таких взаимодействий. Много внимания в последнее время уделялось и исследованиям так называемых правил отбора, в частности, обнаружено, что некоторые запрещенные ими нелинейные процессы в твердых телах всегда имеют место<sup>16</sup>. Связано это с неоднородностью среды — разномасштабными дефектами кристаллической структуры. Этот эффект открывает новые перспективы в диагностике механических неоднородностей, позволяя, например, осуществлять динамический контроль материалов в процессе релаксации внутренних напряжений после снятия внешней нагрузки.

Обнаруженные недавно в твердых телах гигантские нелинейности резонансного характера можно использовать в акустоэлектронике для обработки информации, а также для изучения фазовых переходов в магнетиках. Работы по волнам в твердых телах, как, впрочем, и другие разделы нелинейной акустики, в свое время дали мощный толчок исследованиям более специфичных нелинейных эффектов физики твердого тела — фононного эха, обращения волнового фронта в кристаллах — и послужили основой для создания действующих приборов акустоэлектроники — устройств для преобразования радиосигналов с помощью ультра- или гиперзвука.

Нелинейная акустика твердого тела, бесспорно, заслуживает отдельной статьи, как и весьма важные для практики нелинейные методы генерации и подавления шумов, развиваемые Л. М. Лямшевым и А. В. Римским-Корсаковым с сотрудниками. Что ж, сегодня нелинейная акустика — очень обширная и многоплановая область науки, и «объять» ее всю в журнальной статье невозможно. Думается, что у «Природы» еще не раз отыщется повод обратиться к этому предмету — он того стоит.

<sup>15</sup> Кобелев Ю. А., Островский Л. А. Модели газожидкостной смеси как нелинейной диспергирующей среды // *Нелинейная акустика* / Под ред. В. А. Зверева и Л. А. Островского. Горький. 1980. С. 143—160.

<sup>16</sup> Зарембо Л. К., Красильников В. А. // *Усп. физ. наук*. 1970. Т. 102. С. 549—586.

## Летающие ящеры

Н. Н. БАХУРИНА



Наталья Николаевна Бахурина, младший научный сотрудник лаборатории низших тетрапод Палеонтологического института АН СССР. Занимается изучением морфологии, динамики движения и филогении птерозавров.

Более 365 млн лет назад предки рептилий вышли на сушу из водной стихии и прочно обосновались на Земле, дав начало бесконечному разнообразию форм. Некоторые вернулись в родную стихию, но большинство так и осталось обитателями суши. Лишь малая часть освоила воздушное пространство. Это были летающие ящеры, дальние родственники динозавров и крокодилов, первые позвоночные животные в истории Земли, преодолевшие земное притяжение. Они господствовали в воздухе более 100 млн лет, распространились по всему земному шару, но не оставив потомков, исчезли на рубеже мезозоя — кайнозоя, т. е. 65 млн лет назад, вместе с динозаврами, ихтиозаврами и многими другими животными и растениями мезозойской эпохи.

Какими свидетельствами располагает сейчас палеонтология о древних летающих животных? Благодаря чему эта группа рептилий смогла подняться в воздух?

\*

Впервые остатки животных с крыльями были найдены в Баварии в тончайших слоях сланцев Золенгофена в 1784 г. В этих сланцах, образовавшихся в верхнеюрское время из мягкого донного ила лагун тропического моря, сохранились остатки

очень богатого и разнообразного животного и растительного мира. Среди остатков и отпечатков более 750 видов растений и животных было 180 видов насекомых, 150 — рыб, 50 — рептилий. Благодаря Золенгофену, мир впервые узнал о первоптице — археоптериксе — и летающих ящерах, птерозаврах. Летающими ящерами мы сейчас называем животных, чьи скелеты и разрозненные кости были найдены в верхнеюрских сланцах. А в то время об их систематической принадлежности строились лишь догадки. Какими только животными ни считали птерозавров после того, как описание первого из них стало известно ученому миру. Немецкий ученый К. Коллини, впервые описавший наиболее полный скелет животного (кстати, и до сих пор не удалось найти скелета лучшей сохранности), отнес его к еще неизвестным обитателям моря. Лишь через 16 лет великий Ж. Кювье установил его принадлежность к рептилиям и выделил в новую группу — летающих ящеров, а баварского ящера назвал птеродактилем — крылопалом.

Но на этом споры не утихли: своеобразной морфологией необычное животное слишком отличалось от привычных обитателей воздушного пространства — птиц и летучих мышей. Не сошлись во мнении и немецкие анатомы — Р. Блуменбах и С. Земмеринг. Первый склонялся к тому,



что это водная птица, а второй принял животное с крыльями за летучую мышь и назвал его орнитоцефалус — птицеголов. Прячудливыми были и первые реконструкции птерозавров, некоторые из них напоминали иллюстрации к древним восточным легендам о драконах или к русским сказкам о змее-горыныче. Но восторжествовала точка зрения Ж. Кювье, ни у кого не осталось сомнений, что в Золенгофене были найдены остатки летающих рептилий.

Раскопки на месте первой находки птеродактиля ведутся вот уже 200 лет, и за

это — свидетельство того, что летающие ящеры жили на побережьях или вблизи водоемов.

К настоящему времени в мире описано больше 100 видов птерозавров, вполне сложилось представление об их внешнем облике, о способах добычи и питания. Птерозавров принято делить на рамфоринхов (длиннохвостых с короткой шеей рептилий) и птеродактилей (животных с коротким хвостом или вовсе без него, но с длинной шеей). Первыми заселили Землю рамфоринхи: их остатки находят в отложениях от

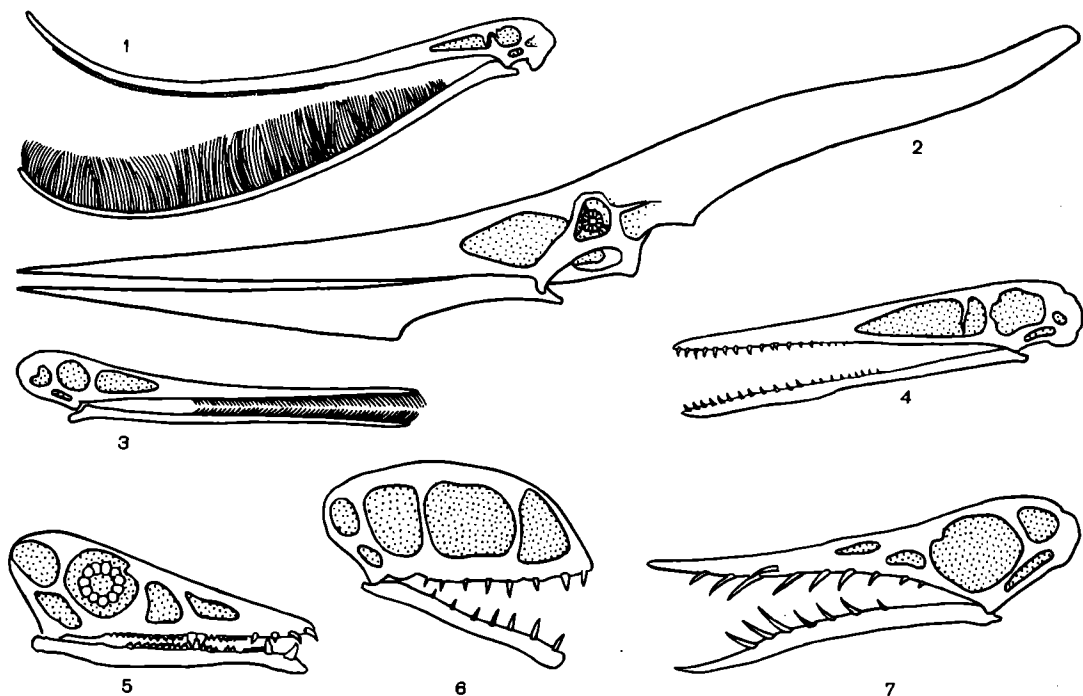


Схема строения черепов птеродактилей [1—4] и рамфоринхов [5—7]. 1 — птеродаустро, 2 — птеранодон, 3 — ктенозама, 4 — птеродактиль, 5 — эудиморфодон, 6 — анурогнат, 7 — рамфоринх. [По П. Вельнхоферу, 1977, с изменениями и дополнением черепа эудиморфодона.]

это время удалось добыть около 100 скелетов разной сохранности, найдены отпечатки перепонки крыльев и даже отпечатки покрова, напоминающего шерстный покров теплокровных животных. Помимо Золенгофена птерозавры найдены теперь на других территориях Европы, на Американском континенте, в Австралии, Африке, Азии. Большинство находок приурочены к морским, лагунным и озерным отложениям, и

позднего триаса до конца юрского времени. В поздней юре появились птеродактили. К концу мелового периода они достигли высокой морфологической приспособленности к полету и громадных размеров.

Судя по известным находкам, птерозавры были разнообразны. Масса их тела, по оценкам некоторых специалистов, колебалась от 4 г (это в два раза больше массы самых маленьких современных колибри) до 75 кг, а размах крыльев самого крупного (найденного в штате Техас, США) птерозавра составлял около 11,5 м. Разнообразным было строение черепа и зубной системы: у одних череп был высокий с короткими челюстями, у других — низкий

с длинными; были птерозавры с гребнем на черепе и без гребня: с клювом, покрытым роговым чехлом, с клювом без чехла или вовсе без клюва. По строению зубов, некоторым другим морфологическим признакам и остаткам пищи, заключенным внутри скелета, можно судить, чем и как могли питаться летающие ящеры. Одни фильтровали планктон через густую сеть волосовидных зубов; другие перетирали его своими 360 зубами, которые располагались на челюстях в виде гребня; третьи питались насекомыми; четвертые — рыбой, причем у некоторых клюв был полностью беззубым, а к нижней челюсти, по-видимому, крепился горловой мешок, подобный пеликаньему; пятые добывали морских лилий; шестые, видимо, питались падалью.

При всем многообразии летающих ящеров их объединяло крыло уникальной конструкции. Оно крепилось на одном пальце — летательном, наиболее длинном и толстом по сравнению с другими. Роль крыла выполняла кожистая перепонка, и все тело было приспособлено к полету: череп был легким, кости — полыми; имела грудина, снабженная килем, к которому крепились летательные мышцы; тело имело обтекаемую форму; мозг был более развит, чем у типичных рептилий, и напоминал птичий. Заметим, что еще у золенгофенских птерозавров в черепной коробке были найдены окаменевшие «ядра» (заполнившая ее и спрессовавшаяся за сотни миллионов лет порода), которые фактически представляют собой слепки мозга. По этим слепкам, полностью передающим его форму, размер и характер поверхности, и были сделаны выводы о строении мозга птерозавров, об уровне его развития.

Каков был характер полета птерозавров и его скорость? Безусловно, и тем и другим разные птерозавры отличались подобно тому, как нынешние птицы отличаются этими летными характеристиками. У палеонтологов мало весомых аргументов для точных ответов на подобного рода вопросы, но все же некоторую оценку полета можно дать, если учесть длину хвоста, размах крыльев и массу тела.

Длинный хвост рамфоринхов, видимо, обеспечивал стабильность полета, а короткий хвост птеродактилей — большую маневренность, подобную маневренности короткохвостых летучих мышей. Крупные птерозавры взлетали за счет машущих движений и большой подъемной силы огромных крыльев и парили в воздухе, как современные фрегаты и грифы. Есть рас-

четы, что один из птерозавров — птеранодон — с размахом крыльев 7—8 м и массой 16,6 кг летал со скоростью около 29 км/ч. Малых размеров ящеры могли летать, чередуя машущий полет с парением подобно многим современным птицам, а также летучим мышам. Но нагрузка на крыло у птерозавров была меньше, чем у большинства летающих форм такой же массы.

Хотя о птерозаврах известно уже многое, многое остается загадочным, и чтобы пополнить теперешние сведения, нужны новые находки. А богаты ли остатками летающих ящеров геологические породы? Часто ли удается обнаружить подлинные свидетельства существования птерозавров? К сожалению, находки их ископаемых остатков довольно редки: второй скелет птерозавра в Золенгофене был найден спустя 33 года, а третий — еще через 20 лет. Долгое время летающие ящеры были известны лишь с территории Европы и Америки, а первое сообщение о находке в Азии (в отложениях раннего мела Китая) летательного пальца — характерного признака птерозавров — появилось только в 1935 г. Прошло еще 30 лет до поры, когда, тоже в Китае, был найден костный материал, по которому удалось определить, что остатки принадлежат птеродактилю нового семейства — джунгариптеридам. В 40-х годах были обнаружены первые костные фрагменты птерозавров в Индии и СССР — в Казахстане. Уже в 80-х годах стали известны еще два птеродактиля из Китая и фрагменты костей летающих ящеров из Японии.

Трудно поверить, что небольшое число найденных в Азии птерозавров действительно отражает их былое незначительное распространение в этой части света — прародине многих животных. Удивительно, но и в богатейшей динозавровой фауне мезозоя на территории Монгольской Народной Республики птеродактили долгое время не были известны. Правда, были в Палеонтологическом музее АН СССР загадочные обломки костей, добытые в 1970 г. геологом В. Ф. Шуваловым из раннемеловых отложений Западной Монголии. Лишь через 10 лет автору этих строк удалось определить, что это фрагменты крыльев и нижних конечностей птерозавров<sup>1</sup>. Тогда стало ясно, что летающие ящеры должны быть и на территории Монголии.

<sup>1</sup> Бахурина Н. Н. // Палеонт. журн. 1982. Т. 4. С. 104—108.



Место захоронения птеродактилей в урочище Татал (Западная Монголия).

И в 1981 г. были организованы специальные поиски этих редких и своеобразных животных. За летающими ящерами отправился Алтайский отряд (под руководством автора статьи) Совместной Советско-Монгольской Палеонтологической экспедиции АН СССР и АН МНР. Мы направились в Западную Монголию, в Сангиндалайнурскую впадину — район, где В. Ф. Шувалов нашел обломки костей птерозавров. Здесь степь рассечена серией широких сухих русел, образованных мощными временными потоками. Нашей поисковой группе, состоящей из трех человек, предстояло буквально сантиметр за сантиметром обследовать каждый квадратный метр выходов раннемеловых отложений впадины, протянувшихся на много километров. У нас было большое желание найти остатки летающих ящеров, но надежд на это было очень мало: со времени шуваловской находки прошло более 10 лет, а песчаные и глинистые отложения легко разрушаются, размываются, потоки воды уносят эти рыхлые породы вместе с ценнейшим ископаемым материалом. Кроме того, десятилетней давности находка вполне могла оказаться единичной, как это не раз случилось в поисках птерозавров.

Но нам повезло. В результате тщательного обследования отложений и многодневных напряженных поисков в урочище Татал мы нашли крохотный, около 0,5 см в диаметре, обломок кости с характерным фрагментом ненарушенной суставной поверхности. Находка придавала нам уверенность в том, что захоронения птеродактилей должны быть в урочище, а хорошая сохранность обломка свидетельствовала о недалеком расположении захоронений. И снова поиски. Наконец, в глинистом слое одной из многочисленных горок мы увидели торчащий из породы обломок тонкой поллой кости. При ближайшем рассмотрении она оказалась фрагментом малой берцовой кости птерозавра. Двигаясь вдоль слоя породы, мы нашли затем целый костеносный горизонт и начали раскопку.

Сначала ломом и лопатой мы вынули «немые» слои до 1,5 м толщиной, а потом скальпелем и кисточкой счистили породу с каждой косточки. Но на этом кропотливая работа не кончилась. Чтобы вынуть из глинистой породы очень тонкие, порой чуть толще пергамента кости, к тому же пронизанные многочисленными трещинами, пришлось пропитывать каждый фрагмент клеем, иначе на воздухе под солнцем они могли обратиться в пыль. Итак, со всеми мерами предосторожности кости вынуты из породы, упакованы в дальнюю дорогу, и наконец, ценнейшие находки — в институте.



Челюсть птеродактиля в породе.

А дальше — обработка материала, тоже требующая большого мастерства и осторожности: даже на этой стадии легко уничтожить уникальную находку. Но несмотря на трудности поисков, раскопок, обработки, чрезвычайно интересно открыть и увидеть то, что было скрыто от глаз многие миллионы лет.

В раскопе горизонта мы нашли многочисленные кости в сочлененном состоянии, фрагменты челюстей и другие костные остатки. Судя по числу фрагментов летательных пальцев, мы обнаружили захоронение около 30 летающих ящеров. Несомненно, это были животные разного размера: размах их крыльев колебался от 0,8 до 3,5 м.

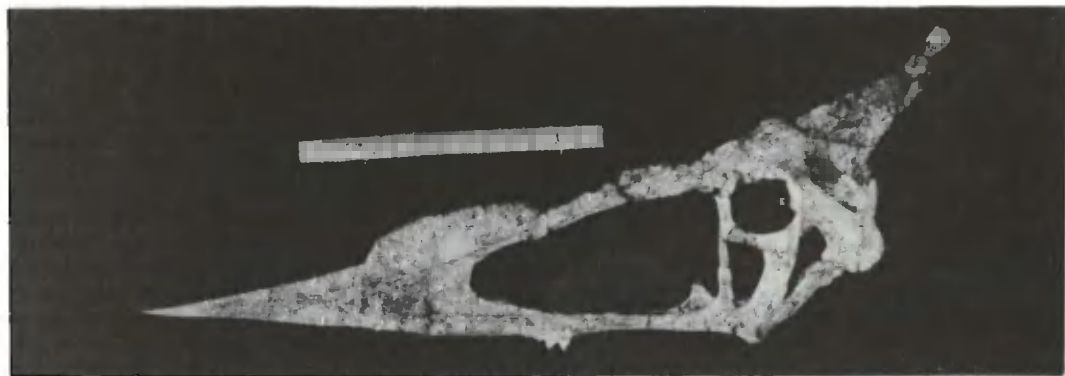
Следующим летом в том же урочище Татал мы снова нашли множество скелетных фрагментов птерозавров, в том числе череп и нижнюю челюсть хорошей сохранности, а также остатки других мезозойских животных, ранее неизвестных на территории Западной Монголии. По числу фрагментов плечевых костей мы определили, что на этот раз в раскопе были остатки 14 птеродактилей.

Теперь появилась возможность с уверенностью утверждать, что птерозавры не

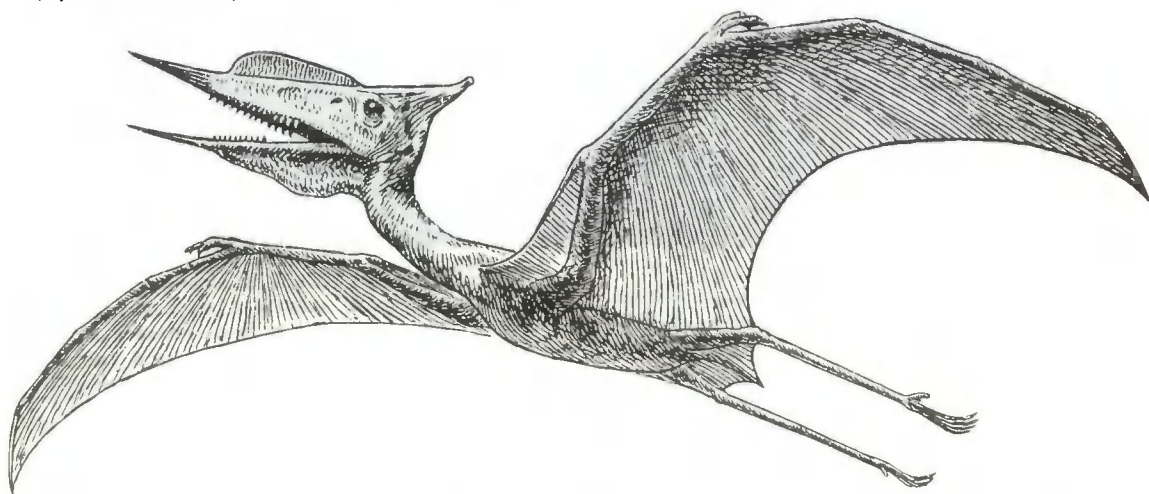
только существовали в Монголии, но и занимали прочное место в фауне раннего мела. Значит, можно рассчитывать, что костные остатки летающих ящеров удастся найти и в других мезозойских отложениях Монголии.

В наших руках оказался довольно богатый скелетный материал, в том числе очень хорошо сохранившиеся небная часть черепа, нижняя челюсть с суставной поверхностью и короноидным отростком, неизвестные у азиатских раннемеловых птеродактилей. Мы получили возможность дополнить сведения и о морфологии скелета, и о динамике движения птеродактилей, можно было составить представление об облике и образе жизни летающих ящеров Монголии, обитавших на берегах озер и находивших там пищу.

Эти были крупные птеродактили с размахом крыльев до 3,5 м, в 4 раза превышавшем длину тела. Передняя часть головы заостренной прямой формы была сжата с боков; на голове был хорошо развит срединный гребень, который переходил на затылок и возвышался над ним. Передняя часть клюва, покрытого роговым чехлом, была беззубой, а на остальной части имелись остроконечные продолговатые зубы — свидетельство того, что птеродактили Западной Монголии были хищниками, но питались, по-видимому, не наземными животными, а рыбой. Большое количество



Череп птеродактиля рода фобетор из урочища Татал [музейный экземпляр].



Птеродактиль из Западной Монголии. [Авторская реконструкция, рисунок В. Д. Колганова.]

костных остатков птеродактилей разного возраста позволяет предположить, что они были стайными животными.

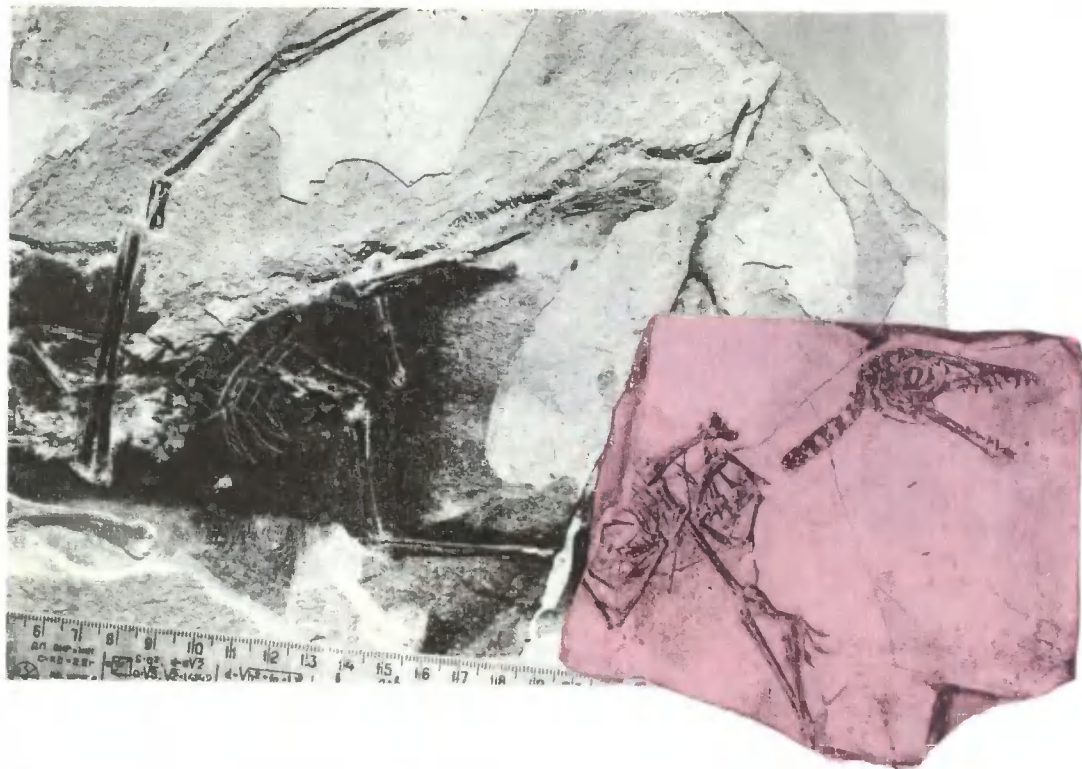
Открыты ли нами в Монголии новые летающие ящеры или это остатки тех же животных, которые обитали в других частях Азии в раннемеловое время? Сейчас всех найденных в отложениях этого возраста азиатских птеродактилей относят к двум родам (джунгариптер и нориптер) одного семейства джунгариптерид<sup>2</sup>. Мы считаем, что птеродактиля из Западной Монголии

следует отнести к тому же семейству. Но некоторые отличия — меньший по сравнению с китайским птерозавром череп, к тому же более легкий и ажурный, прямой, а не загнутый вверх клюв, большее количество зубов, а также более древний возраст находки — позволяет нам выделить монгольского птеродактиля в новый род *Phobetor* (устрашающий, страшило).

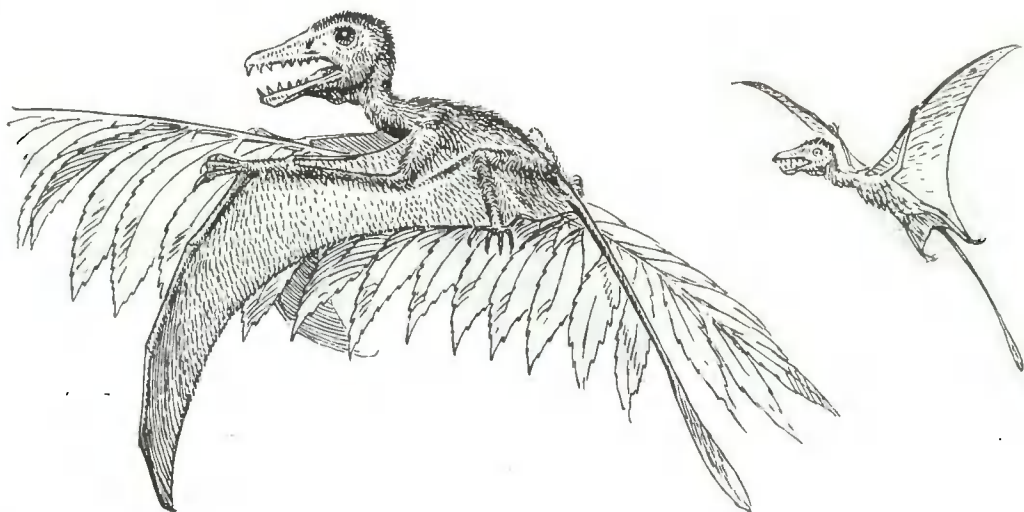
Итак, к известным уже птерозаврам добавился новый — монгольский, особенности его строения дополнили сведения о морфологическом многообразии летающих ящеров. Однако палеонтологи еще не смогли объяснить назначение всех морфологических структур птерозавров. Загадочной, например, остается роль гребня на голове некоторых птеродактилей<sup>3</sup>. Одни ис-

<sup>2</sup> Young C. C. // Mem. inst. Vert. Pal. Ac. Sin. 1973. Bd. 11. S. 18—35.

<sup>3</sup> Wellnhofer P. Pterosauria // Handbuch der Paläoherpetologie. Bd. 19. Stuttgart. 1978.



Отпечаток летательной перепонки (с л е в а) и скелет рамфоринга в каратауских сланцах. В нижней части отпечатка видны волокна покрова, напоминающего волосяной покров теплокровных животных.



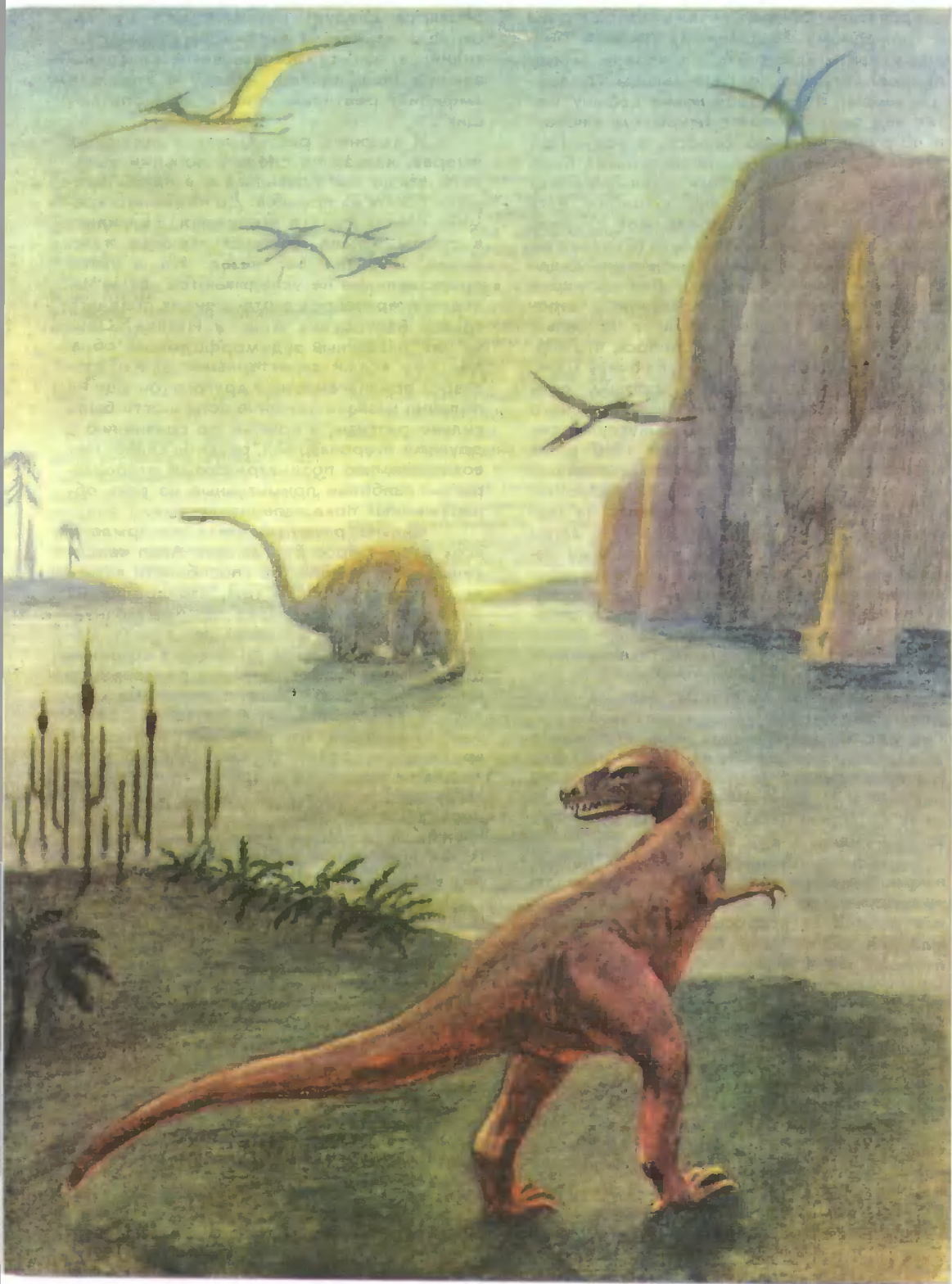
Рамфоринг нечисть волосатая в полете (с п р а в а) и сидящий на ветке. (Реконструкция автора, рисунок В. Д. Колганова.)





Ящеры Западной Монголии. Начало раннего мела. В воздухе — летающий ящер фобетор; на мелководье — зауропод, питающийся водной растительностью; на берегу — пситтакозавр, растительноядный динозавр (с л е в а), и крупный хищный динозавр. [Авторская реконструкция по находке в урочище Татал, рисунок В. Д. Колганова.]





следователи считают, что у птеранодона к громадному затылочному гребню, бывшему почти вдвое больше черепа, могли прикрепляться челюстные мышцы. По другой версии, птеранодон ловил добычу, летая над самой водой с открытым клювом и погрузив нижнюю челюсть в воду. При таком способе охоты голова должна была поддерживаться сильными шейными мышцами, которые и крепились к гребню. Есть также мнение, что гребень мог служить своеобразным рулем в полете (будучи сам неподвижным, гребень фактически делал рулем подвижную голову). Для проверки этого предположения проводились аэродинамические эксперименты с моделью птерозавра, в которых выяснилось, что возможность выполнять роль руля очень мала. Однако гребень мог быть хорошим противовесом громадному клюву, за счет чего меньшей могла быть шейная мускулатура.

И еще одна загадка. В 1948 г. из каратауских сланцев Казахстана, возникших на месте верхнеюрского озера, палеонтолог А. Н. Рябинин описал первого на территории нашей страны рамфоринха. Затем в 1971 г. здесь же члены экспедиции нашего института вновь нашли остатки рамфоринхов. Это были не только остатки скелетов, но и хорошо сохранившиеся отпечатки перепонки крыльев, тела, конечностей. На всех отпечатках сохранились обугленные волокна, напоминавшие волоски теплокровных животных. Можно было даже рассмотреть отдельные «волоски». Судя по их изгибу, они были достаточно эластичны и достигали в длину от 4 до 7 мм. Ни природа, ни возникновение волосков пока не ясны. Описавший этого рамфоринха А. Г. Шаров назвал животное *Sordes pilosus* — нечисть волосатая.

Предположение о том, что покров птерозавров был волосатым, высказывалось еще при изучении сохранившихся отпечатков перепонки птерозавров Золенгофена. Находка обугленных покровных волокон птерозавров в Каратау — явное подтверждение такого предположения, хотя и неясно, шерсть ли, в современном представлении, покрывала тело этих животных. Пока волосатый рамфоринх из Каратау — единственный в мире птерозавр с хорошо сохранившимся (лишь обугленным) покровом.

Если птерозавры были покрыты шерстью или чем-либо подобным ей, значит они могли быть теплокровными! Основываясь на таком предположении и учитывая многие другие морфологические особенности, некоторые палеонтологи считают, что пте-

розавров следует рассматривать не как отряд в подклассе архазавров класса рептилий, а как самостоятельный класс наземных позвоночных, наряду с классами амфибий, рептилий, птиц и млекопитающих<sup>4</sup>.

И наконец, рассказывая о летающих ящерах, нельзя не сделать попытки выяснить, когда они появились и в каком времени искать их предков. До недавнего времени считалось, что птерозавры появились в самом начале юрского периода, т. е. около 190 млн лет назад. Но в такое представление не укладываются новые находки птерозавров в отложениях позднего триаса Бергамских Альп в Италии. Один из них, названный зудиморфодоном, обладал уже всеми характерными для птерозавров признаками, но у другого (он еще не получил названия) нижние конечности были сильно развиты, а крылья, по сравнению с другими птерозаврами, развиты слабо. Нет сомнения, что поздне триасовые птерозавры — наиболее примитивные из всех обнаруженных пока палеонтологами.

Сильно развитые когти на крыле у всех птерозавров Бергамских Альп свидетельствуют не только о способности лазать по деревьям, но и о том, что предки их перешли к полету через промежуточную стадию жизни на деревьях или скалах. Некоторые примитивные признаки в строении птерозавров позднего триаса подтверждают мысль, что они весьма рано обособились в самостоятельную ветвь. Вероятно они произошли от рептилий пермского времени — эозухий (кстати, именно эозухии были предками и других групп рептилий), а не псевдозухий триаса, как считалось раньше<sup>5</sup>. Значит, время появления группы летающих ящеров следует считать более древним — не 190, а более 225 млн лет назад.

Пока еще многие вопросы, связанные с древними летающими животными нашей планеты, ждут своего разрешения. Советские палеонтологи только приоткрыли завесу древней жизни в воздушном пространстве Азии, найдя птерозавров в Западной Монголии. Пополнить сведения об истории, составе и распределении мезозойской фауны центральной Азии нам еще предстоит.

<sup>4</sup> Kuhn O. Die fossile Wierbeltierklasse Pterosauria. München, 1967.

<sup>5</sup> Wild R. // Naturwissenschaften. 1984. Bd. 71. S. 1—11.

## Агаты Прииртышья

**В. С. Ерофеев,**  
доктор геологических наук

Институт геологических наук  
им. К. И. Сатпаева АН КазССР  
Алма-Ата

**В. М. Мацуй,**  
кандидат геолого-минералогических наук

Институт геологических наук  
АН УССР  
Киев

Начиная с 30-х годов нашего столетия в музеях и частных минералогических коллекциях стали появляться изумительной красоты агаты, привезенные из Прииртышья<sup>1</sup>. Сначала это были сравнительно редкие находки, воспринимавшиеся как случайные. Однако с течением времени находки множжились, а с конца 60-х годов геологи и энтузиасты-любители природного камня стали доставлять с берегов Иртыша большие коллекции ювелирных агатов. Агаты находили в горах в плотных скальных породах темного цвета, в обломках и окатышах в долинах рек и ручьев, в гальке древних конгломератов. Но особенно впечатляющими были россыпи агатового камня на склонах пологих сопок и побережьях степных озер северо-запада Семипалатинского Прииртышья. Они всегда попадались в степи как-то неожиданно. Россыпи агатов простирались в виде полос и обширных пятен, не согласующихся с рисунком современной долинной сети. Отмытые талыми и дождевыми водами камни сверкали на солнце

неясными переливами матовых отблесков, как бы повторяя обманчивую игру света степных миражей. А под шероховатой поверхностью почти каждого обломка открывалась тончайшая гармония рисунка и красок. Откуда такое разнообразие и богатство? Что породило эти скопления красивейшего ювелирного камня? Ответы на подобные вопросы помог дать анализ длительной геологической истории и палеогеографии бассейна верхнего Иртыша.

Образование агатов Прииртышья, как и агатов, обнаруженных в других районах мира, связано с формированием массивов вулканических пород. В конце палеозойской эры, около 300 млн лет назад, территория Прииртышья отличалась довольно активной вулканической деятельностью, здесь шли процессы горообразования, которые придали этой территории облик приподнятой горно-складчатой страны. Особенно сильные наземные и подводные излияния андезит-базальтовых, андезит-дацитовых и андезитовых лав, выбросы их туфов происходили в районах Саур-Тарбагатая и северо-запада Семипалатинского Прииртышья. В пустотах и газовых пузырях лав и туфов формировались разнообразной формы миндалины, желваки, линзы и прожилки агата. Рождение агата происходило при постепенном заполнении пустот остаточными продуктами химической дифференциации магмы. В тех местах, где в вулканических породах было относительно много пустот и камер, образовались так называемые первичные скопления агатов и халцедонов. Однако, как часто бы ни встречались подобные скопления, концентрация агатов в них невелика.

Интенсивные движения земной коры продолжались в Прииртышье и в первую половину мезозойской эры (200—150 млн лет назад). Благодаря им древние вулканические по-

роды на многих участках поднимались на поверхность и подвергались механическому разрушению водными потоками, ледниками, прибоем и т. д. Вместе с обломками горных пород переносились и извлекаемые из разрушающихся пластов лав и туфов разнообразные формы агатов. Поэтому в мезозойских конгломератах агаты находятся чаще всего в виде единичных экземпляров. Но качество их невысоко — камни «испорчены» многочисленными трещинами, окатышиванием и дроблением во время переноса водными потоками.

Горные сооружения Прииртышья непрерывно разрушались в течение всей второй половины мезозойской эры. Выравнивание рельефа, периодически прерываемое кратковременными «вспышками» тектонической активности, закончилось к концу мелового периода (67 млн лет назад). В Прииртышье, на Алтае, в Саур-Тарбагатае и Казахском нагорье к этому времени уже простирались обширная денудационная равнина — пенепплен, для которого характерно сочетание плоских выровненных поверхностей с невысокими грядами и возвышенностями с мягкими очертаниями и пологими склонами. Свидетели этой эпохи в Прииртышье — многочисленные «останцы» древнего пенепплена, покрытые корой выветривания на хребтах Алтая, Саура, Манрака и особенно на прилегающих к Иртышу склонах Казахского нагорья.

В эпоху формирования пенепплена механическое разрушение горных пород шло очень медленно, однако мощное химическое выветривание сильно изменяло породы. Под действием воды и химически активных природных растворов подавляющее большинство неглубоко залегавших минералов магматических и метаморфических горных пород разрушалось и замещалось тонкокристаллическим глинистым веществом. Об-

<sup>1</sup> Агаты — различно окрашенные агрегаты халцедона (скрытокристаллической разновидности кварца, SiO<sub>2</sub>), параллельно-полосчатого или концентрически-зонального строения.



**Карнеол-агат, многоцентровый агат, агат бразильский, прихотливо-узорчатый агат.**

разовавшаяся таким путем глинистая кора выветривания почти сплошным чехлом покрывала поверхность древнего пенеплена. Толщина этого чехла составляла десятки метров.

В коре выветривания в более или менее неизменном состоянии сохранились лишь те минералы, которые представлены окисными и гидроокисными соединениями, устойчивыми к химическому выветриванию. В древних лавах базальтового

и андезит-базальтового состава и их туфах такими минералами оказались агаты и халцедоны, сложенные тонкокристаллическими соединениями окиси кремния. Они-то и сохранялись почти в первозданном виде, тогда как окружавшие их вулканические породы превращались в легко размываемые глины. На вершинах и пологих склонах гряд и возвышенностей пенеплена, где на поверхность выходили древние вулканические породы, дождевыми и тальными водами постепенно разрушался и сносился глинистый мелкозем верхних горизонтов коры выветривания. Освобождающиеся при этом из

глин разнообразные по форме и размерам агаты из-за слабой энергии водотоков или оставались на месте, или переносились на склоны и подножья гряд и возвышенностей.

Именно накопление на месте (или почти на месте) относительно тяжелых минералов и желваков, длившееся в течение десятков миллионов лет, породило россыпи агатов. Благодаря такой длительности в россыпях концентрировались агаты из разных зон кор выветривания и различных пород. Вот почему так удивительно разнообразны агаты в россыпях древнего пенеплена Прииртышья. Здесь поб-





Агат с кварцем.

лизости друг от друга можно встретить черно-белые арабские ониксы и пятнисто окрашенные серые моховики, дендритовые халцедоны, белые фарфоровидные кахалонги и ирис-агаты, кольцевые и узорчатые разновидности агатов, медовые и красные сердолики, сердоликовые ониксы, сардеры, сардониксы, обломки красно-коричневых и бурых копейчатых яшм. Вся эта цветовая и узорчатая гамма представлена в миндалинах и обломках размером от несколь-

ких миллиметров до 15 см в диаметре. Длительное пребывание в глинах коры выветривания и на дневной поверхности наложило свой отпечаток на некоторые агаты, в них появились дополнительные цветовые оттенки и пятна за счет окисных и гидроксидных пленок металлов, разнообразных трещин и пустот.

Благодаря большому разнообразию, агаты Прииртышья обладают высокими художественно-эстетическими качествами. Они уже украшают коллекции ряда музеев нашей страны и, нужно полагать, со временем войдут составной частью в мировой фонд деко-

ративных камней. Но важна не только их эстетическая ценность. В изумительном соцветии красок и оттенков агатов Прииртышья, тончайшей структуре рисунка и неповторимой индивидуальности облика отражается величайшая сложность породивших их природных процессов и поступательное движение времени, что мы привыкли выражать единым понятием: геологическая история.

## Метаморфизм, континенты и зоны субдукции

Н. Л. Добрецов



Николай Леонтьевич Добрецов, член-корреспондент АН СССР, директор Геологического института Бурятского филиала СО АН СССР, заместитель председателя Межведомственного петрографического комитета. Специалист в области глобальной петрологии, минералогии и метаморфизма. Автор ряда монографий, в том числе: Фацции метаморфизма (совместно с В. С. Соболевым и др.). М., 1970, 1974; Введение в глобальную петрологию. Новосибирск, 1980; Глобальные петрологические процессы. М., 1981. Лауреат Ленинской премии.

В науках о Земле давно уже обособилось и с годами усиливается физико-химическое направление, в рамках которого исследуются прежде всего глубинные процессы. Важное место среди них занимает метаморфизм — преобразование осадочных или магматических пород в недрах Земли под воздействием высоких температур и давлений. Хотя процессы метаморфизма невозможно наблюдать на поверхности Земли или других планетных тел (и следовательно, невозможно смоделировать с учетом природных наблюдений), их можно с полным основанием отнести к числу хорошо оцениваемых геологических процессов. Дело в том, что для изучения метаморфизма используются особые методы петрологии, детально разработанные за последние годы. Благодаря их применению удается глубоко проникнуть в суть метаморфических проблем, за которыми стоят более общие геологические вопросы, например происхождение континентов или механизм погружения океанических блоков земной коры под континентальные.

### МЕТОДЫ МЕТАМОРФИЧЕСКОЙ ПЕТРОЛОГИИ

Метаморфические изменения выражаются в перестройке минерального со-

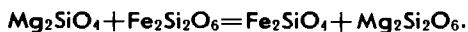
става породы, а также взаимного расположения слагающих ее минеральных зерен. Так, один из самых распространенных на Земле минералов — альбит — на глубине с ростом температуры и давления распадается на жадеит и кварц, а затем кварц может перейти в козсит. Характерно, что оба новообразованных минерала — жадеит и козсит — сохраняют при этом состав, близкий к составу исходных альбита и кварца, но приобретают более высокую плотность. Этот переход, как и другие подобные переходы, происходит при определенных температурах и давлениях. Следовательно, по минеральному составу метаморфических пород можно установить температуры и давления, при которых протекали те или иные метаморфические процессы.

Многие конкретные температуры и давления переходов удалось экспериментально определить только в последние годы, и произошло это благодаря совершенствованию экспериментальной техники. Но сама идея использовать минеральный состав пород для воссоздания условий их кристаллизации возникла еще в начале века и получила название принципа минеральных фаций. Согласно этому принципу, к одной минеральной фации принадлежат (и, соответственно, сформировались в одина-

ковых условиях) только те породы, которые имеют единый или очень близкий минеральный состав. Породы же, обладающие разным минеральным составом, даже при полном сходстве химического состава следует отнести к разным минеральным фациям, поскольку условия их формирования были различны. По типичным метаморфическим породам, возникающим при каких-то конкретных температурах и давлениях, минеральные фации получили названия зеленосланцевой, гранулитовой, глаукофансланцевой, амфиболитовой и т. д.

Формулировка и развитие принципа минеральных фаций связаны с именами известных скандинавских ученых В. Гольдшмита и П. Эскола, а также советских петрологов Д. С. Коржинского, В. С. Соболева и их учеников. В последние годы были разработаны способы выделения минеральных фаций на картах и созданы минералогические «термометры» и «барометры», позволяющие эффективно определять температуру и давление кристаллизации или перекристаллизации горной породы.

Один из наиболее эффективных способов оценки температуры основан на наблюдении за перераспределением компонентов (химических элементов или их стабильных изотопов) между сосуществующими минералами. Например, перераспределение железа и магния между оливином  $(\text{Fe}, \text{Mg})_2\text{SiO}_4$  и пироксеном  $(\text{Fe}, \text{Mg})_2\text{Si}_2\text{O}_6$  можно изобразить следующей обменной реакцией:



Константа равновесия этой реакции определяется прежде всего температурой: с понижением температуры доля железа в оливине становится выше, чем в сосуществующем с ним пироксене. Но наряду с этим данное равновесие зависит также от окислительных и некоторых других условий. Поэтому на практике приходится в каждой из пород исследовать несколько таких равновесий, зависящих от какого-то одного фактора: температуры, давления, окислительных условий<sup>1</sup>.

Таким образом, по особенностям минерального состава метаморфических пород, а также по ориентировке минераль-

ных зерен мы можем оценить условия их формирования. Но как эти породы, сформировавшиеся при высоких температурах и давлениях, оказываются на поверхности Земли?

Существует несколько возможностей их «доставки». Глубинные породы могут оказаться на поверхности в результате подъема блоков земной коры и их эрозии в центральных частях разрушенных горных сооружений. Они могут появиться при быстрых (в геологическом масштабе времени) перемещениях отдельных чешуй земной коры вдоль наклонных поверхностей, называемых надвигами. Наконец, их обломки могут быть вынесены магмами, захватывающими глубинные породы либо непосредственно в месте зарождения магм, либо на их пути к земной поверхности. Эти обломки называют ксенолитами.

Но являются ли метаморфические породы особенностью земной коры, или же они существуют также в коре других планет? Вопрос этот интересен и важен, так как с его решением связано развитие сравнительной планетологии.

## СТРОЕНИЕ И МЕТАМОРФИЗМ ЗЕМЛИ И ПЛАНЕТ ЗЕМНОЙ ГРУППЫ

Пока наши сведения о планетах земной группы носят преимущественно «поверхностный» характер. Так, на поверхности Луны и Марса обнаружено огромное количество кольцевых структур, возникших при падении крупных и мелких метеоритов. Хорошая сохранность этих ударных структур свидетельствует о том, что в геологическом смысле эти планеты мертвы. Точно установлено, что геологические процессы на Луне прекратились почти 3 млрд лет назад. Венера же, на поверхности которой условия столь резко отличаются от земных (температура около 500 °С и давление около 0,1 кбар), в геологическом отношении стоит гораздо ближе к Земле.

На геологической карте Венеры, составленной советскими специалистами и впервые продемонстрированной на 27-й сессии Международного геологического конгресса в Москве в августе 1984 г., хорошо видны структуры типа рифтов, деформированные складчатые области, жесткие и стабильные массивы, подобные земным. Следовательно, на Венере продолжается активная геологическая жизнь.

Состав твердой оболочки Венеры точно пока неизвестен. Согласно предвари-

<sup>1</sup> Подробнее об этом см., напр.: Перчук Л. Л. Методы термометрии и барометрии в геологии // Природа. 1983. № 7. С. 88—97.





Петрологический разрез земной коры и верхней мантии от центра континента к срединно-океаническому хребту [по данным В. С. Соболева и др., 1977]. Вместе с земной корой верхняя (литосферная) мантия составляет твердые плиты, под которыми находится частично размягченный астеносферный слой. Кора и верхняя мантия под разными геологическими структурами неоднородны по составу и строению. Цифрами на разрезе отмечены зоны верхней мантии, имеющие линзовидно-полосчатое строение: I — анортит-оливиновая, II — шпинель-оливиновая, III — пироповая, IV — алмазная. Чем больше в верхней мантии энклогитов и пироксенитов, тем сильнее она истощена, т. е. обеднена легкоплавкой составляющей. Так, сильно истощена алмазная зона. В целом наиболее холодная и истощена верхняя мантия под древними платформами, хорошо прогрета и слабо истощена — в «активных» зонах океана. В районах предполагаемого выхода в океанах горячих мантийных струй («горячих точек») верхняя мантия вторично обогащена легкоплавкими компонентами.



тельными данным, породы ее стабильных блоков близки к земным сиенитам, а не к гранитам, слагающим континенты Земли. В составе атмосферы Венеры резко преобладает углекислый газ, причем количество его сходно с количеством, содержащимся в твердой оболочке Земли в форме карбонатов кальция и магния.

Как известно, моря и океаны покрывают около 70 % земной поверхности. Дно этих крупных понижений, исключая примыкающие к континентам краевые части, почти сплошь покрывают базальты. Подобные понижения на Луне и Марсе, а возможно и на Венере, также «залиты» базальтами, хотя они и безводны. Причем количество базальтов уменьшается от Земли к Луне пропорционально уменьшению массы планет (см. табл.).

Таким образом, залитые базальтами понижения характерны для планет земной группы. Главное же их отличие заключается в присутствии или отсутствии атмо-

сферы и гидросферы, а также в объеме и составе приподнятых областей — континентов. Наличие гидросферы и гранитный состав континентов являются главной особенностью нашей планеты. Нам представляется, что эта ее специфика определяется составом, размерами и темпами геологической эволюции Земли.

Чтобы выяснить глубинное строение Земли и проследить основные этапы ее эволюции, исследуются древнейшие и наиболее глубинные горные породы. Большинство глубинных горных пород одновременно являются и древнейшими — старше 2 млрд лет, но часть глубинных пород (даже пород верхней мантии) имеет довольно молодой возраст — моложе 100 млн лет. Однако и те и другие породы относятся к разряду метаморфических и, следовательно, могут изучаться методами метаморфической петрологии.

На поверхности Луны и Марса метаморфические породы не обнаружены,

## Сравнение планет земной группы

Параметры	Луна	Марс	Венера	Земля
Радиус, км; $g$ , см · с <sup>-2</sup>	1738; 162	3394; 371	6051; 890	6378; 978
Состав атмосферы и гидросферы	—	CO <sub>2</sub> (+H <sub>2</sub> O)	CO <sub>2</sub> (+H <sub>2</sub> O)	H <sub>2</sub> O; O <sub>2</sub> +N <sub>2</sub> +CO <sub>2</sub>
Площадь материков, %	84	60	40—50	35
Мощность коры материков, км	200	?	?	40
Состав материков (главные минералы)	анортозит	анортозит+H <sub>2</sub> O+CO <sub>2</sub>	сиенит	андезит+гранит
Возраст вещества материков, млрд лет	3,9—4,6	1,8 (?)	?	3,8 (3,0?)
Площадь «морей», %	16	40	50—60	65
Состав «морей»	базальты	базальты	базальты	базальты
Возраст «морей», млрд лет	3,9—3,0	до 1,0	до современного	0,2—0

 \* H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> в твердом состоянии

если, конечно, не считать продуктов ударного метаморфизма, возникших при падении метеоритов и образовании ударных кратеров. Это и понятно, поскольку средние для Земли условия метаморфизма (температура 600 °С и давление 5—10 кбар) достигаются на Земле на глубине 15—30 км, на Марсе — на глубине более 50 км, а на Луне — на глубине нескольких сотен километров. Естественно, что вероятность попадания метаморфических пород на поверхность Марса и Луны очень невелика, да и процессы деформации внешних оболочек этих планет, судя по имеющимся картам их поверхности, были гораздо менее интенсивными, чем на Земле.

На Венере же глубины, на которых достигаются условия, необходимые для протекания метаморфических процессов, и степень деформации ее внешних оболочек, по всей вероятности, сходны с земными. Более того, уже на самой поверхности Венеры, где температура равна 400—

500 °С, а давление составляет 0,1 кбар, условия близки к тем, при которых метаморфические процессы протекают в некоторых «горячих» участках земных недр недалеко от поверхности (например, в районах активного вулканизма). Но, несомненно, еще интереснее было бы найти на Венере глубинные метаморфические породы, которые могли бы дать важную информацию о современном распределении температур в недрах этой планеты и о ее термальном режиме в прошлом.

## ГЛУБИННАЯ НЕОДНОРОДНОСТЬ ЗЕМЛИ

Еще задолго до бурения глубоких и сверхглубоких скважин геологами была получена информация о составе, состоянии и эволюции земных недр. Даже Кольская сверхглубокая скважина, достигшая рекордной глубины 12 км, лишь детализировала глубинный разрез, который в общих

чертах уже был известен благодаря изучению наклонных слоев, выходящих на земную поверхность. Но вместе с тем, эта скважина дала нам и принципиально новые сведения. Самое неожиданное заключалось, пожалуй, в следующем: выявленные геофизиками плотностные границы в земной коре оказались связанными не со сменой состава пород, как считалось ранее, а со специфическими пологими зонами разуплотнения. Такие трещиноватые, насыщенные горячими минерализованными водами зоны были обнаружены на глубине около 6 км, что раньше представлялось невероятным.

Интереснейшую информацию о глубинном строении земной коры и верхней мантии дают и природные сверхглубокие «скважины» — алмазоносные кимберлитовые трубки. Они выносят обломки пород — ксенолиты — с глубины до 200 км. Благодаря изучению глубинных ксенолитов из кимберлитовых трубок и других магматических каналов, а также древнейших пород на поверхности Земли, специалисты из Института геологии и геофизики СО АН СССР во главе с В. С. Соболевым еще в 70-х годах построили серию петрологических разрезов коры, включающих и часть верхней мантии.

Данные разрезы показали, что не только земная кора, но и верхняя мантия под разными геологическими структурами очень неоднородны по составу и строению. Это означает, что существует несколько типов верхней мантии, которые отличаются друг от друга прежде всего по степени прогрева и «истощенности» мантийного вещества<sup>2</sup>. Наиболее истощенной и холодной оказалась верхняя мантия под древними платформами (например, под Сибирской), которые являются «древним теменем» континентов. Напротив, под такими активными зонами в океанах, как срединно-океанические хребты, верхняя мантия довольно слабо истощена и хорошо прогрета. А в районах предполагаемого выхода в океанах горячих мантийных струй (например, в районе Гавайских о-вов в Тихом океане или Азорских о-вов в Атлантике) верхняя мантия, по-видимому, регенерирована, т. е. вторично обогащена легкоплавкими компонентами.

По современным представлениям, особая неоднородность (расслоенность или

линзовидность) характерна лишь для самой верхней, литосферной части мантии. Вместе с земной корой она составляет твердые литосферные плиты, толщина которых в океанах равна 15—80 км. Под ними, согласно геофизическим и петрологическим данным, находится размягченный в результате частичного плавления астеносферный слой. В центральных же частях континентов неоднородность твердой литосферы продолжается, судя по глубинным ксенолитам, примерно до 250 км, а астеносферный слой, если исходить из геофизических данных, вообще может отсутствовать.

Таким образом, центральные части континентальной литосферы подобны айсбергам, сидящим на нижней мантии, как на мели, и лишенным способности двигаться. В частности, почти не движутся Сибирская плита и Антарктида (скорость их перемещения меньше 1 см в год, что в пределах точности реконструкций абсолютных скоростей движения плит неотлично от нуля), а Африка только поворачивается относительно оси, которая располагается в северо-западной части континента. Остальные плиты движутся со скоростью от 2 до 11 см в год.

## ПЕТРОЛОГИЯ КОНТИНЕНТОВ И ИХ ПРОИСХОЖДЕНИЕ

Прежде чем говорить о механизме перемещения плит и связанных с ним проблемах, отметим некоторые особенности континентальных плит (или, точнее, «глыб»), выявленные методами метаморфической петрологии. Дело в том, что основную часть континентов слагают древние платформы и их осколки — массивы, в составе которых преобладают архейские (старше 2,5 млрд лет) метаморфические породы. Эти породы сформировались при температуре около 950 °С и давлении 9—10 кбар, т. е. в условиях гранулитовой фации метаморфизма. Последнее означает, что породы, располагающиеся ныне на поверхности или под тонким (0,5—2,0 км) чехлом осадков, в архее находились на глубине около 35 км. Следовательно, примерно на такую величину были разрушены древние массивы, и этой «срезанной» эрозией части оказалось достаточно для того, чтобы сформировать (в результате переотложения осадков и их метаморфизма) остальную массу континентальной коры.

Отсюда вытекает еще одно следствие, очень важное для понимания геологической эволюции нашей планеты: основ-

<sup>2</sup> Под истощенностью мантии понимается ее обеднение легкоплавкой (базальтоидной) составляющей.

ной объем континентальной коры возник более 2,5 млрд лет назад, а судя по некоторым данным, даже более 3,8 млрд лет назад. Если исходить из современных геохимических оценок, столь же давно сформировался основной объем водной массы океанов. И лучше всего два этих факта, характеризующих специфику нашей планеты, могут быть объяснены в рамках модели раннего выплавления континентальной коры. Согласно этой модели, развиваемой японским петрологом И. Куширо, автором настоящей статьи и некоторыми другими исследователями, на раннем этапе эволюции Земли (возможно, более 3,8 млрд лет назад) из богатой водой и другими летучими компонентами мантии выплавились водные андезитовые магмы. Они-то и слагали первичную кору Земли, имевшую андезитовый состав<sup>3</sup>.

Чтобы представить себе разрез этой древней андезитовой коры, обратимся к современным океанам, на дне которых изливаются не андезиты, а базальты. Здесь верхнюю часть разреза составляют 3—5-километровый слой базальтов, ниже залегает такой же слой диабазов и габбро (продуктов глубинной кристаллизации и расслоения базальтовой магмы), а еще ниже находятся реститы — высокомагнезиальные породы, оставшиеся после выплавления базальтов, диабазов и габбро. Подобно этому, в верхней части древней андезитовой коры должны были располагаться андезитовые и более кислые лавы, ниже — диориты и тоналиты (глубинные аналоги андезитов), а еще ниже — анортозиты, сходные с древней анортозитовой корой Луны. Интересно отметить, что подобный разрез действительно удается реконструировать в древнейших участках Балтийского, Алданского и Канадского щитов, а также в других местах. Более поздние геологические процессы не внесли существенных изменений в нарисованную выше схему формирования земной коры. Произошла лишь дальнейшая дифференциация первичной андезитовой коры, благодаря чему обособился верхний собственно гранитный слой.

Таким образом, океанические и континентальные структуры Земли отличаются составом пород: гранитные континенты и базальтовые океаны. Но, что еще важнее, эти структуры отличаются и временем формирования: континенты возникли на ран-

нем этапе эволюции Земли — 2,5 или даже 3,8 млрд лет назад, а океаны в современном их виде — не более 150 млн лет назад, что устанавливается прежде всего по возрасту океанического дна.

Конечно, это только основная идея или, точнее, схема формирования современного облика Земли. В действительности гранитные континентальные массы не раз переотлагались в виде осадков или передвигались в виде плит по поверхности Земли. Базальтовая же кора прошлого могла уничтожаться или перерабатываться в новую андезитовую кору.

### ПОГРУЖЕНИЕ ОКЕАНИЧЕСКОЙ КОРЫ В ЗОНАХ СУБДУКЦИИ

Легкая андезитовая или гранитная кора континентов, однажды сформировавшись, навсегда осталась на поверхности Земли, так как нет таких геологических процессов, при которых она могла бы «утонуть» в плотном веществе верхней мантии. А для более тяжелой базальтовой коры океанов такая возможность существует, и это подтверждено экспериментами. Дело в том, что в случае повышения давления (при относительно низких температурах) или в случае понижения температуры (при относительно высоких давлениях) базальт и его крупнокристаллический эквивалент — габбро — превращаются в эклогит. Поскольку эклогит имеет плотность 3,3—3,5 г/см<sup>3</sup>, а подкоровая часть верхней мантии — 3,0—3,2 г/см<sup>3</sup>, то эклогит должен «тонуть» в менее плотном веществе верхней мантии.

В каких же геологических условиях срывает подобный механизм? На этот счет существует несколько мнений. Согласно модели американских геохимиков Д. Грина и А. Рингвуда, в корнях утолщенной коры горных сооружений (если эти корни сформировались быстро и остались относительно холодными) на глубине 40—60 км габброидная часть коры будет превращаться в эклогит и, отрываясь, «тонуть» в верхней мантии. При этом будет уменьшаться толщина земной коры, а вместе с ней — и высота горных сооружений. По модели советских геофизиков Е. В. Артюшкова и С. В. Соболева, превращение неустойчивого габбро в эклогит возможно и в результате изменения кинетических условий самого превращения. Такие очень быстрые переходы могут произойти под глубокими впадинами типа южной части Каспийского моря.

Но в настоящее время самой попу-

<sup>3</sup> Андезиты — породы, промежуточные по составу между гранитами и базальтами.

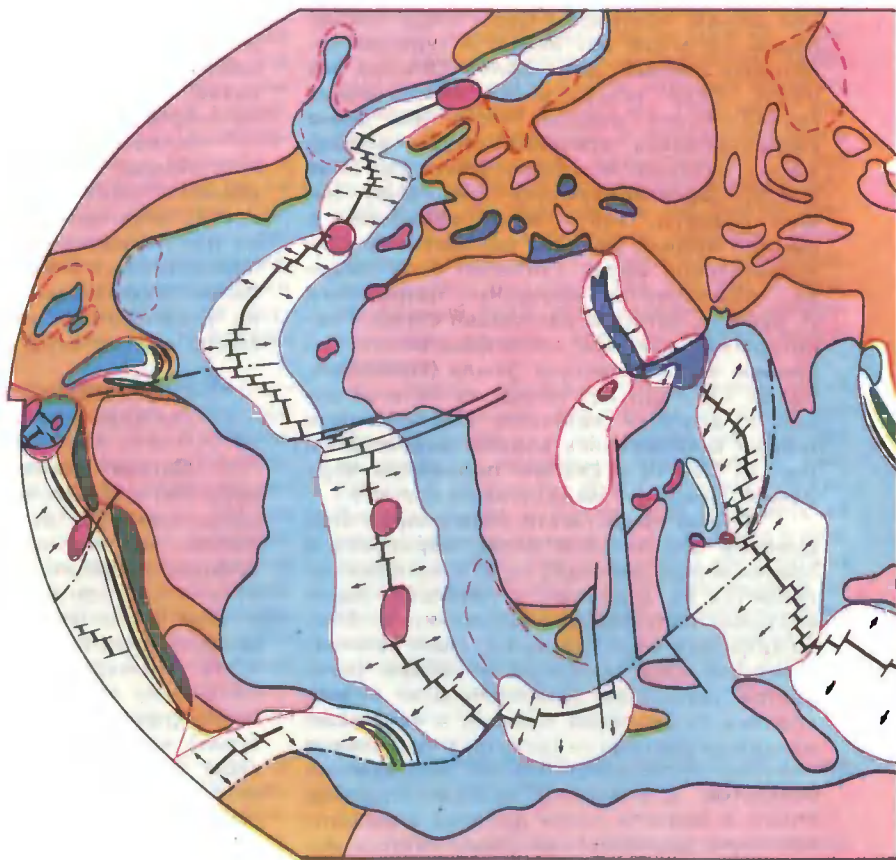


Схема расположения континентальных и океанических плит, а также зон активного вулканизма и расширения океанической коры. Кора расширяется и вновь образуется в осевой части океана и в восточной части Тихого океана. Под этими участками располагается цепочка конвекционных ячеек, частично заходящих под Северную и Южную Америку. Пожелезненные ячейки меньших размеров, частично уже не действующие (отмершие), устанавливаются под окраинными морями в западной части Тихого океана, в Карибском бассейне, в Средиземном море и под рифтовыми зонами в Африке и Евразии.

#### Континентальные плиты:

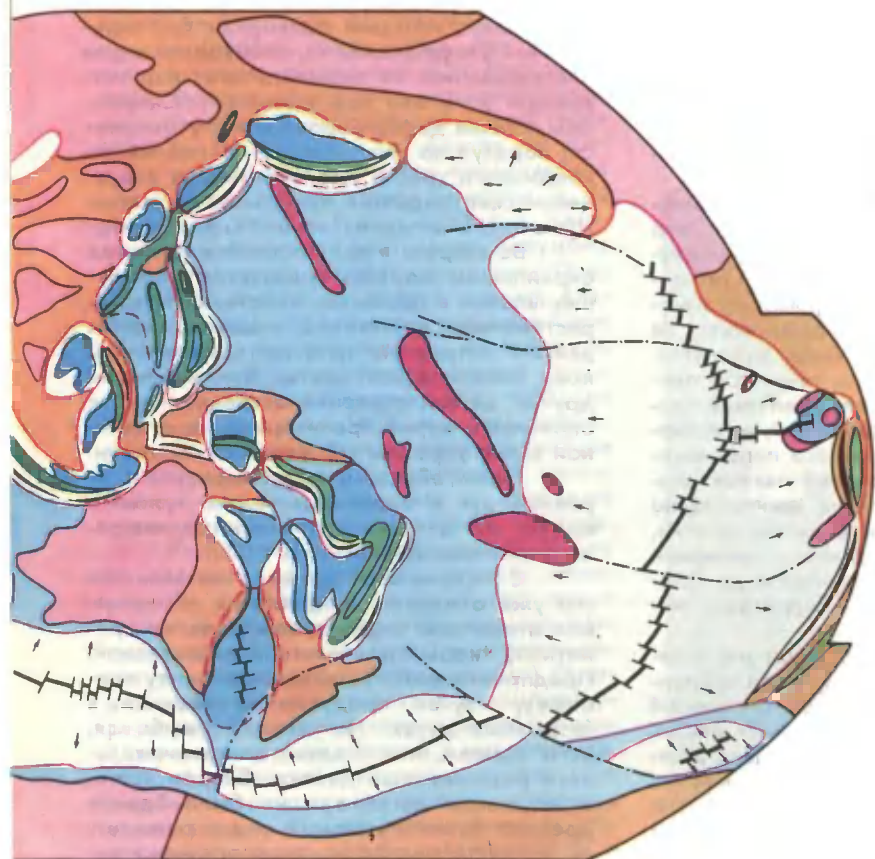
- возрастом более 2,5 млрд лет
- менее 2 млрд лет

#### Океанические плиты:





- периферия океана (возрастом менее 0,06 млрд лет)
- окраинные моря

#### Зоны активного вулканизма:

- жолоба
- островные дуги
- горячие точки и их следы



Конвекционные ячейки в верхней мантии:

-  под океанами (возрастом менее 0.06 млрд лет)
-  под континентами
-  отмершие
-  Зоны расширения океанического дна

лярной является модель погружения базальтовой коры и ее превращения в эклогиты в зонах субдукции. Предполагается, что в этих зонах происходит погружение океанической литосферной плиты под островную дугу (Курильскую, Марианскую и др.) или под край континента (например, Южной Америки). С островными дугами связан особый тип вулканизма: здесь извергаются и накапливаются андезиты. Принято считать, что эти породы выплавляются из эклогитов, погружившихся в мантию и частично там расплавившихся. Погружение базальтовой океанической коры и ее плавление происходит вдоль поверхности, наклоненной под островную дугу под углом  $30-60^\circ$ . Эта поверхность, или, точнее, зона толщиной  $40-80$  км, хорошо фиксируется по расположению центров (фокусов) землетрясений и поэтому носит название сейсмофокальной зоны. Застывание осадков, покрывающих океани-



ческую плиту или заполняющих глубоководный желоб, видно непосредственно на сейсмических профилях. При этом характер относительного перемещения плит подтверждается анализом механизмов землетрясений, зарождающихся в сейсмофокальной зоне.

Сам процесс погружения океанической плиты под островную дугу или под край континента получил название субдукции. Движущей силой субдукции, по современным представлениям, является метаморфический процесс формирования на конце погружающейся плиты эклогитов, которые, как тяжелый груз, тянут всю плиту вниз. Наклон плиты определяется степенью ее сжатия, обусловленной, в частности, скоростью относительного перемещения плит. При слабом сжатии наклон плиты почти вертикален, как на южном краю Марианской дуги, а при сильном сжатии, происходящем при встречном движении плит, угол наклона уменьшается до 25—30°, как в Перуанском и Чилийском желобах.

Общее распределение зон растяжения и сжатия и возникновение зон субдукции лучше всего объясняется с позиций тектоники плит. Согласно этой концепции, новая океаническая кора непрерывно рождается на гребнях срединно-океанических хребтов, а затем отодвигается в стороны от осевой линии этих хребтов. Данный процесс, названный спредингом, протекает внутри сложной системы конвекционных ячеек, располагающихся как под океаническими, так и под континентальными рифтами. Вся сложная конвекционная система приводится в движение более глубокой и крупномасштабной конвекцией в нижней мантии, в свою очередь порождаемой течениями в жидком внешнем ядре Земли. Такая многослойная конвективная система намечена пока лишь в самых общих чертах, и даже верхние ее ячейки рисуются весьма приблизительно.

Но как бы мы ни реконструировали детали предполагаемой конвективной системы, из классической модели тектоники плит следует, что растекающаяся океаническая кора, созданная (или обновленная) в течение последних 150 млн лет, должна, приближаясь к континентам, погружаться под них в зонах субдукции. Вот с этими-то зонами и связано наибольшее число нерешенных проблем.

Во-первых, исследования последних лет показали, что океаническая литосфера, рожденная на гребнях срединно-океанических хребтов, не обладает текучими

свойствами, которые позволили бы передать импульсы движения, необходимые для «заталкивания» ее внешнего края под островную дугу или под континент. Скорее, она должна деформироваться и утолщаться, образуя на расстоянии 2—4 тыс. км от срединного хребта многочисленные невулканические поднятия, подобные поднятию Шатского в западной части Тихого океана.

Во-вторых, в тылу островных дуг под окраинными морями существуют, или существовали в прошлом, собственные зоны растяжения, достаточно мощные, чтобы двигать островную дугу на прилегающий край океанической плиты. Эти и многие другие детали строения островных дуг и окраинных морей противоречат приведенной выше упрощенной модели субдукции.

Таким образом, происхождение островных дуг и окраинных морей является одним из центральных вопросов современной геодинамики.

С островными дугами связана, как мы уже отмечали, и проблема образования вторичной андезитовой (а затем гранитной) коры на месте океанической. Предпринимаются попытки решить эту проблему, изучая продукты вулканизма в островных дугах. Но мы не ошибемся, если скажем, что и здесь до окончательного решения еще далеко. Скорее всего, в островных дугах, где не было блоков древней континентальной коры, рождается «полуфабрикат» — кора промежуточного типа. И ее масса, возникшая за последние 2 млрд лет, составляет не более 20 % общей массы континентов. Если же андезитовый вулканизм в островных дугах действительно является ведущим процессом образования континентальной коры, тогда за это время должно было образоваться 50 % массы континентов.

Пролить свет на все эти сложные геологические проблемы могут, как нам представляется, методы метаморфической петрологии.

### МЕТАМОРФИЗМ В ЗОНАХ СУБДУКЦИИ

С островными дугами связана и такая, на первый взгляд, сугубо метаморфическая проблема, как происхождение поясов глаукофановых, или голубых, сланцев. Эти метаморфические породы, сформировавшиеся при низких температурах и высоких давлениях, распространены довольно широко. Пояса глаукофановых сланцев характерны для островных дуг, расположенных в западной части Тихого океана. Обнаружены они на Корьякском на-

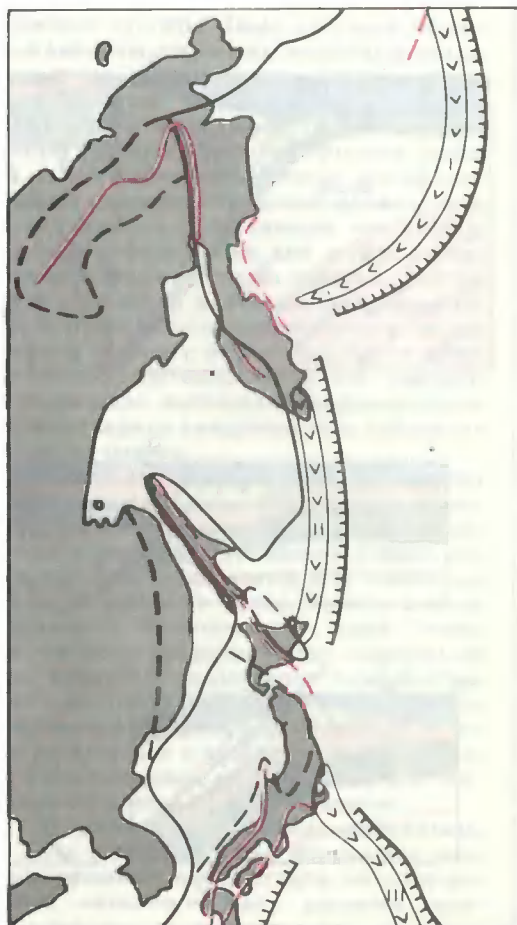
горье, на Камчатке, на Сахалине и в Японии, на Тайване, Филиппинах, Яве и других островных системах в Юго-Восточной Азии. Все эти пояса сформировались преимущественно в мезозойское время (60—180 млн лет назад), т. е. близки по возрасту к значительной части океанической коры. Аналогичные пояса имеются и на восточном берегу Тихого океана: в Калифорнии и Орегоне, Британской Колумбии и на восточном краю Алеутской дуги. Присутствуют они и во многих местах Альпийской складчатой области, возникшей при сближении Африканской и Европейской плит и закрытии древнего океана Тетис. Сходные, но более древние (300—600 млн лет, а иногда и до 1800 млн лет), сильно разрушенные пояса глаукофановых сланцев обнаружены внутри Евразийского континента, где они совпадают с древними границами окраинных морей и океанов.

Голубой цвет глаукофановых сланцев объясняется присутствием синего минерала — глаукофана, который при повышении давления образуется из самых распространенных минералов — низкотемпературных сланцев (альбита и хлорита). О повышенных давлениях и низких температурах при образовании глаукофановых сланцев говорит также наличие в них жадеита.

До недавнего времени считали, что жадеит и некоторые другие минералы, типичные для глаукофановых сланцев, образуются при температурах 300—500 °С и давлениях — 7—11 кбар. Тем не менее ряд исследователей, в том числе и автор статьи, допускали, что давление может достигать 17 кбар, хотя такие высокие давления казались необъяснимыми.

С появлением концепции тектоники плит проблема, казалось бы, нашла свое естественное решение, поскольку образование глаукофановых сланцев логично вписывалось в общую модель субдукции. Ведь при скорости погружения 5—10 см в год плита не успевает прогреться, и значительная ее часть даже на глубине 40—80 км должна иметь температуру 300—600 °С. Более того, наличие глаукофановых сланцев и эклогитов, часто ассоциирующих с ними, стали считать прямым доказательством существования в прошлом зон субдукции в соответствующих геологических структурах.

Но, как это часто случается, при более детальном изучении проблемы выяснилось, что дело обстоит не так-то просто. К примеру, кинетические эксперименты и расчеты показали, что при понижении дав-



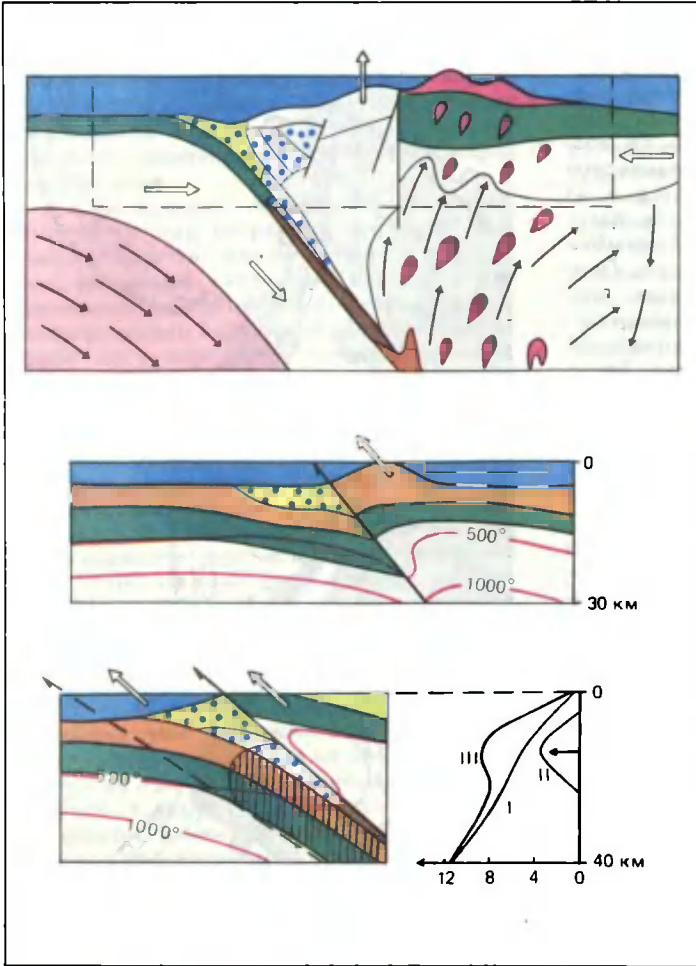
Островные дуги и глаукофансланцевые пояса северо-западной части Тихого океана. Пояса глаукофановых сланцев характерны для островных дуг, расположенных в западной части Тихого океана. Они располагаются вдоль современной и палеозойской границы континентальной коры, иногда параллельны современным островным дугам. Римскими цифрами обозначены островные дуги: I — Алеутская, II — Курильская, III — Бонин.

Границы континентальной коры:

-  современная
-  палеозойская
-  Островные дуги
-  Желоба

Глаукофансланцевые пояса:

-  палеозойские
-  мезозойские



Вверху — схема строения островной дуги и погружающейся литосферной плиты, вдоль границы которой формируются метаморфические породы — глаукофановые сланцы и эклогиты, которые поднимаются на поверхность благодаря общему поднятию территории (модель А. Мияширо, 1982). Внизу — часть структуры, показанной на верхнем рисунке пунктиром до (в середине) и после сжатия (внизу). При быстром продвижении океанической пластины на островную дугу резко повышается температура в нижней пластине. В какой-то момент давление воды, выделившейся из осадков, становится выше литостатического. Именно поэтому и возможно образование эклогитов и глаукофановых сланцев на относительно небольшой глубине. На нижнем рисунке приведена зависимость давления (в килобарах) от глубины без учета распределения давления флюидов (I) и с учетом этого распределения (III); II — распределение давления флюидов.

- Глаукофанозированные осадки
- Глаукофановые сланцы
- Глаукофанозированные породы
- Вулканиты
- Габбро
- Андезитовые вулканы
- Выплавки андезитовой магмы
- Эклогиты

- Зона плавления эклогитов
- Эклогитизированные породы
- Изотермы
- Направление движения плит
- Обдукционный шов
- Нижняя граница пластины, скользящей вместе с плитой
- Астеносфера
- Океан

ления или температуры (а это происходит при любых изменениях скорости и направления движения плиты) минералы глаукофановых сланцев оказываются неустойчивыми и быстро преобразуются в другие метаморфические минералы. Чтобы сохранились типичные минеральные ассоциации глаукофановых сланцев (например, ассоциации с арагонитом), эти породы должны быть «вытолкнуты» к поверхности со скоростью, равной скорости их погружения или даже превышающей ее. Следовательно, проблема поясов глаукофановых сланцев заключается не столько в условиях их образования на глубине в зонах со специфическим температурным режимом, сколько в их выведении на поверхность.

Аналогичная проблема существует и для толщ, содержащих эклогиты. Поскольку многие пластины глаукофановых сланцев и тела эклогитов приурочены к подошве надвигов, сложенных древней океанической корой, высказывалось предположение, что они вышли к поверхности при быстром надвигании океанических пластин на островную дугу или край континента. Такой противоположный субдукции процесс известен под названием обдукции. Протекает он в условиях продолжающегося сжатия, когда погружающаяся плита, имеющая заметные утолщения типа крупных подводных гор, древней островной дуги, микроконтинента, как бы заклинивается, а затем движется в другую сторону.

В результате обдукции резко повышается температура в нижней пластине, что при наличии в ней обводненных осадков способствует резкому повышению давления воды. В какой-то момент давление воды, выделившейся из этих осадков благодаря метаморфическим процессам, становится выше литостатического давления, создаваемого весом вышележащих пород. Именно поэтому и возможно образование эклогитов и глаукофановых сланцев на относительно небольшой глубине (например, на глубине 20 км давление составляет не 5, а 10 кбар). Продолжающаяся обдукция обеспечивает возможность быстрого выведения пластин с глаукофановыми сланцами и эклогитами на поверхность.

С предложенной нами моделью согласуются многие факты, не объяснимые или плохо объяснимые с позиций модели субдукции. Например, многие глаукофановые сланцы, сформировавшиеся при высоких давлениях, слабо деформированы, а жадеит образует в них жилки или даже

заполняет пустоты. Такая ситуация объяснима высоким давлением водного флюида, а никак не тектоническим сжатием твердого вещества.

В некоторых поясах глаукофановых сланцев присутствуют обломочные породы, в расположении которых расшифровывается следующая картина: древние пластины глаукофановых сланцев или эклогитов были выведены на дно моря, в виде обломков вошли в состав осадков, а затем эти осадки вновь оказались под надвигаемой плитой и были преобразованы в глаукофановые сланцы с обломками более древних пород. Интерпретируя эту картину, исследователи высказали предположение, что происходило смещение зоны субдукции в сторону океана.

Согласно нашей модели, в сторону океана смещался новый обдукционный шов. Такое последовательное смещение зон обдукции к океану (и отмирание старых зон в их тылу) устанавливается и в окраинных морях в западной части Тихого океана, например в Филиппинском море. Типичные же зоны субдукции (так называемые зоны субдукции андийского типа) мигрируют в противоположную сторону — в сторону океана. Глаукофановые сланцы и эклогиты, если они и возникают здесь, не могут быть выведены на поверхность и бесследно исчезают в верхней мантии.

В заключение необходимо отметить, что хотя в данной статье приводятся примеры использования методов метаморфической петрологии для решения проблем теоретического плана, эти методы и подходы имеют и практическое значение. Освоение минеральных богатств и их поиски невозможны без решения многих названных выше проблем. Но это уже тема для другой статьи.

## Дополнительные страницы к биографии Г. В. Рихмана (К 275-летию со дня рождения)

Г. К. Цверева



Грант Константинович Цверева, инженер-электрик, специалист в области истории естествознания и техники. Автор научных биографий: Никола Тесла. Л., 1974; Георг Вильгельм Рихман. Л., 1977; Дмитрий Алексеевич Голицын. Л., 1985 и др. Неоднократно печатался в «Природе».

Имя русского академика, уроженца Пярну, Г. В. Рихмана (1711—1753) знакомо каждому со школьных лет как имя выдающегося физика, погибшего во славу науки при проведении эксперимента<sup>1</sup>. Менее известно, что в первые годы академической деятельности он занимался картографией России и опубликовал на латинском языке статью «Об усовершенствовании географических карт, особенно универсальных, посредством удобных масштабов, служащих для определения расстояний», которая, к сожалению, не увидела свет на русском языке<sup>2</sup>. До последнего времени исследователи не представляли себе обстоятельства написания и публикации этой работы — первой в серии научных трудов Рихмана. Дело в том, что в каноническом четырехтомнике «Протоколы заседаний Конференции Императорской Академии наук с 1725 по 1803 года», изданном в 1897—1911 гг., отсутствуют тексты протокольных записей с 1 января

по 8 июля 1742 г., т. е. за тот период, когда Рихман, назначенный незадолго до того экстраординарным профессором, представил свое сочинение на суждение Конференции. Считалось, что эти записи утеряны.

Благодаря разысканиям Н. И. Невской этот пробел в летописи нашей Академии наук устранен. Ей посчастливилось в неразобранных бумагах академика Х. Н. Винсгейма (1694—1751) обнаружить рукопись на немецком языке недостающих протоколов заседаний Конференции за указанные месяцы 1742 г.

Названная статья Рихмана, как и его научно-популярные очерки в академических «Примечаниях на ведомости» за 1739—1740 гг. свидетельствует, что прежде чем стать физиком, он отдал дань земледелию в самом широком смысле этого забытого ныне русского слова. Вот что можно прочесть в его служебном отчете за 1735—1742 гг.: «С сентября 1741 г. я начал гиетометрические наблюдения, которые и продолжаю. В 1742 г. представил рассуждение о новой проекции для карты и доложил его в Конференции»<sup>3</sup>.

Гиетометрические, т. е. дождеизмерительные, наблюдения Рихман выполнял

<sup>1</sup> См. Цверева Г. К. Новое о Г. В. Рихмане // Природа. 1975. № 9. С. 10—17; Он же. Георг Вильгельм Рихман. Л., 1977.

<sup>2</sup> Richmann G. W. De perliciendis mappis geograficis inprimis universalibus, per idoneas scalas metiendis distantiiis inservientes // Commentarii Acad. scient. imp. Petropolitanae, 1751 (1741—1743). Т. XIII. P. 300—311.

<sup>3</sup> Рихман Г. Труды по физике. М., 1956. С. 536.



**ГЕОРГ ВИЛЬГЕЛЬМ РИХМАН (1711—1753).**

Гравюра Е. А. Федосеева. Выполнена в 1766 г. с портрета работы неизвестного художника.

в основанной Ж. Н. Делилем (1688—1768) обсерватории в здании Кунсткамеры, где вместе с другими молодыми российскими учеными он приобщался к навыкам естествоиспытателя-экспериментатора. До окончательного перехода в Физический кабинет Академии наук — первую в России физическую лабораторию, которую Рихман возглавил в 1744 г., он непродолжительное время работал в Географическом департаменте. Это, не имевшее тогда аналогов на Западе, учреждение, руководимое вначале И. К. Кириловым (1689—1737), предназначалось для составления генеральной карты (атласа) Российской империи, очень нужной преобразованной Петром I стране. Фактически действующий с 1726 г. Географический департамент получил в

1735 г. статус как бы академического института, директором которого был назначен Делиль, а его заместителем Л. Эйлер (1707—1783). Эти ученые возглавили корпус русских геодезистов и вместе с ними продолжили большие работы по картографированию обширных областей Русского государства.

Специфика нанесения на карту российских просторов, протянувшихся вдоль параллелей на тысячи верст, требовала особого подхода к решению геодезических задач, что прекрасно понимал Делиль. Будучи не только выдающимся астрономом, но и крупным географом, в своей научной деятельности он исходил из непреложной для него истины о сплюснутости Земли у полюсов (что еще было предметом горя-





Комната М. В. Ломоносова в «Боновом доме» на Васильевском острове с моделью «громовой машины» Рихмана. Макет. Музей М. В. Ломоносова [Ленинград].

чих споров) и разработал в 1728 г. равнопромежуточную коническую проекцию, которая упростила геодезическую работу. С поправками, внесенными Эйлером, она наилучшим образом подходила для картографирования вытянутой с запада на восток территории страны. В результате плодотворной деятельности всего коллектива Географического департамента «Россия, еще к началу XVIII в. не имевшая ни одной карты с градусной сеткой, к середине столетия уже располагала картами, основанными на столь большом числе астропунктов, какого не имела в то время ни одна страна мира, даже Франция, начавшая проведение широких градусных измерений первой в Европе!»<sup>4</sup>.

В эти достижения русских географов и геодезистов внес свой вклад и Рихман. На заседании Конференции Академии наук 1 марта 1742 г. «ему была вручена карта Иркутской провинции вместе с принадлежащими к ней городами с границами Китая и т. д., а именно под № 3»<sup>5</sup>. Через два месяца с небольшим, 10 мая, он представил своим коллегам диссертацию об усовершенствовании карт<sup>6</sup>, которая легла в основу его будущей статьи в «Комментариях», о которой говорилось выше. Диссертация изучалась до 21 июня. Вот протокольная запись под этой датой: «Присутствовали г.г. проф. Крафт, Вейтбрехт, Винсгейм, Гейнзиус, Леруа, Рихман, адъютант Мула»<sup>7</sup>. Г. проф. Рихман читал свою диссертацию «Об усовершенствовании генеральных

<sup>4</sup> Невская Н. И. Петербургская астрономическая школа XVIII в. Л., 1984. С. 110.

<sup>5</sup> Ленинградское отделение Архива Академии наук СССР (ЛО ААН). Ф. 3. Оп. 3. № 3. Л. 156; Р. 1. Оп. 96. № 91. Л. 102.

<sup>6</sup> Там же. Р. 1. Оп. 96. № 91. Л. 103.

<sup>7</sup> Делль не присутствовал на заседаниях Конференции, так как в эти дни его вообще не было в Петербурге.

карт», причем тогда же г.г. проф. Крафт и Гейнзиус сочли необходимым представить расхождения. Вышеупомянутую диссертацию г. проф. Рихман взял с собой домой, чтобы и то и другое в ней изменить»<sup>8</sup>. После внесения уточнений диссертация была принята к публикации в очередном томе «Комментариев». В своем труде Рихман предложил метод, позволяющий контролировать правильность составления генеральной карты по имеющимся в наличии картам отдельных регионов. При помощи разработанных им геометрических построений можно было уточнять расстояния между географическими пунктами, сохраняя при этом пропорции. Русские картографы еще длительное время пользовались идеей Рихмана. Позже, когда Рихман прославился как первоклассный физик и первый электрик России, к нему прислушались и как к авторитету по математической географии.

Труды Рихмана по физике, отмеченные печатью новизны и прозорливости, изучались и комментировались зарубежными учеными. Так, английские естествоиспытатели живо интересовались теплофизическими и калориметрическими исследованиями, а также электромеханическими опытами петербургского физика<sup>9</sup>. Большой интерес к научной деятельности Рихмана проявлял и французский ученый Ж. Нолле (1700—1770), известный своими экспериментами с электричеством. Делиль, который в 1747 г. после более чем двадцатилетнего пребывания в России вернулся во Францию, писал 15 октября 1750 г. непременно секретарю Петербургской Академии наук Г. Ф. Миллеру (1705—1783): «Аббат Нолле спрашивал меня недавно о том, что делает г. Рихман. Я не смог ему сказать ничего более того, что видел в Петербурге до своего отъезда. Если г. Рихман продолжает заниматься физическими опытами, то при талантах, которые он к тому имеет, лишь от него самого зависит, чтобы стать одним из самых выдающихся в Европе физиков»<sup>10</sup>. Как видим, Делиль высоко ценил бывшего своего сотрудника.

Вести о новаторских исследованиях Рихмана и его товарищей по Академии наук доходили караванными путями с большим запозданием и до Пекина. Здесь колония французских иезуитов, исполнявшая не слишком благовидную миссию по вовле-

чению в лоно церкви Христовой местных жителей, с гораздо большим успехом занималась изучением китайской истории, языка, нравов и обычаев, а также китайской науки (в составе колонии имелся небольшой научный центр с труднопереводимым названием «Le tribunal mathématique»)». В первой половине XVIII в. в числе других ученых иезуитов в Китае работал воспитанник коллежа в Тулузе А. Гобиль (1689—1759). В 1723 г. с дипломом «математика Восточных Индий и Китая» он приехал в Пекин, где спустя много лет и умер. О нем осталась память как о крупнейшем синологе, много сделавшем для ознакомления европейцев с историей и состоянием естественных наук, особенно астрономии в Средней империи. В Пекине Гобиль основал обсерваторию, где вместе с коллегами проводил астрономические наблюдения. Важнейшие его научные труды относятся к хронологии. Гобиль был членом ряда научных академий и обществ, в том числе с 1739 г. — почетным иностранным членом Петербургской Академии наук, и с 1731 г. переписывался с российскими академиками.

В письмах Гобиль Делилю часто встречаются сведения о русских делах. Характерно письмо миссионера в Петербургскую Академию наук от 19 июня 1743 г.: «Мы поздравляем Российскую империю с восшествием на престол августейшей княгини Елизаветы и наследника августейшего князя Петра герцога Голштинского. Мы надеемся, что через посредство русских учеников, направляемых сюда, Вы нам дадите знать о некоторых новостях. Мы очень желали бы увидеть географические карты и новые книги, которые Ваша Академия не преминет издать. Во Франции и не думают посылать нам такого рода вещи»<sup>12</sup>. Несколько лет спустя, 18 ноября 1750 г., пекинский корреспондент Делиля сообщит ему относительно России: «... вот уже в течение ряда лет нет ни караванов, ни курьеров, ни писем из этой страны»<sup>13</sup>. Впрочем, такие перерывы были тогда обычны. Письма из Парижа в Пекин через порт Макао в те времена шли тоже долго — около года.

20 ноября 1754 г. Гобиль известил

<sup>8</sup> ЛО ААН. Ф. 3. Оп. 10. № 3. Л. 165 об.

<sup>9</sup> Цверева Г. К. Русский физик Г. В. Рихман и английские ученые // Вопросы истории науки и техники Прибалтики. Тарту: Изд-во ТГУ, 1977. С. 88—91.

<sup>10</sup> ЛО ААН. Ф. 1. Оп. 3. № 39. Л. 110 об.

<sup>11</sup> При всей дурной славе иезуитов, нельзя не отметить того парадоксального факта, что в католических странах многие видные естествоиспытатели XVII—XVIII вв. были членами ордена, либо воспитанниками иезуитских учебных заведений.

<sup>12</sup> Gaubil A. Correspondance de Pékin. 1722—1759. Publiée par R. Simon. Genève, 1970. P. 557.

<sup>13</sup> Ibid. P. 657.



«Новые Комментарии Императорской Петербургской Академии наук». Т. I. 1750 г.

секретаря Парижской Академии наук Ж. Ж. Дорту де Мерана (1678—1771) о том, что «получил от г. Делиля много мемуаров об открытиях русских»<sup>14</sup>. Дело в том, что в начале 1753 г. президент Петербургской Академии наук К. Г. Разумовский предписал академикам сообщать об их исследованиях в области естествознания пекинским миссионерам. Первыми на этот призыв откликнулись Рихман и его коллега профессор механики и медицины Х. Г. Кратценштейн (1723—1795). Прибывший в 1755 г. в Пекин с долгожданым караваном курьер вручил Гобиллю их письма, а также привезенную из России литературу — два тома «Флоры Сибири», «Атлас Российский», «Commentarii», т. VII—XIV, «Novi Commentarii», т. I—II, другие материалы<sup>15</sup>. В этих томах академического журнала были помещены указанная выше географическая статья Рихмана, важнейшие его сочинения по теплофизике и классический труд «Новые опыты с электричеством, порождаемым в телах»<sup>16</sup>, а также работы Кратценштейна.

Упомянутые выше письма датированы апрелем 1753 г., копии их хранятся в ЛО ААН. В своем содержательном послании Рихман писал: «Преосвященнейшим и ученейшим мужам отцам из Общества Иисуса. Сиятельнейший президент нашей Академии славнейший граф Разумовский, имея заботу и попечение о процветании наук и словесности, обязал членов нашей корпорации сообщать Вам в письмах, если есть что-нибудь, что может быть полезно или приятно Вам, преосвященнейшие мужи, равным образом любящим и развивающим науки, или если мы желали обратиться за чем-нибудь к Вашей учености и Вашему опыту. Итак, я хотел бы сообщить Вам кратко следующее не из пустого желания распространить слух о малых делах в столь далекие от нас земли, а чтобы выполнить указ нашего славного президента. Если это Вам не вовсе безынтересно, я напишу о части моих академических занятий.

В наш век естествоиспытатели с особым рвением начали изучать и наблюдать электрические явления. Та польза, которую в наше время приносит человеческому роду электричество<sup>17</sup>, счастливо исцеляющее в Европе,— как это сообщают,— слепых, глухих, немых, паралитиков<sup>18</sup>, устраниют сомнения в том, что в будущем естествоиспытатели еще с большим усердием углубятся в исследование этого загадочного явления. Именно поэтому и я решил погрузиться в подобного рода изыскания.

В прошлом году я занимался наблюдением славнейшего явления, произведенного молнией. О других моих трудах могу Вам дать представление наши «Комментарии», которые Вам посылаются. Вы, преподобнейшие мужи, конечно, хорошо знаете, что первый автор, описавший явление электричества, произведенного молнией,— это англичанин по имени Франклин, который в Америке, в Филадельфии, усердно занимался электрическими опытами и счастливо открыл многие электрические законы<sup>19</sup>. Истинность их была подтверждена

<sup>17</sup> Имеется в виду осуществленная впервые Кратценштейном в 1744—1745 гг. и усовершенствованная другими учеными методика электротерапии с помощью электростатических машин. Это было, действительно, первым полезным для человека практическим приложением электричества.

<sup>18</sup> Явное преувеличение насчет «слепых, глухих». Сказывается эйфория, охватывающая ученый мир в связи с начальными успехами электролечения.

<sup>19</sup> В те годы Б. Франклин (1706—1790) был британским подданным. Здесь Рихман воздает должное разработанной Франклином унитарной теории электричества.

<sup>14</sup> Ibid. P. 798.

<sup>15</sup> Ibid. P. 803—804; ЛО ААН. P. II. Он. 1. № 187. Л. 41.

<sup>16</sup> Рихман Г. В. Труды ... С. 245—261.

в прошлом году в Париже<sup>20</sup>, затем в разных местах в Германии, а также здесь в Петербурге. Вы в Пекине, конечно, уже наблюдаете это явление или в скором времени будете наблюдать.

Я, насколько смогу, опишу Вам кратко, приложив для лучшего понимания беглые рисунки, как можно удобно наблюдать электричество, произведенное молнией. Одновременно я начерчу указатель электричества, с помощью которого можно знать, имеется ли природного электричества в одном месте больше, чем в другом. Этот указатель уже несколько лет тому назад описан в XIV томе «Комментариев». Он служил только для определения большей или меньшей действенности искусственного электричества, позднее же я его улучшил и кратко изложу, в чем состоит это исправление.

Итак, чтобы наблюдать электричество, произведенное молнией...». Далее идет иллюстрированное рисунками описание установки, которое совпадает с текстом опубликованной лишь в 1956 г. статьи Рихмана «Известие о наблюдениях, имеющих быть произведенными над грозовым электричеством, адресованное к тем, кто задались целью исследовать природное электричество, с добавлением некоторых электрических явлений, достойных внимания»<sup>21</sup>. Работа Рихмана, и это прекрасно понимал он сам, посылая ее в Пекин, имела принципиальное значение, так как в ней было впервые предложено устройство для количественного изучения атмосферного электричества с помощью изобретенного им первого в мире электроизмерительного прибора.

Письмо завершается следующим абзацем: «Таковы важнейшие электрические явления, которые я решил описать в этом своем письме. Метеорологические наблюдения Вы, преподобнейшие отцы, прочитаете в наших «Комментариях». Было бы приятно увидеть пекинские метеорологические наблюдения, а также наклонение и склонение магнитной стрелки, если таковые имеются за несколько лет, а также узнать, определена ли длина простого маятника в Пекине и какова она. Впрочем, вручаю себя Вашему благоволению и Вашей милости. Будьте здоровы. Рихман»<sup>22</sup>.

<sup>20</sup> Речь идет о проведенных Т. Далибаром (1703—1799) в мае 1752 г. в Париже шумевших опытах, которые подтвердили одинаковую природу электрической искры и молнии.

<sup>21</sup> Рихман Г. В. Труды... С. 317—321.

<sup>22</sup> ЛО ААН. Р. II. Оп. 1. № 187. А. Л. 109—112. Публикуется впервые. Перевод с латинского Ю. Х. Копелевич.



Петербургский академик Христиан Готтлиб Кратценштейн. Гравюра на меди П. Хааса. Выполнена в 1781 г. с портрета работы П. Ипсена.

И статья Рихмана «Новые опыты с электричеством, порождаемым в телах», и процитированное выше письмо произвели большое впечатление на Гобиля и его коллегу физика Ж. Ж. Амио (1718—1793), приехавшего в Пекин в 1750 г.

Из письма Гобиля Делилю от 25 октября 1750 г. явствует, что португальские миссионеры-иезуиты, также обретавшие в Китае новообращенных, получили в дар «от португальского врача в Петербурге» пассажный инструмент для астрометрических измерений и электростатическую машину. Врачом тем был, несомненно, почетный член Петербургской Академии наук, с 1731 г. работавший в столице А. Н. Р. Саншес (1699—1783). Подаренная им своим землякам электростатическая машина, вероятно, была первой не только в Китае, но и на всем азиатском материке. Вполне возможно, что ее изготовили в академических мастерских в Петербурге. Надо думать, португальцы предоставили французам, в частности Амио, возможность продемонстрировать некоторые опыты и продублировать эксперименты Рихмана, о ко-

торых миссионерам стало известно из его статьи и письма. Интерес вызвали, конечно, и работы Кратценштейна по земному магнетизму.

Гобиль не мог не ответить петербургским академикам. Вот его письмо от 30 апреля 1755 г. (к этому времени Рихмана уже не было в живых, а Кратценштейн работал в Копенгагенском университете):

«Славнейшим и ученейшим мужам Х. Г. Кратценштейну, Г. В. Рихману, членам и профессорам Петербургской Академии шлет большой привет Антуан Гобиль из Общества Иисуса.

Наша французская коллегия почитает себе за честь высказать признательность августейшей императрице, президенту славнейшей Академии и Вам, знаменитейшие мужи, сообщившим нам в своих письмах столь удивительные и остроумные вещи. Вы сообщаете поразительное поистине чудесное об электричестве, не менее достоин удивления способ, каким Вы это выражаете. Изучив все это, мы с общего согласия причислили Вас к первейшим ученым в области физики и физико-математики и таковыми Вас признали с надлежащим уважением. Хотя я мало сведущ в этой науке, мне весьма нравится то, что Вы говорите и убедительно доказываете об электрической материи и также то, что Вы отсюда выводите и что остроумно и пронизательно заключаете относительно земных недр. Ваша система магнитного наклонения и склонения и метод находить их в любом месте Земли заслуживает похвалы и одобрения философов<sup>23</sup>.

Китайцы, кажется, испокон веков пользовались магнетизмом для определения стран света. Во всяком случае, это было им известно более чем 2670 лет назад. Более 1500 лет они знают склонение, но о знании ими наклонения есть следы, однако смутные, и нет никаких данных о наблюдениях наклонения. Относительно склонения имеются весьма древние наблюдения, но обозначены они в книгах не очень ясно.

В обстоятельствах настоящего времени нам не пристало ставить электрические опыты перед образованными и знатными китайцами. Это было бы не без ущерба и опасности для нас. Сначала нужно, чтобы китайцы хорошо познали суть этого дела и причины, чего добиться нелегко. О. Жозеф Амио, член нашей французской коллегии, излагает свои размышления и кое-что придумал о способе проведения

опытов. Некоторые он уже провел, обо всем этом он сообщает Вам. Я убедил его дать знать об этом Вам как знатокам и учителям в этой области. Ему и о. Мишелю Бенуа я весьма советовал работать по Вашему методу и Вашим помышлениям. О. Мишель Бенуа посылает некоторые астрономические наблюдения, сделанные в этой французской коллегии над Лирой и Капеллой. Они, как я думаю, нуждаются в проверке. Он посылает также латинский перевод древней классической книги Шу-Кинг<sup>24</sup> с необходимыми примечаниями и таблицами. Я же посылаю наблюдение одного лунного затмения и кое-что о наблюдении Меркурия на Солнце 6 мая 1753 г. В том прохождении я наблюдал многое, но не вижу там ничего достаточно точного, кроме того, что посылаю<sup>25</sup>. Третьего тома Ваших Новых Комментариев мы еще не видели. Будьте здоровы. Гобиль»<sup>26</sup>.

Как уже говорилось, к адресатам письмо Гобиль не попало. Вместо них ответил преемник Кратценштейна по Академии наук И. Э. Цейгер (1720—1784). Он сообщил о гибели Рихмана и послал в Пекин рапорт Кратценштейна об этом происшествии — первый в истории акт о смертельном поражении человека электричеством<sup>27</sup>. Научная переписка между русскими учеными и пекинскими миссионерами продолжалась и в последующие десятилетия.

<sup>24</sup> Этот труд китайских астрономов посвящен предвычислениям солнечных и лунных затмений.

<sup>25</sup> Сообщение Гобиль опубликовано в 1760 г. в т. V «Новых Комментариев».

<sup>26</sup> Gaubil A. Correspondance... P. 811; LO AAN, P. II. On. 1. № 187. Л. 37 (на русском языке публикуется впервые, перевод с латинского Ю. Х. Копелевич).

<sup>27</sup> Рихман Г. В. Труды... С. 548—560.

<sup>23</sup> Гобиль пишет о работах Кратценштейна.

## Электродинамика черных дыр

И. Д. Новиков



Игорь Дмитриевич Новиков, доктор физико-математических наук, заведующий сектором Института космических исследований АН СССР. Специалист в области релятивистской астрофизики. Им получены важные результаты в теории гравитационного коллапса, черных дыр и космологии. Автор ряда книг, среди них: *Эволюция Вселенной*. М., 1979; *Строение и эволюция Вселенной* (совместно с Я. Б. Зельдовичем). М., 1975; *Черные дыры и Вселенная*. М., 1985. Неоднократно печатался в «Природе».

Черные дыры со всеми их чудесами стали уже привычными гостями на страницах не только научной, но и научно-популярной литературы. Мы расскажем об электродинамике черных дыр. В последнее время в этом разделе науки о черных дырах достигнуты новые успехи, которые еще не нашли достаточного отражения в популярной литературе.

Электродинамика черных дыр тесным образом связана с вопросом о возможности получения энергии с помощью этих объектов<sup>1</sup>. Черная дыра как энергетическая машина давно изучается физиками и астрономами. В настоящее время есть веские основания считать, что мощные источники рентгеновского излучения в двойных звездных системах связаны с черными дырами, возникшими там после «смерти» массивных звезд. Более того, сверхмощные источники энергии в ядрах галактик и квазарах, излучающие  $10^{45}$  эрг/с и более, также связаны с процессами вокруг сверхмассивных черных дыр. Они представляют собой самые мощные источники излучения в современной Вселенной; недаром астро-

физики иногда называют черные дыры центральным «мотором» квазаров и взрывающихся галактических ядер.

Хотя искусственно изготовить черную дыру в лаборатории пока невозможно, не исключено, что в будущем «природные» черные дыры, которые имеются во Вселенной, а также искусственные, создание которых когда-нибудь станет возможным, сыграют важную роль в развитии энергетики человечества.

### ПОЛЕ ТЯГОТЕНИЯ ВОКРУГ ЧЕРНОЙ ДЫРЫ

Черная дыра возникает, когда какая-либо масса сжимается настолько, что ее усиливающееся гравитационное поле не выпускает во внешнее пространство каких-либо частиц и даже света. Поскольку быстрее света ничто в пространстве двигаться не может, из черной дыры не выходит никакая информация.

Чтобы тело массы  $M$  превратилось в черную дыру, необходимо сжать его до размеров так называемого гравитационного радиуса:  $r_g = 2GM/c^2$ , где  $G$  — постоянная тяготения Ньютона,  $c$  — скорость света в вакууме. Величина  $r_g$  очень мала даже для масс космических объектов; так, для Солнца она равна 3 км. После образования черной дыры вещество внутри нее

<sup>1</sup> Подробнее об этом см.: Новиков И. Д. Энергетика черных дыр. М.: Знание, сер. «Космонавтика, астрономия». 1986. № 3. С. 1—67.



под действием тяготения продолжает сжиматься до почти бесконечной плотности.

В ходе образования черной дыры гравитационное поле может значительно изменяться, будут излучаться гравитационные волны. Однако очень быстро, за время  $t \approx r_g/c$ , эти процессы замирают, гравитационные волны «уносятся» частично на бесконечность, частично в возникшую черную дыру. Вокруг нее остается стационарное гравитационное поле, которое полностью характеризуется тремя параметрами: массой тела  $M$ , из которого возникла черная дыра, его угловым моментом  $J$  и полным электрическим зарядом  $Q$  (если тело было заряженным).

Тот факт, что поле тяготения черной дыры полностью определяется всего тремя числами, чрезвычайно важен. Этим черные дыры коренным образом отличаются от обычных тел. Например, гравитационное поле Земли зависит не только от ее полной массы, но и от распределения вещества в земном шаре. Форма Земли очень сложна и несимметрична, что отражается на ее поле тяготения, которое тоже чрезвычайно сложное<sup>2</sup>. Однако несимметричных черных дыр быть не может! Всякие отклонения от симметрии при образовании черной дыры «уносятся» гравитационными волнами.

Мы будем рассматривать незаряженные черные дыры, поскольку в естественных условиях их заряд всегда нейтрализуется зарядами противоположного знака, притягивающимися из окружающего пространства. Для описания таких черных дыр достаточно двух параметров —  $M$  и  $J$ . Конечно, гравитационное поле черной дыры вблизи ее границы очень сильное. Для его описания не подходит закон тяготения Ньютона, а необходимо обратиться к теории тяготения Эйнштейна. Кроме того, в дальнейшем мы не будем интересоваться тем, что происходит внутри черной дыры, для нас важны лишь процессы во внешнем пространстве.

Хорошо известно, что черная дыра не имеет материальной поверхности. Наблюдатель, падающий в черную дыру, при пересечении ее границы не встретит ничего, кроме пустого пространства. Эта граница, называемая горизонтом событий, определяется только условием, согласно которому из внутренней области черной дыры из-за сильного тяготения не выходят наружу даже световые сигналы. Тем не ме-

нее, с точки зрения внешнего наблюдателя, все время остающегося снаружи черной дыры, она во многих отношениях похожа на компактное тело, ограниченное поверхностью «мембраной» с определенными механическими и электродинамическими свойствами. Принято считать, что мембрана расположена как раз снаружи горизонта событий. Конечно, это чисто условное представление. Однако оно очень наглядно и помогает работать нашей интуиции; ведь приходится описывать условия, когда силы тяготения огромны и многие понятия и процессы весьма необычны. Такой подход называют «мембранным представлением» черной дыры. В последнее время он получил широкое распространение, особенно среди астрофизиков. Его строгим математическим обоснованием занимаются американский физик К. Торн и его коллеги из Калифорнийского технологического института.

Мы будем следовать «мембранному представлению», все время помня об его ограниченности, о том, что черная дыра вовсе не тело с мембраной. Забвение этого факта может привести к серьезным ошибкам.

Итак, мы рассматриваем черную дыру как некоторое компактное «тело», создающее во внешнем пространстве поле тяготения. У границы черной дыры силы тяготения становятся бесконечно большими.

Если черная дыра возникла при сжатии вращающегося тела, ее гравитационное поле будет обладать еще одной особенностью, не имеющей аналогии в привычных нам ньютоновских слабых полях тяготения. В этом случае все тела, падающие к черной дыре, будут отклоняться в ту же сторону, в которую вращалось и тело, породившее черную дыру. Вокруг такой вращающейся черной дыры существует как бы своеобразный «гравитационный вихрь», увлекающий тела и быстро нарастающий по интенсивности к границе черной дыры. Под его воздействием любые падающие тела, пересекая границу черной дыры, получают одну и ту же угловую скорость движения вокруг нее (это так называемая угловая скорость вращения черной дыры).

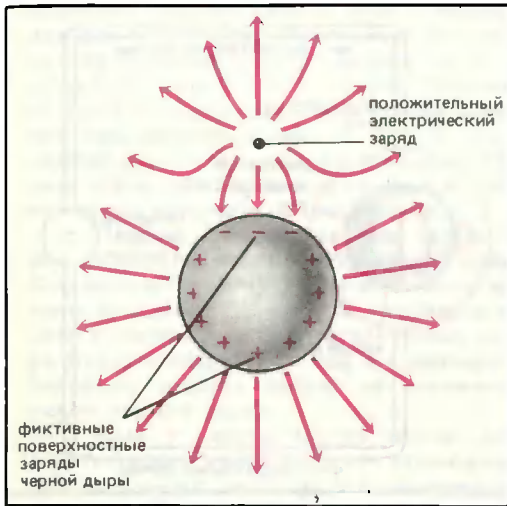
Итак, мы напомнили читателям основные свойства черных дыр. Теперь мы можем обратиться непосредственно к теме статьи. Электродинамические свойства черных дыр весьма необычны. Для выяснения этих свойств нам придется вначале рассматривать идеализированные модели и конструкции. Хотя они выглядят очень аб-

<sup>2</sup> Подробнее об этом см.: Грушинский Н. П. Гравиметрия — наука о силе тяжести // Природа. 1985. № 10. С. 62—73.

страктно, но в принципе могут быть реально построены. Как мы убедимся в дальнейшем, аналоги этих конструкций, правда в гораздо более сложных вариантах, уже осуществлены самой природой.

### ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТИ ЧЕРНОЙ ДЫРЫ

Чтобы понять, как черная дыра может работать в качестве электрической машины — электромотора, динамомашины и т. д. — рассмотрим электрическое поле



Силовые линии электрического поля (стрелки), создаваемого положительным зарядом вблизи черной дыры.

заряда, расположенного вблизи невращающейся незаряженной черной дыры. Согласно теории Эйнштейна, трехмерное пространство в окрестности черной дыры искривлено, т. е. обладает неевклидовой геометрией. Поэтому силовые линии электрического поля заряда выглядят весьма необычно, как показано на первом рисунке. (Разумеется, это схема, так как невозможно на плоском листе бумаги изобразить конфигурацию линий в искривленном пространстве.) Часть силовых линий поля, искривляясь, уходит от черной дыры. Другие силовые линии упираются в черную дыру. Если бы дело этим ограничивалось, это означало бы, что черная дыра заряжена. И действительно, закон Гаусса гласит: число силовых линий, пересекающих

замкнутую поверхность, определяет полный заряд внутри нее. Но наша черная дыра в целом не заряжена; значит, если есть входящие в черную дыру силовые линии, то должны быть и линии, выходящие из нее.

В самом деле, мы видим, что из черной дыры со стороны, противоположной заряду, выходят силовые линии электрического поля и уходят во внешнее пространство. Такая сложная конфигурация поля связана с сильной искривленностью пространства. Силовые линии на рисунке выглядят так, как будто поверхность черной дыры представляет собой проводящую сферу, и приближение к ней заряда извне вызывает поляризацию свободных зарядов в сфере. Причем заряды, имеющие противоположный знак по сравнению с внешним, притягиваются им и собираются с одной стороны сферы. Заряды того же знака, что и внешний, отталкиваются и собираются с противоположной стороны. Такая аналогия позволяет условно считать, что на поверхности черной дыры имеются заряды (фиктивные), на которых заканчиваются силовые линии внешнего электрического поля.

Рассмотрим подробнее процесс приближения электрического заряда к черной дыре. В ходе такого приближения будет меняться распределение фиктивного поверхностного заряда; заряды противоположного знака стягиваются к точке, расположенной прямо под приближающимся внешним зарядом. Следовательно, можно считать, что на поверхности черной дыры течет ток (правда, тоже фиктивный). При этом границе черной дыры можно приписать поверхностное сопротивление, равное  $4\pi/c$ ; в обычных единицах оно равно 377 Ом.

Итак, уже рассмотрение простейших электродинамических задач показывает, что поверхность черной дыры ведет себя как мембрана, наделенная определенными электрическими свойствами.

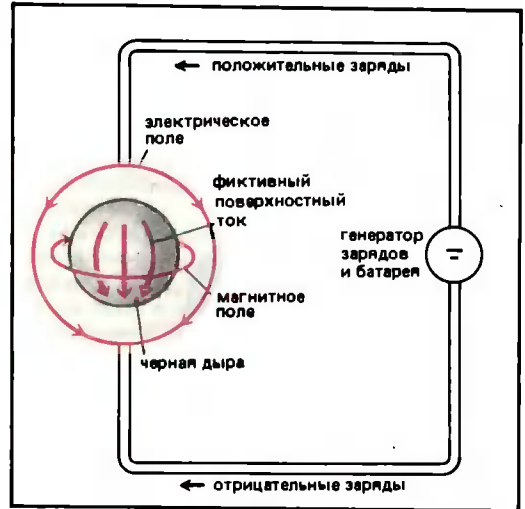
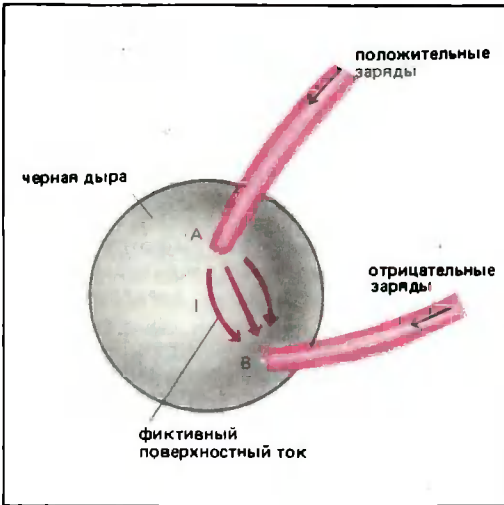
Рассмотрение более сложных задач подтверждает эту точку зрения. Например, пусть на разные части поверхности черной дыры падают два потока зарядов противоположного знака, так что полный заряд черной дыры не меняется. Тогда можно считать, что от места падения положительных зарядов  $A$  к месту падения отрицательных зарядов  $B$  течет поверхностный электрический ток.

Напомним еще раз, что в действительности никаких поверхностных зарядов и токов (как и самой материальной поверхности) у черной дыры нет. Если какой-то

наблюдатель падает в черную дыру, он не встречает при пересечении ее горизонта никакой материальной поверхности, никаких зарядов, никаких токов. Введение этих фиктивных величин — просто наглядный метод, с помощью которого можно описать поведение силовых линий электрического поля (и, как мы увидим, также магнитного) вблизи границы черной дыры; все это — с точки зрения наблюдателя, расположенного вдали от черной дыры. Такое представление очень удобно, наглядно и позволяет работать нашей интуиции, при-

## ЧЕРНАЯ ДЫРА КАК ЭЛЕМЕНТ СОПРОТИВЛЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ

Пусть имеется генератор положительных и отрицательных зарядов (например, электронов и позитронов). С помощью специальной батареи, создающей напряжение  $V$ , заряды одного знака устремляются по проводнику к северному полюсу черной дыры, а заряды другого знака по другому проводнику направляются к противоположному полюсу черной дыры. (Зачем понадо-



Фиктивный поверхностный ток на границе черной дыры.

Черная дыра как сопротивление в электрической цепи.

выкшей к анализу лабораторных экспериментов с проводящими сферами. Это позволяет, не обращаясь к сложным представлениям и расчетам, касающимся искривленного 4-мерного пространства-времени (с которым имеет дело общая теория относительности), сравнительно просто представить себе поведение черной дыры в тех или иных условиях.

В дальнейшем мы будем использовать такое представление, не оговаривая каждый раз фиктивности понятий поверхностных зарядов и токов для черной дыры.

Обратимся теперь к рассмотрению того, как черная дыра может играть роль разных элементов электрической цепи и электрических машин. Разумеется, мы не будем останавливаться на технических деталях конструкции, а представим только общие схемы.

Был столь сложный источник электрического тока, а не обычная батарея с проводами, станет ясно из дальнейшего.) Будем считать, что внутреннее сопротивление батареи и проводников очень мало. Тогда, согласно изложенному в предыдущем разделе, по поверхности черной дыры потечет ток, сила которого зависит от напряжения батареи и сопротивления черной дыры.

Сопротивление, создаваемое дырой, будет такое же, как у сферы с поверхностным сопротивлением  $377 \text{ Ом}$ , точно так же подключенной к проводникам. Если проводники, подходящие к полюсам, очень тонкие («точечные»), сопротивление сферы вблизи соединения окажется большим и ток будет слабым. Но уже в том случае, если толщина проводника такова, что его границы упираются в сферу на расстоянии

нескольких градусов от полюса, полное сопротивление сферы  $R$  составит 300—400 Ом.

Полный ток, текущий по поверхности черной дыры, будет, в полном соответствии с законом Ома, равен  $I = V/R$ . Этот ток течет по поверхности черной дыры вследствие того, что имеется напряженность электрического поля  $E$ . Вне поверхности на расстоянии  $r$  также имеется соответствующее электрическое поле, направленное вдоль меридианов и примерно равное  $2I/r$ . Оно может быть измерено наблюдателем. Если бы мы заменили черную дыру проводящей сферой, включенной в обычную электрическую цепь, то получили бы аналогичное значение электрического поля. Текущий по сфере ток  $I$  должен создавать вокруг магнитное поле  $B$ , имеющее широтное направление и равное  $2I/r$ . В случае черной дыры мы имеем то же самое. Причем магнитное поле также может быть измерено внешним наблюдателем.

Наконец, ток, текущий по сфере, будет выделять энергию, нагревая сферу. Омические потери энергии в единицу времени составят  $P_{\text{омич}} = I^2 R$ . В электрической цепи с черной дырой энергетические потери будут определяться той же формулой. Теряемая энергия пойдет на увеличение массы черной дыры.

Итак, в данном случае черная дыра действительно ведет себя как проводящая сфера. Однако аналогия эта, конечно же, неполная. В случае проводящей сферы мы могли подключить ее к обычной электрической батарее с помощью обычных проводов, и по ней потек бы ток. Но если бы мы попытались сделать то же с черной дырой, никакого электрического тока не возникло бы. Дело в том, что в обычных проводах носителями тока являются электроны, которые могут передвигаться по проволоке. Из провода они поступают в проводящую сферу на одном полюсе и выходят из нее в другой провод на противоположном полюсе.

Если же мы обратимся теперь к черной дыре, то электроны могут в нее войти, но, конечно же, не смогут из нее выйти. Поэтому, чтобы тек стационарный ток, необходимо, чтобы на противоположном полюсе в дыру падали заряды противоположного знака (скажем, позитроны). Хотя и электроны, и позитроны, падая в черную дыру, навсегда в ней исчезают, в результате получается электрический ток, текущий во внешней цепи.

Вот почему в начале параграфа в качестве источника тока мы взяли не просто

батарею, как это делается в обычной электрической цепи, а батарею и генератор заряженных частиц. Генератор все время поставляет частицы противоположных знаков, которые по проводникам стекают в черную дыру и навсегда там исчезают. В дальнейшем, когда мы будем говорить, что черная дыра включена в электрическую цепь, всегда будем иметь в виду подобную конструкцию.

### ЧЕРНАЯ ДЫРА КАК РОТОР ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МОТОРА

Представим себе конструкцию, которая может раскручивать черную дыру за счет циркулирующего электрического тока. В этом смысле черная дыра будет выступать в качестве ротора электрического мотора. Конструкция состоит из следующих элементов. К черной дыре проводниками подключена батарея (с генератором частиц), дающая напряжение  $V$ . Электрический ток подводится к черной дыре проводником на полюсе и через проводящий диск у экватора. В этой цепи течет электрический ток, входящий через «северный» полюс в черную дыру и текущий по ее «северной» полусфере к экватору, где через диск цепь замыкается на батарею.

Погрузим теперь черную дыру в магнитное поле напряженностью  $B_0$ , однородное вдали от нее<sup>3</sup>. Участки поверхности черной дыры с током, текущим от северного полюса к экватору, испытывают в магнитном поле  $B_0$  действие силы Лоренца, направленной поперек тока и поперек магнитного поля. Сила Лоренца и будет закручивать черную дыру. Черная дыра начнет вращаться!

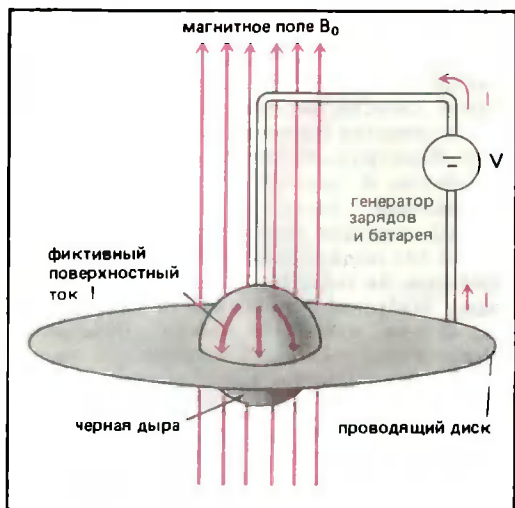
Таким образом, черная дыра действительно может выступать как ротор электромотора. Можно представить разные способы «забирать» вращательную энергию черной дыры и трансформировать ее в другие виды энергии. В таком «чернодырном» электромоторе поверхностный ток не только закручивает черную дыру, сообщая ей вращательную энергию, но и приводит к омическим потерям, как это описано в предыдущем разделе. Опять уместна полная аналогия с обычным электромотором, обмотки которого нагреваются проходящим током.

Как быстро возрастает вращательная

<sup>3</sup> Силовые линии магнитного поля вблизи черной дыры, конечно, искривлены, так как само пространство «искривлено» сильным полем тяготения. Но это сейчас нас не интересует.

энергия черной дыры (обозначим ее буквой  $P_{\text{вращ}}$ )? Здесь справедливы соотношения, полностью аналогичные для обычного электромотора. Окончательная формула для нашего случая такова:  $P_{\text{вращ}} = \Omega |B_0 r_g^2| / 2$ , где  $\Omega$  — угловая скорость вращения черной дыры в данный момент времени,  $r_g$  — гравитационный радиус,  $I$  — ток,  $B$  — напряженность магнитного поля.

Таким образом, в описанной электрической машине полные затраты энергии складываются из омических потерь  $P_{\text{омич}} = I^2 R / 2$  (причем сопротивление вдвое



Черная дыра как ротор электромотора.

меньше, чем в предыдущем примере, так как ток течет только через верхнюю половину поверхности черной дыры) и из затрат на изменение вращательной энергии  $P_{\text{вращ}}$  черной дыры.

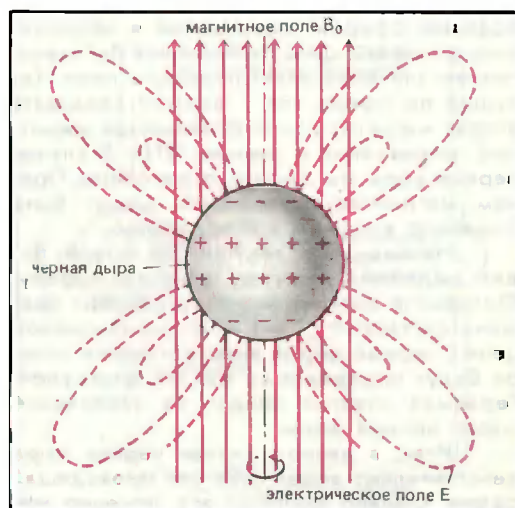
### ВРАЩАЮЩАЯСЯ ЧЕРНАЯ ДЫРА В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Теперь рассмотрим другую ситуацию. Пусть имеется невращающаяся черная дыра, погруженная в магнитное поле. Начнем ее раскручивать. Для этого достаточно бросать в черную дыру тела с определенным прицельным параметром так, чтобы подлетая к ней с одной стороны и падая в нее, эти тела передавали черной дыре свой угловой момент.

Как будет происходить взаимодействие вращающейся черной дыры с магнитным полем? Вспомним взаимодействие проводящей вращающейся сферы с маг-

нитным полем. Движение проводника поперек линий магнитного поля вызывает появление в проводнике электрического поля. Под действием этого поля заряды в проводнике разделяются, причем так, чтобы связанное с ними электрическое поле нейтрализовало индукционное поле в проводнике.

Теперь вспомним, что поверхность черной дыры аналогична проводящей сфере. У вращающейся черной дыры произойдет разделение поверхностных зарядов (подобно их разделению при поднесении



Вращающаяся черная дыра во внешнем магнитном поле.

к черной дыре электрического заряда). У полюсов соберутся заряды одного знака, у экватора — другого. (Полный заряд черной дыры остается, конечно, равным нулю.) Разделившиеся заряды создают вокруг сферы электрическое поле, имеющее квадрупольный характер. Если внешнее магнитное поле параллельно оси вращения черной дыры, то после разделения поверхностных зарядов никакие токи не текут по поверхности черной дыры, не происходит диссипации энергии и угловой момент черной дыры не меняется.

Ситуация изменится, если магнитное поле пересекает вращающуюся черную дыру под некоторым углом к ее оси вращения. В этом случае разделившиеся поверхностные электрические заряды перемещаются по вращающейся поверхности дыры, т. е. возникает поверхностный ток. Его взаимодействие с внешним магнитным полем приведет к тому, что компонента угло-

вого момента черной дыры, перпендикулярная полю, уменьшится, а компонента, параллельная магнитному полю, останется неизменной. В конце концов ось вращения черной дыры станет параллельной магнитному полю, т. е. мы вернемся к уже рассмотренной выше ситуации.

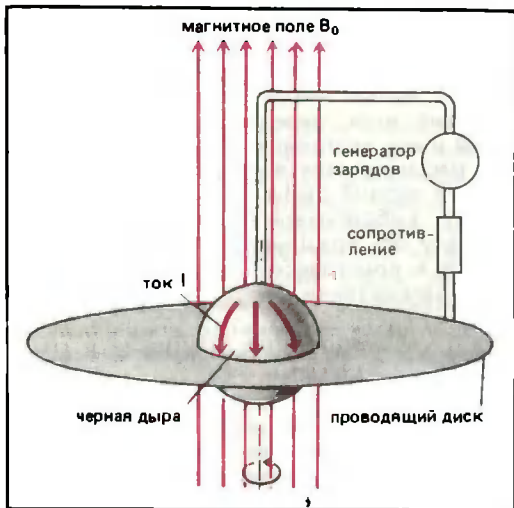
Подчеркнем, однако, что изменения во вращении черной дыры происходят крайне медленно. Так, в условиях реальной Вселенной при массе черной дыры 10 масс Солнца и обычных для космического пространства напряжениях маг-

униполярному индуктору, в котором проводящая сфера вращается в магнитном поле.

Итак, черная дыра стала источником тока. Каковы свойства этого источника?

Мы уже говорили о поверхностном сопротивлении черной дыры. При подключении ее в цепь только что описанным способом полное сопротивление черной дыры будет достигать 100 Ом.

Известно, что наиболее эффективно источник тока работает, если его внутреннее сопротивление равно сопротивлению внешней цепи. Как будет показано в следующем разделе, наша схематическая электрическая машина может реально существовать в природе, например в виде сверхмассивных черных дыр в центрах галактик. Эти черные дыры массой в 100 млн масс Солнца быстро вращаются, пронизываемые полем в 10 тыс. Гс; такая «машина» дает напряжение около  $10^{20}$  В. При этом в цепи течет электрический ток, равный напряжению источника, деленному на сумму сопротивлений источника и внешней цепи. В нашем примере сила тока равна  $10^{18}$  А. В результате мощность выделяемой энергии составляет около  $10^{45}$  эрг/с. (Для сравнения: мощность световой энергии нашего Солнца, т. е. его светимость, равна  $4 \cdot 10^{33}$  эрг/с.)



Вращающаяся черная дыра во внешнем магнитном поле как источник тока.

нитного поля  $10^{-5}$  Гс ось черной дыры выровняется и совпадет с направлением магнитного поля не раньше чем через  $10^{35}$  лет! Напомним, что время, прошедшее с начала расширения Вселенной, составляет «всего»  $10^{10}$  лет.

### ЧЕРНАЯ ДЫРА КАК ИСТОЧНИК ТОКА

Вернемся к быстро вращающейся черной дыре, ось вращения которой параллельна направлению магнитного поля. Мы видели, что на ее поверхности происходит разделение зарядов, но какой-либо электрический ток при этом отсутствует. Если теперь такую черную дыру включить в электрическую цепь (как в разделе об электромоторе), заменив электрическую батарею обычным сопротивлением, но оставив генератор зарядов, то по электрической цепи должен потечь ток. Действительно, наша установка во всем аналогична

### СВЕРХМАССИВНЫЕ ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ В ЦЕНТРАХ ГАЛАКТИК

Электрические цепи с участием черных дыр, описанные в предыдущих разделах, могут показаться читателю в лучшем случае абстрактными теоретическими игрушками, годными разве что для демонстрации некоторых необычных принципов электродинамики черных дыр. В известной степени читатель окажется прав — мы сознательно максимально упростили схемы механизмов и рассуждали так, как будто можем свободно экспериментировать с черными дырами чуть ли не в лаборатории.

И тем не менее все сказанное действительно может быть осуществлено и, вероятно, будет осуществляться (но, конечно, в гораздо более сложном виде).

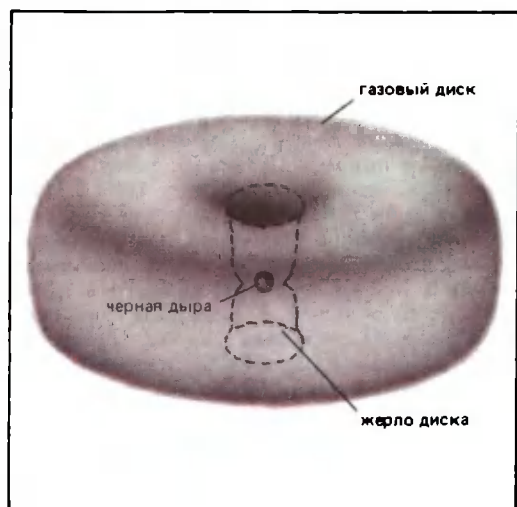
Самое же важное заключается в том, что некоторые из описанных механизмов, вероятно, уже существуют во Вселенной! Природа сама позаботилась о создании гигантских электрических машин с участием черных дыр.

Прежде всего познакомимся с тем, как могут возникать сверхмассивные чер-



ные дыры массой в миллион солнечных масс и более и какие имеются наблюдательные свидетельства их существования.

Мы уже говорили о черных дырах «звездного происхождения». Они возникли в результате «смерти» (коллапса) обычных массивных звезд. В центрах гигантских звездных систем — галактик — имеются мощные облака газа; их сжатие, как показывают расчеты, и должно приводить к образованию сверхмассивной черной дыры. К тому же результату ведет сжатие компактных звездных скоплений, которые



Толстый газовый диск вокруг черной дыры.

имеются в центрах галактик. Подобные процессы могут происходить и в квазарах — активных ядрах очень больших и далеких галактик. Там даже могут образовываться черные дыры с массой в миллиард солнечных масс. Вообще, падение газа в поле тяготения сверхмассивных черных дыр в центрах галактик и квазаров играет важнейшую роль в различных наблюдаемых астрофизических явлениях.

В квазарах и ядрах галактик — источниках мощного радиоизлучения — часто наблюдаются длинные тонкие прямолинейные выбросы, дающие радиоизлучение. Они получили название джетов. Иногда выбросы тянутся от центрального источника на десятки миллионов световых лет, не меняя своего направления в пространстве. Это означает, что они выбрасываются центральным источником строго в одном направлении в течение по крайней мере десятка миллионов лет.

По современным представлениям, процессы в окрестности черных дыр могут объяснить совокупность всех перечисленных выше наблюдательных данных. Например, быстро вращающаяся сверхмассивная черная дыра, обладая огромной массой и малыми размерами, является прекрасным гироскопом, не меняющим направления оси вращения. Газ, стекающий к черной дыре, вдали от нее может двигаться в разных направлениях. Но вблизи вращающейся черной дыры совместное действие ее «гравитационного вихря» и трения струй газа друг о друга приводят к тому, что вокруг черной дыры образуется газовый диск, плоскость которого совпадает с экваториальной плоскостью вращающейся черной дыры. Вблизи черной дыры газовый диск, вероятно, достаточно толстый и его внутренний край образует жерло, расширяющееся наружу вдоль оси вращения черной дыры. Вот из таких жерл и могут выбрасываться джеты: ведь поскольку ось вращения черной дыры неизменна в пространстве, неизменным будет и их направление.

### ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ В ЦЕНТРАХ ГАЛАКТИК

Вращающиеся черные дыры в центрах галактик при наличии газовых дисков действуют как гигантские электрические машины. Обычно газ в диске пронизан магнитным полем («замагничен»). Потоки газа увлекают за собой магнитное поле и усиливают его, в результате вблизи внутренних краев диска напряженность магнитного поля может достигать десятков тысяч гаусс. С последних устойчивых круговых орбит газ падает в черную дыру, «увлекая» за собой магнитное поле. Если бы не было замагниченного диска, то магнитное поле газа, падающего в дыру, превратилось бы в электромагнитные волны и «улетело» в окружающее пространство. Но давление магнитного поля газового диска удерживает магнитные силовые линии, пронизывающие черную дыру, от разлета. Конечная поверхностная проводимость черной дыры приводит к тому, что магнитные силовые линии могут скользить по горизонту, и в результате первоначально хаотическое магнитное поле газа, упавшего в черную дыру, становится упорядоченным, таким, чтобы текущие к горизонту поверхностные токи имели наименьшие омические потери.

В жерло диска вокруг черной дыры имеется также разреженная плазма.

Разберем теперь, как действует эта электрическая машина. Черная дыра вращается в магнитном поле. Мы уже знаем, что она может служить источником тока, для этого нужна только внешняя электрическая цепь и постоянный генератор электрических зарядов, которые могут двигаться в электрической цепи. Все это имеется в данном случае. Действительно, вблизи черной дыры магнитное поле столь сильное, что заряженные частицы могут двигаться вдоль магнитных силовых линий. Следовательно, эти линии действуют наподобие проводников, вдоль которых течет ток. Если есть составляющая электрического поля вдоль силовых линий магнитного поля, то частицы будут ускоряться, приобретая энергию.

Вдали от черной дыры магнитное поле уже достаточно слабо и электрический ток может течь поперек магнитных силовых линий. В этом районе плазма своей инерцией оказывает обратное влияние на магнитное поле и через него — на вращение черной дыры. Такой район является аналогом электрического сопротивления в обычной цепи. Заряженные частицы противоположных знаков стекают по магнитным силовым линиям к полюсам и экватору черной дыры. В области их ускорения все время происходит рождение новых заряженных частиц. Это может происходить следующим образом: ускоренные до больших энергий частицы, сталкиваясь с фотонами теплового излучения, идущего от газового диска, передают им свою энергию. Возникающие гамма-кванты высоких энергий сталкиваются, в свою очередь, с тепловыми фотонами. Происходит рождение электронно-позитронных пар. Так работает генератор зарядов. Советские астрофизики Н. С. Кардашев, А. Г. Полнарев, Б. Е. Штерн и автор статьи рассчитали конкретные процессы в ядрах галактик, схематически описанные выше, которые могут протекать при работе «чернодырной» электрической машины<sup>4</sup>.

Основываясь на наблюдательных данных, можно утверждать, что, по-видимому, описанная машина действительно работает в центрах галактик. В предыдущем разделе мы уже говорили, что мощность ее может достигать  $10^{45}$  эрг/с. Примерно такая мощность как раз и требуется, чтобы объяснить явления, наблюдаемые в ядрах активных галактик и квазарах.

Наука о черных дырах еще очень молода, она насчитывает всего несколько десятилетий. В популярной литературе обычно отмечается, что еще в конце XVIII в. англичанин Дж. Митчел и француз П. Лаплас предсказали возможность существования черных дыр. Если быть точным, следовало бы сказать, что эти ученые предсказали лишь одно свойство, присущее черным дырам, — не выпускать свет. В рамках теории тяготения Ньютона и нельзя было сделать большего, предсказать удивительные свойства черной дыры как своеобразного объекта, подлинной дыры в пространстве и времени<sup>5</sup>.

Только в 30-х годах нашего столетия после создания А. Эйнштейном современной теории тяготения американские теоретики Р. Оппенгеймер и Х. Снайдер дали точное теоретическое описание черной дыры. Прошло еще четверть века, пока физики разобрались в основных особенностях этого объекта, не имеющего аналогов в предыдущей истории физики. И вот на протяжении последних двадцати пяти лет специалисты с неослабевающим интересом открывают и изучают все новые и новые свойства черных дыр. От былой наивной картины объекта, на который все только падает и из которого ничто не выходит, не осталось и следа. Сегодня ясно, что свойства черных дыр многообразны, и нет сомнения, что в будущем развитии физики и, вероятно, техники черным дырам предстоит сыграть выдающуюся роль. Некоторые модели, представленные в статье, как мы надеемся, дали возможность читателю это почувствовать.

Важно также подчеркнуть, что астрофизики всесторонне исследуют небесные тела, в которых, по всей вероятности, находятся черные дыры. Большой вклад в эту работу внесли советские наблюдатели и теоретики: Г. С. Бисноватый-Коган, Я. Б. Зельдович, В. М. Лютый, Р. А. Сюняев, А. М. Черепашук, Н. И. Шакура, В. Ф. Шварцман и др. Конечно, астрофизические исследования — пока единственный реальный путь проверки правильности наших представлений о черных дырах; и здесь мы, несомненно, столкнемся со многим новым и интересным.

<sup>4</sup> Кардашев Н. С., Новиков И. Д., Полнарев А. Г., Штерн Б. Е. // Астрон. журн. 1983. Т. 60. С. 209—226.

<sup>5</sup> Подробнее об этом см.: Новиков И. Д., Либшер Д.-Э. Река времени // Природа. 1985. № 4. С. 15—20.

## Эволюция генов растений: вызов теории «молекулярных часов»

А. С. Антонов



Андрей Сергеевич Антонов, доктор биологических наук, заведующий отделом эволюционной биохимии Межфакультетской проблемной лаборатории им. А. Н. Белозерского Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова. Основные научные интересы — эволюция биополимеров. В «Природе» опубликовал статью: Исследование биополимеров в систематике высших растений (1981, № 3).

Не секрет, что совсем недавно молекулярная филогенетика, изучающая закономерности филогенеза на молекулярном уровне, и геносистематика, занимающаяся сравнительным анализом ДНК, играли роль скромных служанок, питающихся с барского стола молекулярной биологии. Для своих потребностей они использовали в основном результаты, полученные при изучении белков и нуклеиновых кислот в исследованиях, которые проводились для решения совсем иных задач. Специальные же исследования биополимеров для целей систематики и филогенетического анализа были немногочисленными: далеко не все лаборатории располагали необходимой дорогостоящей аппаратурой и квалифицированными биохимиками. Несмотря на скудность исходных данных, все же предпринимались первые попытки теоретического осмысления накопленной информации.

К числу наиболее широко известных обобщений молекулярной филогенетики принято относить гипотезу «молекулярных часов» и теорию так называемой «не-дарвиновской эволюции»<sup>1</sup>, хотя, конечно, ими

не исчерпывается список достижений молодой и бурно развивающейся науки. Суть гипотезы «молекулярных часов», доминировавшей в молекулярной филогенетике в течение почти двадцати лет, состоит в том, что изменения в содержащих биологическую информацию макромолекулах (нуклеиновых кислотах и белках, иначе говоря — семантидах) в ходе эволюции накапливались с постоянной скоростью<sup>2</sup>. Согласно теории «не-дарвиновской эволюции», или теории нейтрализма, с последней версией которой можно познакомиться по книге одного из ее ведущих авторов, М. Кимуры, большая часть изменений в макромолекулах, возникающих в ходе эволюции, не сказывается на их свойствах и потому не попадает под действие отбора<sup>3</sup>.

Основой для всех этих теоретических обобщений послужили главным образом результаты сравнительного изучения семантид высших животных и микроорганизмов. Исследования эволюции геномов (т. е. всего комплекса несущих генетическую информацию молекул ядерной

<sup>1</sup> Zuckerkindl E., Pauling L. Evolutionary divergence and conversion in proteins // *Evolving genes and proteins*. L.; N. Y. 1965. P. 97—166; Kimura M. // *Nature*. 1968. Vol. 127. P. 624—626; King J. L., Jukes T. H. // *Science*. 1969. Vol. 164. P. 788—800.

<sup>2</sup> Вилсон А. // *В мире науки*. 1985. № 12. С. 122—132; Волькенштейн М. В. Биологическая эволюция и эволюция макромолекул // *Природа*. 1985. № 6. С. 82—89.

<sup>3</sup> Кимура М. Молекулярная эволюция: теория нейтральности. М., 1985.

ДНК) и семантид (индивидуальных последовательностей ДНК, РНК и белков) растений до недавнего времени проводились гораздо менее интенсивно. Большая часть полученных в этой области данных осталась, к тому же, вне поля зрения теоретиков.

Между тем еще в конце 60-х годов были выполнены эксперименты с ДНК растений, результаты которых не укладывались в рамки бытовавших в ту пору и процветающих поныне представлений о механизмах и темпах эволюции ключевых макромолекул.

пени, чем в таксоне животных того же эволюционного возраста, млекопитающих. В одной из заключительных работ этого цикла нами была высказана гипотеза, согласно которой эти различия свидетельствуют об исключительно высоких темпах эволюции первичных структур ДНК у высших растений<sup>4</sup>. Действительно, за одно и то же время дивергенция геномов растений прошла значительно глубже, чем дивергенция геномов животных.

Это предположение получило подтверждение в первых экспериментах по

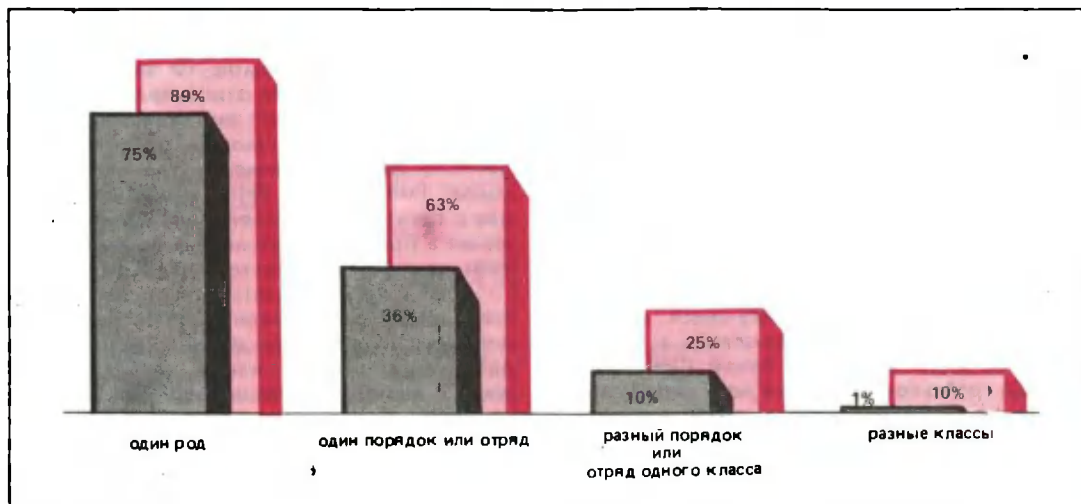


Рис. 1. Доля гомологичных последовательностей нуклеотидов в ДНК растений и животных. Цветные прямоугольники отображают (в процентах) гомологию ДНК лука (*Allium moly*) с ДНК видов: из этого же рода (*Allium ursinum*); из этого же порядка (*Gagea lutea*); из другого порядка этого же класса (*Juno vicaria*); из другого класса (*Pisum sativum*). Черные прямоугольники отображают (в процентах) гомологию ДНК сига (*Coregonus lavaretus*) с ДНК видов: из этого же рода (*Coregonus muksun*); из этого же отряда (*Oncorhynchus gorbuscha*); из другого отряда этого же класса (*Cyprinus carpio*); из разных классов (*Pterolamiops longimanus*).

### «СТРАННОСТИ» В ЭВОЛЮЦИИ ДНК И ГЕНОВ РАСТЕНИЙ

Инициатором этих исследований был один из основоположников геносистематики А. Н. Белозерский. В результате детального изучения состава ДНК в двух классах покрытосеменных — двудольных и однодольных — было в конечном счете установлено, что он варьирует в пределах этих таксонов растений в гораздо большей сте-

гибридизации ДНК растений из разнообразных таксонов покрытосеменных. Не совсем верные из-за несовершенства использованного тогда метода гибридизации ДНК первые оценки, сделанные американскими учеными, были нами уточнены и позволили со всей определенностью установить, что ДНК растений из разных семейств однодольных отличаются друг от друга в той же степени, что и ДНК животных из разных классов позвоночных (рис. 1). В дальнейших экспериментах, выполненных в нашей лаборатории с использованием более точных методов гибридизации ДНК, были получены результаты, указывающие на то, что быстро эволюционируют и повторяющиеся, и уникальные последовательности нуклеотидов в молекулах ДНК.

Отметим, что использовать эти результаты для критики теории «молекулярных часов» было не так-то просто. Дело

<sup>4</sup> Маринова Е. И., Владыченская Н. С., Антонов А. С. // Докл. АН СССР. 1969. Т. 185. № 4. С. 945—948.

в том, что результаты изучения всей совокупности клеточной ДНК растений (т. е. ДНК ядер, митохондрий и хлоропластов) или даже отдельных ее фракций невозможно прямо соотносить с результатами исследований семантид и использовать для критики теорий, созданных на основе этих исследований. Препятствием служит исключительная сложность генома растений: он включает особенно много разнообразных повторяющихся последовательностей нуклеотидов, функции которых неясны. Более того, доля повторяющихся последовательностей геномов сильно варьирует. Вследствие этого (и по ряду других причин) содержание ДНК в ядрах клеток растений может сильно отличаться даже у близких видов. В то же время, опыты показали, что число «работающих» генов у всех изученных в этом плане покрытосеменных практически одинаково, т. е. сложность их генотипов — одного уровня. Если учесть, что большая часть ДНК фракции повторяющихся последовательностей некоторыми исследователями считается «эгоистической» или даже «мусорной», то станет понятно, что результаты изучения состава ДНК и гибридизации относятся в значительной мере именно к такой ДНК, в которой, грубо говоря, почти нет генов. Можно ли выводы из таких опытов сопоставлять с результатами изучения эволюции генов и генопродуктов (РНК и белков)? Некоторые надежды на этот счет внушали данные о том, что изменения во всех фракциях ДНК происходят, в общем-то, схожим образом, хотя и не всегда с одинаковой скоростью.

Настойчиво указывая на «странности» в эволюции ДНК растений, мы понимали, что пробным камнем для проверки выдвинутой гипотезы могут быть лишь результаты прямого сопоставления первичных структур семантид растений. Это стало относительно легко сделать после того, как были разработаны простые методы определения нуклеотидных последовательностей нуклеиновых кислот. Учитывая предшествующий опыт работы с нуклеиновыми кислотами животных и прокариот и первые результаты, полученные в опытах с семантидами растений, мы остановились на малых рибосомных РНК хлоропластов и цитоплазмы (так называемые 4,5 и 5,85 рРНК). Аналогичные исследования проводились одновременно и в других лабораториях. В конечном счете, на основе всех имеющихся данных нам удалось количественно оценить сходство ряда нуклеотидных последовательностей малых рРНК растений и по-

строить филогенетические деревья для этих РНК.

Надо сказать, что построение таких деревьев — задача не из легких. В самом деле, представим, насколько усложнилась бы задача биологов по реконструкции филогенеза, если бы в их распоряжении не было данных палеонтологий. А ведь изучать ископаемые нуклеиновые кислоты мы не можем: в останках живших когда-то существ они не сохраняются.

Первая сложность заключается в правильной оценке различий в сопоставляемых последовательностях. Если они отличаются не очень сильно, т. е. если соответствующие макромолекулы были выделены из близкородственных организмов, то задача упрощается. Точно так же относительно просто сравнивать и медленно эволюционирующие молекулы: здесь мы можем работать с видами из филогенетически отдаленных таксонов. Рибосомные РНК принадлежат как раз к таким макромолекулам. Если же различия в последовательностях велики, разобраться в них оказывается гораздо сложнее.

Не следует думать, что после количественной оценки различий все трудности остаются позади: ведь мы не знаем, как эти различия возникли, какие механизмы лежали в основе эволюции изучаемых нами молекул. До недавнего времени большинство исследователей, руководствуясь гипотезой «молекулярных часов», шли наиболее простым и, как мы вскоре убедимся, неверным путем: они строили матрицы различий и на их основе — филогенетические деревья молекул (по сути, фенограммы). Большая часть таких деревьев становилась лакомым куском для критиков молекулярной филогенетики: уж очень много было в них несуразностей. Не случайно по страницам научно-популярных изданий кочует одно и то же филогенетическое дерево цитохромов С позвоночных животных: это, пожалуй, единственное дерево, не противоречащее опыту биологов-систематиков. В других случаях ситуация не столь хорошая: иногда виды, близость которых у биологов сомнений не вызывает, оказываются на совсем разных веточках таких деревьев. С этим столкнулись, например, исследователи цитохрома С у растений. О бедах молекулярной филогенетики растений мне уже доводилось рассказывать на страницах «Природы»<sup>5</sup>.

<sup>5</sup> Антонов А. С. Исследования биополимеров в систематике высших растений // Природа. 1981. № 3. С. 2—12.

В чем же причина этих несоответствий? Сегодня мы знаем, что частично она заключается в некритическом использовании концепции «молекулярных часов». Как будет видно из дальнейшего изложения, скорость эволюции макромолекул в разных линиях филогенетического развития не обязательно постоянна. Поэтому филогенетические деревья нужно строить с учетом этого обстоятельства, а не по простому сходству последовательностей.

довательностях в линии развития, ведущей к современным покрытосеменным, был чуть ли не в 10 раз (!) выше, чем в линиях, ведущих к мхам, печеночникам, папоротникам и голосеменным (рис. 2). За относительно короткое время (приблизительно 150 млн лет) рРНК покрытосеменных дивергировали гораздо сильнее, чем рРНК мохообразных, появившихся на Земле приблизительно 400 млн лет назад.

Оставалось сопоставить результаты

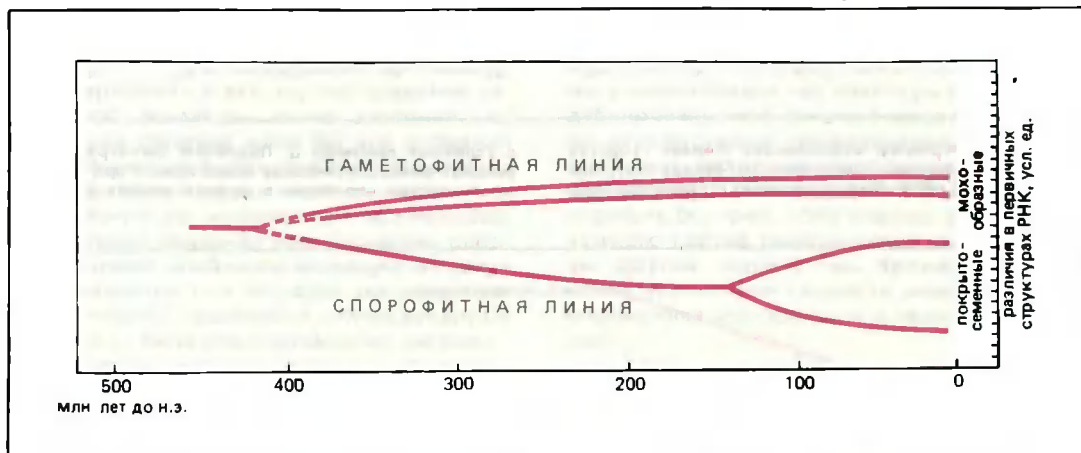


Рис. 2. Схема эволюции 4,5S рРНК у наземных растений. Видно, что у мохообразных за более продолжительное время эволюции в рРНК накопились меньшие различия, чем у покрытосеменных, которые появились на Земле значительно позже.

Как мне кажется, один из наиболее надежных методов построения филогенетических деревьев макромолекул, позволяющий учитывать при проведении расчетов различия в скоростях эволюции разных «ветвей», был разработан недавно сотрудниками Института цитологии и генетики СО АН СССР в Новосибирске<sup>6</sup>. Он-то и был применен в нашей работе с рРНК растений.

В подтверждение нашей гипотезы результаты сопоставления рРНК растений однозначно говорили о том, что темпы накопления изменений в нуклеотидных после-

молекулярно-биологических исследований с представлениями ботаников. Для иллюстрации филогенетических отношений между разными группами организмов молекулярные биологи используют различные методы. Достоинства и недостатки этих методов становятся особенно ясными, если сопоставить получаемые с их помощью схемы эволюции макромолекул с филогенетическими деревьями организмов. Так, дерево, построенное при помощи метода, основанного на использовании матрицы различий (рис. 3), не лезет, как говорится, ни в какие ботанические ворота, а альтернативное дерево, построенное с учетом возможной неравности в скорости эволюции рРНК (рис. 4), не может вызвать особых нареканий со стороны ботаников. Цифры у ветвей деревьев отражают число нуклеотидных замен, произошедших в ходе эволюции от гипотетической общей предковой рРНК. Не составляет труда убедиться, что они особенно быстро накапливались в филогенетической ветви, ведущей к современным однодольным и двудольным растениям.

<sup>6</sup> Жарких А. А. Алгоритм построения филогенетических деревьев по аминокислотным последовательностям // Математические модели эволюции и селекции. Новосибирск, 1977. С. 5—52.



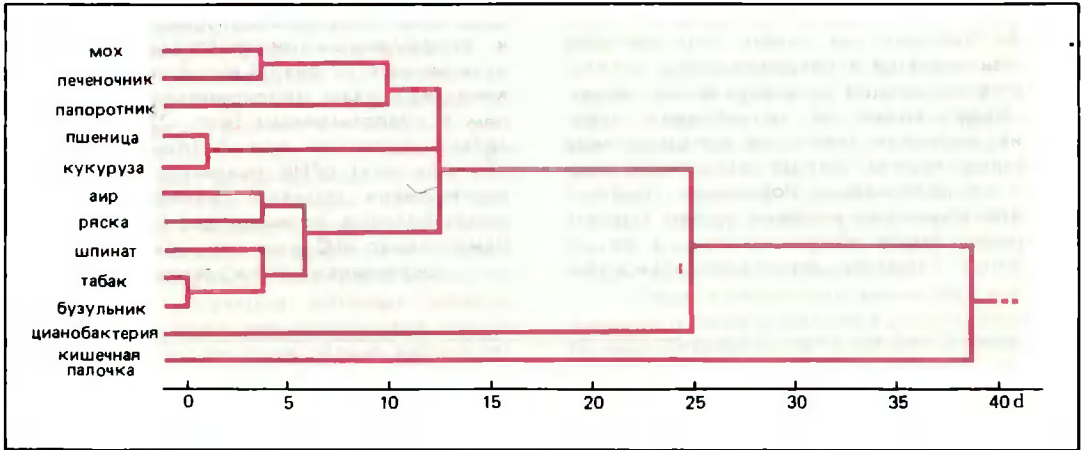


Рис. 3. Фенограмма, отражающая степень сходства 4,5S рРНК растений. Построена на основе матрицы сходства 4,5S рРНК. Шкала отражает степень сходства

в условных единицах d. Подобные фенограммы отражают филогенетические связи только при равенстве скоростей эволюции в разных линиях разветвля.

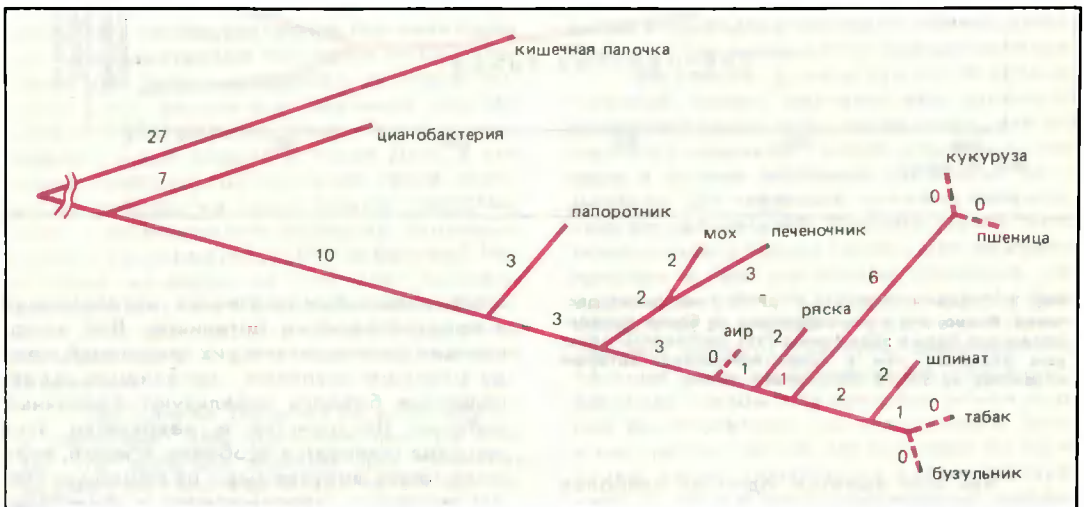


Рис. 4. Филогенетическое дерево, построенное методом «максимальной экономии». Цифры показывают число замен нуклеотидов.

### ПОЧЕМУ РАЗЛИЧНЫ СКОРОСТИ ЭВОЛЮЦИИ?

К нашему удивлению, проведенный анализ литературы показал, что вывод о разных скоростях эволюции мог быть сделан английскими биохимиками еще в начале 70-х годов, на основании результатов изучения эволюции некоторых белков растений. Если для оценки времени появления

покрытосеменных на Земле по различию в строении их цитохромов использовать средние значения скорости накопления изменений в цитохромах животных, то получается, что эта группа растений появилась 400—450 млн лет назад, а это категорически не согласуется с представлениями палеоботаников. Для биолога это звучит столь же нелепо, как и утверждение, что Нью-Йорк был основан раньше Рима. Не случайно ботаники весьма скептически отнеслись к этим «откровениям» молекулярной филогенетики.

Не менее интересные результаты были получены недавно американскими ис-

следователями при изучении нуклеотидных последовательностей в индивидуальных генах актинов растений. Известно, что эти белки (и соответствующие гены) у животных в ходе эволюции изменялись очень медленно. Оказалось, тем не менее, что у растений различия в структуре генов актинов встречаются у довольно близких видов, причем по размаху они соизмеримы с различиями, найденными в белках животных из разных классов (например, млекопитающих и амфибий). При всей очевидной значимости этих наблюдений авторы работы все же не решились выступить с критикой «молекулярных часов», хотя для этого были все основания.

Конечно, приведенными примерами не исчерпывается все то, что известно сегодня об эволюции генов растений, но удлинение перечня мало бы что добавило к напрашивающемуся выводу: концепция «молекулярных часов» — это в лучшем случае правило со множеством исключений. Не случайно недавняя теоретическая работа, в которой проблемы эволюции молекул анализируются при помощи математических методов, называется «Молекулярные часы могут быть эпизодическими часами»<sup>7</sup>. Но стоит ли называть часами механизм, произвольно меняющий скорость хода?

Если даже различия в скорости эволюции генов растений и животных отнести за счет флуктуаций средней скорости (а именно из-за этого предположения не принималась авторами и сторонниками гипотезы критика, основанная на результатах изучения белков животных, где эти различия обычно выражены не так четко), то ценность гипотезы «молекулярных часов» для филогенетики все же вызывает сомнения. Напомню, что до сих пор исследовались в основном те группы организмов, эволюция которых неплохо документирована палеонтологами (например, позвоночные животные). Однако мы знаем, что палеонтологическая летопись истории эволюции многих групп низших растений, беспозвоночных животных, грибов, простейших и всех прокариот куда менее полная, чем позвоночных. Можем ли мы, используя значения средних скоростей накопления изменений в семантидах, полученные при анализе произвольно выбранной группы, пытаться датировать события эволюции в других группах? Информация, полученная при изучении семантид расте-

ний, позволяет ответить на этот вопрос однозначно: нет, не можем. Достоверность такой датировки кажется еще более сомнительной в свете соображений, которые будут приведены далее.

Зададимся вопросом: чем может определяться разница в темпах эволюции семантид? Ответ, видимо, надо искать, анализируя роль отдельных факторов эволюции. Так, в нашей лаборатории было выяснено, что в ускорении темпов эволюции ДНК у растений определенную роль играет полиплоидизация (кратное увеличение размеров геномов или же образование новых геномов у растений путем слияния геномов родителей разных видов при гибридизации). Поскольку генетические системы у полиплоидов как минимум полностью дублированы, это снижает влияние отбора на нуклеотидные последовательности генов, дает возможность одному из пары одинаковых или сходных генов эволюционировать быстрее, «без опаски» за свойства нужного клетке генопродукта: его обеспечит другой, парный ген. Кроме того, основой увеличения скорости может быть и выраженная нестабильность геномов растений<sup>8</sup>.

Итак, мы в общих чертах разобрали события, происходящие в генах. Теперь остается выяснить, почему же вместе с генами по аналогичным законам эволюционируют и некодирующие последовательности ДНК растений. Ведь принято считать, что они не несут функциональной нагрузки.

Скорее всего, эта, общепринятая, точка зрения на некодирующие последовательности не совсем верна. Например, в книге «Эволюция генома» приводятся довольно весомые аргументы в пользу того, что повторяющиеся, некодирующие последовательности ДНК далеко не всегда представляют собой балласт генома<sup>9</sup>. Они как-то неявным пока путем (и есть основания думать, что не через биосинтез белка) могут оказывать влияние на ход таких ключевых процессов жизни клетки, как скорость ее деления, узнавание хромосомами друг друга и на ряд других, не менее важных. То, что повторяющиеся последовательности ДНК неоднородны по функциональному назначению, подтверждают исследования эволюционной динамики количественного содержания и сходства после-

<sup>7</sup> Gillespie J. H. Molecular clock may be an episodic clock // Proc. Nat. Acad. Sci. USA. 1984. Vol. 81. P. 8009—8013.

<sup>8</sup> Antonov A. S. // SSR phys.-chem. biol. reports. 1985. № 6. P. 14—29; Wabbot V., Cullis C. // Ann. Rev. Plant Physiol. 1985. Vol. 36. P. 367—396.

<sup>9</sup> Эволюция генома. М., 1986.

довательностей разных типов у покрытосеменных. Оказывается, видообразование и дальнейшая дивергентная эволюция лишь на первых этапах сопровождаются резкими изменениями в числе сходных последовательностей в группе и количестве групп. Это говорит о малом давлении отбора на некоторые фракции повторов. На следующем этапе эволюция идет за счет не столько количественных, сколько качественных изменений (накопления небольших отличий

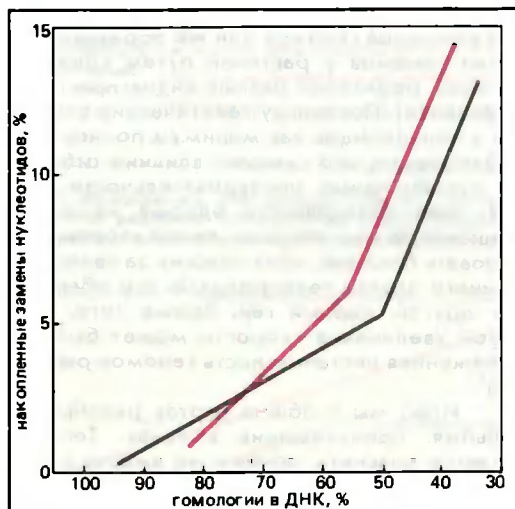


Рис. 5. Динамика накопления эволюционных изменений в уникальных (цветная кривая) и повторяющихся (черная кривая) последовательностях нуклеотидов ДНК растений. По горизонтальной оси — доля гомологий в ДНК (процентное содержание гомологий в них) и качественным их различием (процентное содержание накопленных малых изменений, замен нуклеотидов).

в первичных структурах участков ДНК). Кинетика процесса отражена на рис. 5, на котором хорошо видны перегибы в графиках, характеризующих зависимость между долей сходных последовательностей в паре сравниваемых ДНК (процентное содержание гомологий в них) и качественным их различием (процентное содержание накопленных малых изменений, замен нуклеотидов).

Из этих графиков следует и еще один вывод: самые общие закономерности эволюции уникальных и повторяющихся последовательностей нуклеотидов имеют много

общего. Действительно, сегодня мы знаем, что качественных различий между повторяющимися и уникальными последовательностями нет: значительную часть фракций уникальных последовательностей составляют так называемые «ископаемые», давно дивергировавшие повторяющиеся последовательности. В то же время обе фракции содержат последовательности генов. Таким образом, обе фракции эволюционируют согласованно, и по меньшей мере часть повторов несет функциональную нагрузку. И повторяющиеся, и уникальные последовательности ДНК совместно формируют «генетическую среду» организма, в которой происходят события эволюции как индивидуальных генов, так и «молчащих» участков ДНК.

Необходимо признать, что процессы эволюции индивидуальных генов до недавнего времени рассматривались без учета влияния генетической среды клетки, и это уже нанесло известный ущерб репутации молекулярной филогенетики. Не случайно недавно было предпринято несколько попыток совместного анализа процессов эволюции разных генов, в том числе и у растений<sup>10</sup>. Таким способом авторы этих работ пытаются, во-первых, создать более надежные представления об эволюции генотипов в целом, и, во-вторых, вычленил и проанализировать случаи, обусловленные нарушениями в плавной эволюции отдельных генов. По опыту систематиков классической школы, анализирующих комплексы фенотипических признаков, можно предсказать, что на этом пути будет немало сложностей. Нам предстоит оценить, насколько широко на молекулярном уровне представлена мозаичная эволюция, т. е. насколько сильно во времени могут отличаться между собой темпы эволюции отдельных генов в геномах одного вида и разных видов. Мы только сейчас начинаем понимать, что интенсивность взаимодействия генов в пределах одного генома или даже между геномами разных видов может сказываться самым непредвиденным образом на средней скорости их эволюции.

#### ПРАВОМЕРНЫ ЛИ ДВЕ МОДЕЛИ ЭВОЛЮЦИИ?

Методология исследования эволюции на молекулярном уровне только формируется. К числу ее «болезней роста» я бы отнес явную недооценку значимости

<sup>10</sup> Martin P.G., Boulter D., Tinny D. // Taxon. 1985. Vol. 39. № 3. P. 393—400.

теоретических обобщений классической филогенетики, теории эволюции и систематики. До сих пор было принято главным образом подчеркивать различия, противопоставлять эти две области исследований (здесь можно упомянуть и «молекулярные часы», и теорию «не-дарвиновской эволюции»). Без достаточных на то оснований, а иногда и на основе неверных теоретических предпосылок, считалось, что использование молекулярных данных позволяет более надежно реконструировать события филогенеза организмов, так как при эволюции молекул не может быть, якобы, конвергентных и параллельных изменений. Сегодня стало ясно, что эти утверждения нуждаются в уточнении: такие события на молекулярном уровне все же происходят, но редко.

Для понимания закономерностей эволюции семантид не менее важно и другое обстоятельство: было показано, что в составе генотипов индивидуальные гены — «индивидуалисты», как правило, редки; они входят в «семейства» сходных нуклеотидных последовательностей (для целей дальнейшего изложения лучше называть их «популяциями» генов). «Популяции» генов — это группы сходных по первичной структуре участков ДНК, кодирующих обычно сходные, но иногда и весьма различные по функциям белки. В состав таких «популяций» могут входить и «молчащие» гены (псевдогены) — участки ДНК, похожие на последовательности генов, но не участвующие в синтезе белков.

Сегодня можно считать твердо установленным, что в таких «популяциях» генов нередко (естественно, во временных масштабах мутационного процесса) отдельные «особи» — индивидуальные гены — обмениваются частями нуклеотидных последовательностей. В этом процессе, как мне кажется, есть много общего (по результату) с процессом изменения аллельного состава генотипов особей в популяциях организмов при половом размножении. Возможности радикального изменения последовательностей в генах этим не исчерпываются. Недавно было показано, что путем объединения кодирующих участков разных генов (их экзонов) могут образовываться гены, кодирующие совсем новые белки<sup>11</sup>.

Если пойти в поисках таких аналогий дальше, то нетрудно заметить, что скорость изменения первичных структур генов связана с их численностью (с размером

их «популяции») подобно тому, как интенсивность эволюционных процессов в популяции организмов зависит от их численности («волны жизни» С. С. Четверикова). Она зависит и от того, расположены ли гены в геноме многочисленными группами (что облегчает взаимодействие) или же порознь (геры-«орфоны», изгнанники). Здесь уместно вспомнить об особенностях эволюции малочисленных, пространственно изолированных популяций организмов: в них она идет особенно быстро. Наконец, почему бы не рассматривать процесс слияния генов из разных «популяций», приводящий к образованию полифункциональных белков с принципиально иной эффективностью работы (например, в ферментативном катализе), как аналог процесса симбиогенеза? Список таких примеров можно без труда расширить, однако и приведенных аргументов достаточно для вывода: подобно тому как организмы эволюционируют в составе популяций, взаимодействующих в биоценозах, гены эволюционируют в составе геноценозов. Более того, есть основания считать, что многие другие закономерности эволюции, вскрытые при анализе на уровне организмов, действуют и на молекулярном уровне. Однако это не следует понимать так, будто процессы эволюции на уровне молекул и на уровне организмов идентичны: известно, что тем и другим присущи и специфические эволюционные механизмы. Не так-то просто найти, например, аналог явления синхронной однопольной эволюции генов в некоторых их «популяциях».

Сегодня можно считать доказанным, что часть изменений в строении семантид действительно безразлична для отбора. Это очень важное обстоятельство, поскольку такие изменения не «проецируются» на фенотип. В результате, анализируя эволюцию геномов организмов или же отдельных генов, мы нередко можем обнаружить, что их «филогенетические связи» (и производное «таксономическое положение») не согласуются с выводами, основанными на результатах изучения фенотипов. Мне кажется, что вопрос о том, можно ли вообще на основе таких не всегда согласующихся между собой данных создать целостную картину эволюции живого, предложить единую теорию эволюции и построить естественную, филогенетическую систему организмов, принадлежит к числу наиболее интересных вопросов теоретической биологии.

О сложности задач, которые стоят здесь перед биологами, говорит простой

<sup>11</sup> Südhof T. C., Goldstein J. L. et al. // Science. 1985. Vol. 228. P. 815—822.

пример, который так любят популяризаторы науки. Известно, что человек и шимпанзе — это «хорошие», т. е. четко различимые виды, но их белки практически одинаковы по строению. Как считают М. Кинг и А. Вилсон, а вслед за ними и М. В. Волькенштейн, в этом случае различия видов определяются разной регуляцией синтеза белков, а не самими белками<sup>12</sup>. Быть может, это так, но нам известно множество примеров (и наиболее яркие иллюстрации нам дают опять-таки растения), когда различия в белках между видами, отдаленными в системах на то же расстояние, что и человек от шимпанзе, выражены очень сильно. Отрицать роль эволюционных изменений в системах регуляции нелепо, но можно предположить и другие объяснения фактам различия. Скажем, под видом, родом и т. п. зоологи и ботаники (как можно убедиться, прочитав ряд работ крупнейших современных специалистов) понимают совсем разные вещи. А. Кронквист, например, не признает представления о виде, созданные при участии не менее крупного систематика-зоолога Э. Майра. Помню, как поразила меня формулировка А. Кронквиста: «Вид — у растений — это то, что хороший систематик-ботаник считает видом»<sup>13</sup>. Я понял, что вмешиваться в этот спор, предлагая обсудить в этом контексте результаты изучения variability ДНК у животных и растений в пределах групп разного ранга (родах, семействах и т. д.), — занятие бесперспективное. Но мы, геносистематики, знаем, что по степени сходства ДНК род цветковых растений эквивалентен отряду млекопитающих! Так что сравнивать темпы эволюции у животных и растений, опираясь на существующие сегодня системы этих организмов, надо очень и очень осторожно. Не исключено, что видообразование у животных требует меньше генетических изменений, чем у растений (т. е. его «генетическая цена» меньше).

Связь между изменениями генотипов (или, правильнее сказать, структур носителей генетической информации) и изменениями фенотипов лишь коррелятивная, а поэтому генетическая цена признака может варьировать в очень широких пределах. Между тем современные системы организмов (всех, за исключением прокариот,

где уже учитываются «признаки» ДНК) построены только на основании анализа признаков фенотипа. В такой системе человек и шимпанзе далеко отстоят друг от друга. В гипотетической системе, основанной на признаках генотипов (создание ее — цель геносистематики), эти виды, скорее всего, были бы отнесены к одному роду. Различия по генам у них незначительны, а по фенотипам — очевидны. Автора данной статьи (геносистематика по профессии) такое соседство в системе ничуть бы не задело, но мне приходилось видеть совсем иную реакцию со стороны моих коллег-зоологов, свято верящих, что о родстве организмов следует судить по их фенотипам, не прибегая к анализу особенностей строения носителей биологической информации — семантид. Если исходить из «ведомственных интересов», то аналогичную одностороннюю позицию может занять и геносистематик. Думаю, что в таком противопоставлении будет мало проку. Необходимо выяснить, возможно ли в принципе при таких разногласиях выработать единую точку зрения, или все же придется признать правомерность двоякого толкования результатов эволюции, разнообразия организмов на Земле.

#### СХОДСТВА ВАЖНЕЕ, ЧЕМ РАЗЛИЧИЯ

Пришла пора подвести итоги. Эволюция молекул — это процесс, имеющий ряд специфических особенностей, но само по себе это не должно препятствовать попыткам использовать при ее изучении и описании концепции классической теории эволюции. Более того, мы вправе считать, что теория молекулярной эволюции должна строиться на основе классической концепции: закономерности эволюции имеют больше сходств, чем различий, на всех уровнях организации живого. В пользу этого тезиса говорят и данные, свидетельствующие о том, что ключевые события на молекулярном уровне происходят именно по механизмам, имеющим аналоги в процессах эволюции на высших уровнях организации живого. Радикальные изменения в структуре и принципах взаимодействия генов можно уподобить ароморфозам в эволюции организмов.

В самом деле, в условиях нейтральной эволюции молекул новое создается медленными темпами. Несравненно быстрее новые типы молекул могут возникать за счет полиморфизма нуклеотидных последовательностей в «популяциях» генов, а также за счет взаимодействия отдель-

<sup>12</sup> Волькенштейн М. В. Биологическая экология и эволюция макромолекул // Природа. 1985. № 6. С. 84.

<sup>13</sup> Cronquist A. Once again: what is the species? // Beltsville symposia in agricultural research. 1978. Vol. 2. P. 3—20.

ных особей в этих «популяциях» и генов из разных «популяций» — подобно тому, как возникает новое в микроэволюционных процессах в популяциях организмов.

Концепции классической теории вполне пригодны и для объяснения новых фактов. Так, трактовка феномена «прерываемого равновесия», резких изменений в темпах видообразования, о котором идет речь в цитированной ранее статье М. В. Волькенштейна, возможна и без привлечения теории М. Кимуры. Он находит полное объяснение в терминах и представлениях совре-

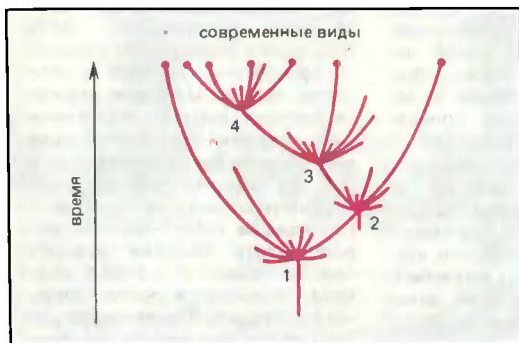


Рис. 6. Ракетная схема эволюции. Одна из схем, используемых для интерпретации результатов изучения эволюционного процесса. Видно, что периоды интенсивного видообразования [1, 2, 3, 4] во времени значительно разнесены.

менного дарвинизма (синтетической теории эволюции). Нужно только не отождествлять биологическое и геологическое время. То, что для геологических процессов — один миг, для видообразования — цепь поколений. Кстати, о прерывистом характере эволюционного процесса говорят не только данные палеонтологии, но и результаты изучения эволюции ДНК. Они согласуются с «ракетной схемой» эволюции организмов, которую можно трактовать и как графическое выражение концепции «прерываемого равновесия», и совсем иначе, в понятиях синтетической теории эволюции (рис. 6). Вопросы этого круга обсуждались в отечественной литературе задолго до С. Гоулда, Н. Элдredжа и С. Стенли; при этом оказалось не нужным привлекать какие-то новые механизмы для их объяснения<sup>14</sup>.

К шести ученых, работающих в области теории эволюции молекул и геносистематики, мало кто из них поддавался влиянию идей, ценность которых кажется сегодня ограниченной, если не сомнительной. Отечественная школа в этой науке складывалась в согласии с дарвинизмом, развитию которого она в немалой степени способствовала путем накопления принципиально новых фактов и обобщений<sup>15</sup>.

\*

Должен признаться, что в свое время на меня не произвели должного впечатления слова известного эволюциониста Дж. Симпсона, который еще в начале 60-х годов писал, высоко оценив первые успехи зарождавшейся молекулярной филогенетики, что чем больше мы будем изучать ДНК, тем труднее нам будет трактовать результаты наших опытов. ДНК тогда казалась устроенной очень просто, а опасения Симпсона — излишними. Сегодня нам остается лишь снять шляпу перед мудростью наших учителей.

<sup>15</sup> Ратнер В. А. и др. Проблемы теории молекулярной эволюции. Новосибирск, 1985; Медников Б. М. Аксиомы биологии. М., 1982; Antonov A. S. Genosystematics and darwinism // VIII K hlungsborner Kolloquium "Darwin today". В. 1983. S. 209—217.

#### РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

ЭВОЛЮЦИЯ ГЕНОМА. М.: Мир, 1986.

Медников Б. М. АКСИОМЫ БИОЛОГИИ. М.: Знание, 1982.

Кимура М. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ЭВОЛЮЦИЯ: ТЕОРИЯ НЕЙТРАЛЬНОСТИ. М.: Мир, 1985.

<sup>14</sup> Медников Б. М., Меншуткин В. В. // Журн. общ. биол. 1977. Т. 38. № 2. С. 198—203; Антонов А. С. // Усп. совр. биол. 1974. Т. 77. С. 2—14.





## Снежный баран в Забайкалье может исчезнуть

**Л. В. Солин,**  
кандидат сельскохозяйственных наук

**А. Б. Ермолин,**

Иркутский сельскохозяйственный институт

Снежный баран (*Ovis pivicola*), которого называют также толсторогом и чубуком, в нашей стране встречается на огромной территории. Его ареал тянется с запада на восток от плато Путорана (южнее п-ова Таймыр) до Чукотки, а с севера на юг от Северного Ледовитого океана до широт Байкала и Станового хребта. Однако внутри ареала снежный баран распространен мозаично, в каждой географической области насчитывается много разделенных большими расстояниями очагов обитания. Общая численность его достаточно велика (70—90 тыс. особей), и, казалось бы, нет особых причин беспокоиться за его судьбу. Но именно из-за мозаичности ареала отдельные популяции исчезают (до сих пор он считается промысловым животным). В результате численность двух подвидов — путоранского (*O. p. borealis*) и корякского (*O. p. koriakorum*) сократилась настолько, что они стали редкими и попали в списки Красных книг СССР и РСФСР (в этой книге корякский подвид почему-то назван по-русски чукотским).

Биология снежного барана изучена мало, так же как и многие экологические особенности, недостаточно сведений о внутривидовой структуре. Поэтому у зоологов нет общего мнения о количестве его подвидов. К настоящему времени описано 5 подвидов: путоранский, якутский (*O. p. lydekkeri*), охотский (*O. p. alleni*), корякский и

камчатский (*O. p. pivicola*). Мы придерживаемся мнения, что существуют только 3 подвида — путоранский, якутский и камчатский, а остальные два, — скорее всего, расы якутского, идущие к подвидовому обособлению. По-видимому, такой расой является и снежный баран, обитающий на хребте Кодар в Забайкалье. Обследовав популяцию кодарского барана в 1984—1985 гг., мы обнаружили, что она достаточно самобытна: из всех снежных баранов кодарский — самый мелкий и самый светлый, его окраска почти чисто белая, только хвост выделяется темной полосой; есть отличия и в строении черепа.

Снежный баран — довольно крупное животное: самцы в холке достигают иногда высоты 105 см, длина тела доходит до 180 см, а масса в среднем составляет около 100 кг; самки намного меньше самцов, весят они 40—60 кг. Толстые у основания (до 36 см в обхвате) изогнутые рога, за которые барана и называют толсторогом, в длину могут достигать 111 см, у самок же рога маленькие. Шерсть у разных подвидов окрашена по-разному, у якутского она коричневая или желто-бурая, к весне становится светлее.

Кодарский баран обитает в высокогорном поясе с крутыми склонами, ледниковыми цирками и острыми скалистыми гребнями. В этих местах с суровым климатом — продолжительной, до 8—9 месяцев, холодной зимой и коротким прохладным летом — в растительном покрове преобладают горные тундры, но есть также заросли низкорослых кустарников, небольшие участки альпийских лугов и голцы. На таких лугах летом баран кормится осоками, злаками и бобовыми, а зимой его табунки собираются на небольших пятачках, откуда снег снесен сильными ветрами, или уходят в редко-

лесье и собирают растительную ветошь.

Во время гона, который начинается во второй половине ноября и длится немногим больше месяца, нарушается состав обычных группировок, двух-трех самок преследуют несколько самцов — и старые и сеголеток, причем молодые держатся позади. Бывают ожесточенные поединки, во время которых бараны часто ломают рога, так как зимой они становятся хрупкими от мороза. Начинается гон самцов с 6—7-летнего возраста, хотя половой зрелости они достигают в 1,5—2,5 года; самки становятся половозрелыми к 1,5 годам. Почти через полгода после спаривания рождается один, очень редко два ягненок. Совершенно беспомощные в первые 2—3 дня, ягнята затем начинают следовать за матерью, а через 5—7 дней уже не отстают от взрослых. Первое время ягнята питаются в траве, где за счет контрастной окраски — сочетания белого или серовато-белого цвета туловища и брюха с темно-бурыми головой, шеей и грудью — совершенно незаметны.

Линька начинается в мае, первыми меняют шерсть самцы, последними — беременные и кормящие самки. Поскольку срок линьки индивидуально изменчив, в одном табунке можно встретить и животных, еще не начавших линять, и с голыми ногами, шеей и грудью, и почти полностью перелинявших.

На кодарского снежного барана охотятся те же хищники (волк, росомаха, медведь, беркут), что и на остальном ареале якутского подвида, гибнет он также в снежных лавинах, которые на Кодаре не редкость, но самый большой урон кодарской популяции наносят охотники. В конце 60-х годов снежный баран встречался на Кодаре в верховьях рек Сюльбана, Верх-



Табунок снежных баранов на Кодаре в начале лета.

него, Среднего и Нижнего Сакукана, Апсата, а также в районе озер Орон и Ничатка. Его численность определялась в 200—300 особей, ареал популяции составлял около 2000 км<sup>2</sup>. Сейчас бараны постоянно встречаются только в бассейнах рек Среднего Сакукана и Апсата, на территориях с большим, чем в других местах, количеством альпийских лужаек и особенно скалистыми рельефом. Численность их точно не установлена, считается что их не более 100. Обследовав кодарскую популяцию, мы насчитали в верховьях Среднего Сакукана 35 особей; есть сведения, что примерно столько же их и в верховьях притоков Апсата. Исходя из этого, числен-

ность их действительно не превышает 100, но возможно, составляет только 50 голов.

Поголовье снежного барана уменьшается в Забайкалье с каждым годом, только небольшая популяция сохранилась на Кодаре, а судя по находкам ископаемых остатков верхнеплейстоценового времени на стоянках Мальта, Верхоленская гора, в Баргузинской котловине, в окрестностях озера Баунт и города Бодайбо, прежний ареал охватывал все Прибайкалье, включая Становое нагорье.

Человек издавна охотился на якутских баранов, но истребительной охота стала, когда широко распространилось огнестрельное оружие и усилилось освоение многих горных районов. Вблизи горнодобывающих районов и мест, где пасутся домашние северные олени, якутский баран выбит полностью. Чтобы такая же участь не

достигла популяцию снежного барана на Кодаре — последнем убежище этого животного в Забайкалье, необходимо принять срочные меры. В первую очередь нужно создать республиканский заказник, а затем организовать заповедник, в который вошла бы северная часть Кодара (это территория уже существующего заказника «Ничатка») и предлагаемый заказник по Среднему Сакукану. Возможные противоречия заповедания Кодара и хозяйственного освоения Каларского района, на территории которого находится этот хребет, на наш взгляд, вполне преодолимы, нужно лишь согласовать приемлемые для разных ведомств границы заповедника. Кроме того, мы считаем, что кодарского снежного барана нужно внести в списки «Красной книги СССР» как уникальную популяцию, которой грозит исчезновение.

## «Вулканолог» исследует подводный факел

**Г. П. Авдейко,**  
кандидат геолого-минералогических наук

**Г. М. Гавриленко**

**Л. В. Черткова,**  
кандидат геолого-минералогических наук

Институт вулканологии ДВНЦ АН СССР  
Петропавловск-Камчатский

Март 1982 г. Научно-исследовательское судно АН СССР «Вулканолог» пересекает Филиппинское море, возвращаясь в Петропавловск-Камчатский после очередного 13-го рейса. Позади объекты исследования — подводные вулканы западной окраины Филиппинского моря и участок шельфа Южно-Китайского моря. Научный состав экспедиции подводит итоги, когда на борт судна поступает радиограмма из Института вулканологии АН СССР. Суть ее в том, что рыболовный траулер «Пограничник Змеев» в Охотском море, вблизи о. Парамушир, обнаружил на глубине 820 м действующий вулкан диаметром 290 м. При облете с самолета 23 марта никаких признаков извержения на поверхности моря не обнаружено. Нам предстоит проверить сообщение «Пограничника Змеева» в море.

Итак, программа рейса продлена. Никто из нас и не подозревал, что новый объект исследований будет «притягивать» нас на протяжении нескольких лет.

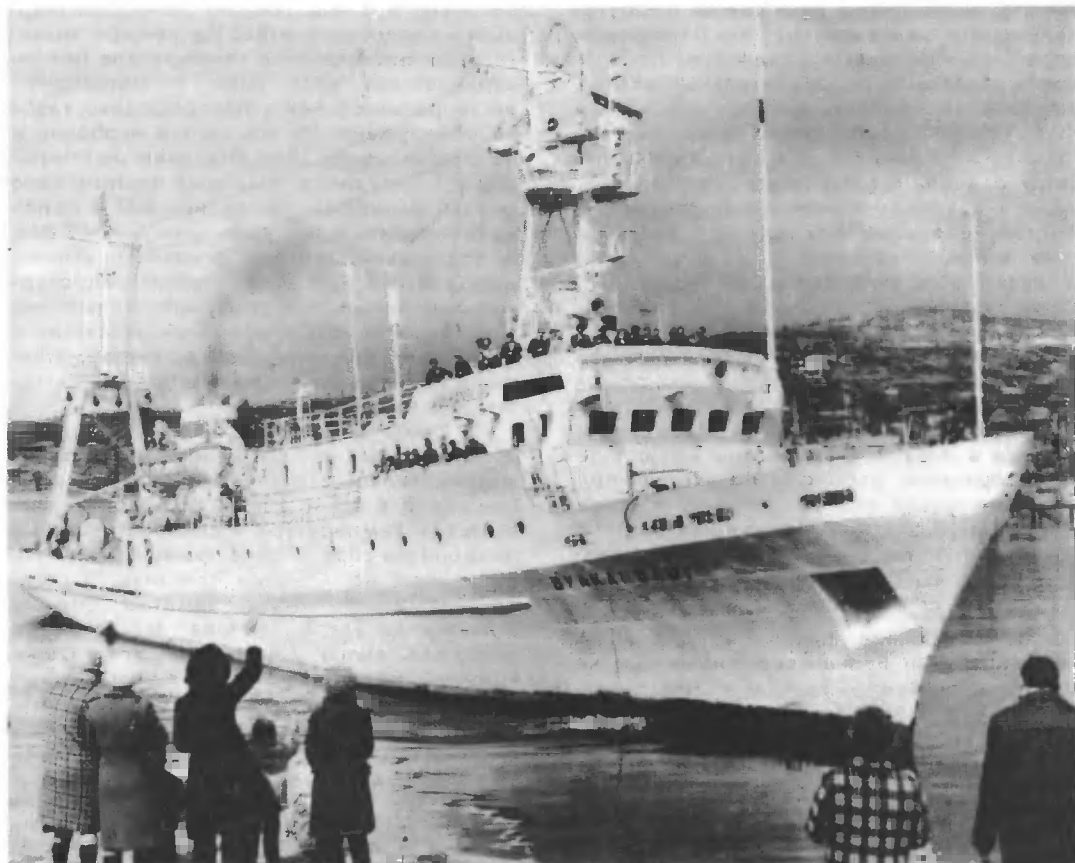
### ФАКЕЛ АНОМАЛЬНОЙ ВОДЫ

Отыскать в море объект такого размера, к тому же невидимый с поверхности, даже если известны координаты, — задача довольно сложная. Ведь точность их определения на рыболовном судне значительно ниже 150 м, т. е. половины диаметра объекта. Но извержение подводного вулкана, если оно было, обязательно оставило следы в рельефе дна, в строении осадков, в химическом составе воды и растворенных в ней газах. А наш «Вулканолог» оснащен аппаратурой, способной отыскивать такие следы. На нем имеются и современные эхолоты для фиксации рельефа дна, и аппаратура непрерывного

сейсмоакустического профилирования, позволяющая видеть то, что находится под дном, и магнитометры, и приборы для непрерывной регистрации содержания растворенных в воде газов и температуры поверхностного слоя воды с точностью до сотых долей градуса. Вся эта аппаратура работает во время хода судна. Кстати сказать, почти вся она, за исключением эхолотов и газогадросхимической аппаратуры, сконструирована, изготовлена и обслуживается нашими инженерами В. Н. Дубровским и В. А. Сергеевым. Кроме того, с борта «Вулканолога» ведется отбор проб воды и осадков, драгирование поверхности дна для отбора образцов лав и других пород, измеряется тепловой поток и т. д. Словом, мы почти уверены: если извержение было, мы его обнаружим.

При подходе к указанной точке следим за показаниями приборов и поверхностью — никаких признаков извержения: на эхолоте — ровное дно, на ленте сейсмопрофилографа — под дном осадки толщиной более километра, никаких магнитных, газогадросхимических и температурных аномалий. Разворачиваем судно на противоположный курс и проходим параллельным галсом в 200—250 м от первого, чтобы не пропустить «ничто» диаметром около 300 м. Снова ничего.

Наконец, на пятом галсе самописец эхолота прорисовывает темный столб воды, оторванный ото дна. Обычно вода на эхограмме светлая, если только не насыщена местами (обычно у поверхности) планктоном. Затем подсекаем основание столба — небольшое, высотой около 5 м, конусообразное возвышение, от которого и отходит факел аномальной воды. Этот факел и был принят траулером за извер-



«Вулканолог» возвращается из рейса.

гающийся подводный вулкан. И параметры его почти совпали с теми, что сообщил траулер: высота — около 500 м, диаметр — около 300 м, а основание — на глубине 800 м. Рыбаки, спасибо!

С аналогичными записями на эхограммах над подводными вулканами нам уже приходилось сталкиваться в предыдущих рейсах. Причиной появления на записях факелов были парогазовые струи в кратерах или прикратерных частях вулканов — подводные фумаролы, поставляющие рудные компоненты из недр Земли на поверхность. Так, в 4-м рейсе было установлено, что подводной фумаролой вулкана Эсмеральда, вблизи Марианских о-вов, на дно моря выбрасывалось более 1500 кг/с смеси горячей воды, пара и газа и вместе с ней 13 т железа, 3 т цинка, 1,8 т меди и 0,2 т никеля в сутки. И наземные вулканы поставляют рудные компоненты на повер-

хность Земли, но только на дне моря создаются условия для их осаждения и формирования месторождений полезных ископаемых.

В нашем случае связи факела с каким-либо вулканом не выявляется. На самописце сейсмопрофилографа под факелом фиксируются слоистые осадки. Поднимаем грунт дночерпателем. Действительно осадки, но с запахом сероводорода. Пробы морской воды не дают значительных отклонений от фоновых значений. Чем же вызван факел? Нужны специальные работы, а судну пора возвращаться в Петропавловск. Откладываем решение загадки до осени.

#### НЕ ВУЛКАН, А ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЙ ИСТОЧНИК

Прошло полгода. В сентябре, в 15-м рейсе, «Вулканолог» идет к подводным вулканам Курил. Исследования факела включены в программу рейса. Быстро его находим. Он почти не изменился ни по

высоте, ни по диаметру и слегка наклонен на северо-восток в соответствии с течением. Берем пробы воды и осадков и, пока на борту ведется их предварительный анализ, начинаем исследовать район.

Прежде всего нужно дать, как мы говорим, геолого-структурную характеристику района. Устанавливаем, что он приурочен к вулканической зоне, где встречаются небольшие подводные вулканические конусы, которые под водой продолжают цепь вулканов на о. Парамушир. Связь факела с вулканизмом, скажем осторожно, вероятна. Однако на сейсмопрофилях видно, что эти конусы высотой до 600 м полностью погребены под слоем осадков. Возможно два объяснения: либо они сформировались недавно при внедрении лав в осадки, и тогда они могут еще быть горячими, либо они погребены под осадками после их образования, и тогда при средней скорости накопления осадков 200 мм в 1000 лет они не моложе 3 млн лет и должны были полностью остыть.

На сейсмопрофилях выявляется также, что в районе факела на дне моря немало трещин. Больше всего их на участке между факелом и вулканом Чикурачки. Значит, наш факел все же связан с вулканической зоной о. Парамушир, а ведь на ней, помимо активных вулканов, есть гидротермальные источники. Может быть, и мы имеем дело с подводным гидротермальным источником? Трещиноватые породы в этом случае служат путями подъема горячей воды к поверхности.

Обратимся к данным магнитных измерений. Они не приводят к однозначным выводам. Одни конусы никак не выражены в магнитном поле, другие дают значения, характерные для вулканических построек, сложенных лавами. Магнитные данные дают представление и о возрасте построек. В геологической истории Северный и Южный магнитные полюса периодически менялись местами. Такие смены полярности называют инверсиями. Вулканы как бы запоминают магнитное поле, которое существовало при излиянии лав и их остывании. Последняя инверсия полюсов произошла около 700 тыс. лет назад, т. е. с нашей, геологической, точки зрения совсем недавно. Так вот, выясняется, что большинство выявленных в районе факела вулканических конусов намагничено «по современному полю», т. е. положительно, и они могут быть моложе 700 тыс. лет, а один имеет отрицательную намагниченность и ему более 700 тыс. лет.

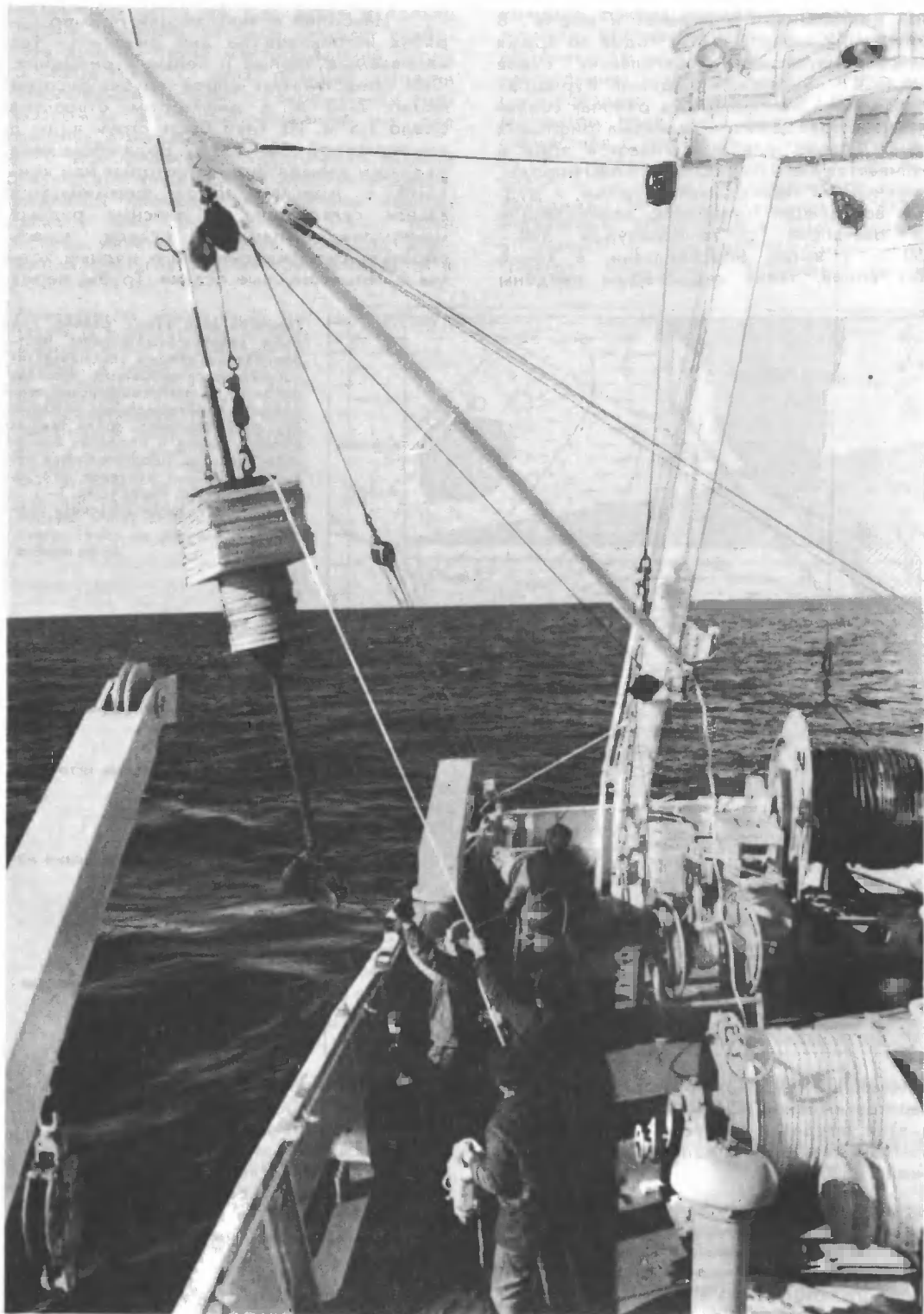
Ну, а о чем говорят непосредственные исследования воды? Каких-либо значительных отклонений в температуре приповерхностного слоя воды и содержании растворенных в ней углекислотных газов не обнаружено. Но мы на это особенно и не рассчитывали. Для создания ощутимой газовой аномалии в приповерхностном слое концентрация газа на глубине 800 м должна превышать фоновую минимум в 15 раз. А содержание метана, основного углекислотного газа в современных гидротермальных источниках суши, значительно ниже. Температурные аномалии «гасятся» в воде еще быстрее. Более информативными должны быть пробы воды непосредственно из факела.

Снова выходим к факелу и берем пробы воды из различных горизонтов водной толщи сначала над ним, а затем примерно в 0,5 и 3,5 км от него. Оказывается, и температура и соленость воды в придонном слое в зоне факела чуть-чуть выше, чем на фоновых станциях. В столбе аномальной воды заметно больше углекислого газа, метана и особенно водорода, гелия и кремния. Эти газы и кремний всегда встречаются в повышенных концентрациях в горячих водах, связанных с вулканической деятельностью, и в fumarольных струях на активных вулканах. Так как факел не связан с каким-либо подводным вулканом, а только приурочен к вулканической зоне, скорее всего это — подводный гидротермальный источник.

Таким образом, нам, видимо, удалось обнаружить первый сравнительно глубоководный гидротермальный источник в островных дугах. Мелководные источники в прибрежной зоне вулканических островов встречаются довольно часто. Имеются они и на Курильских о-вах. Но именно глубоководные источники имеют особую ценность. Вокруг них образуются гидротермально-осадочные сульфидные руды за счет выносимых источниками рудных компонентов.

## ПОСТАВЩИКИ РУД В ОКЕАНЕ

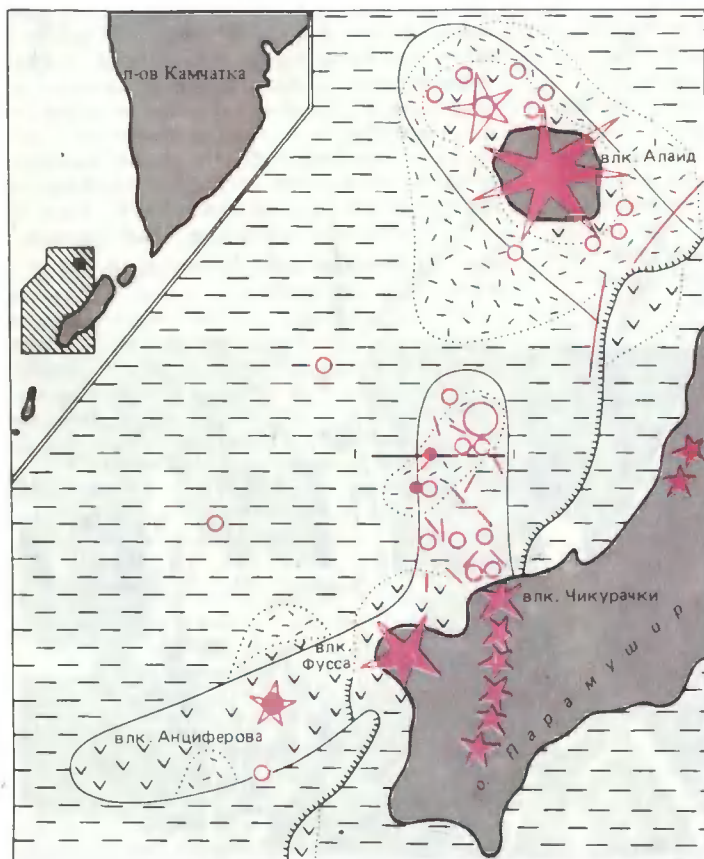
В последнее время во всем мире возрос интерес к подводной гидротермаль-





ной деятельности в океанах и морях<sup>1</sup>. В конце 60-х — начале 70-х годов во время рейсов научно-исследовательских судов АН СССР «Витязь», «Академик Курчатов» и «Дмитрий Менделеев» в районах современного подводного вулканизма (рифтовых зонах океана, где растягивается кора и изливается лава) были обнаружены породы, измененные термальными водами, и рудные ассоциации минералов, возникающие из растворов с температурой 300—350 °С и выше. Впоследствии, в конце 70-х годов, такие гидротермы найдены

Наиболее впечатляющий пример горячих источников на дне океана — так называемые черные и белые курильщики. Они представляют собой трубы высотой около 2—3 м с диаметром отверстия около 1,5 м. Из труб бьют струи воды с температурой 350—400 °С. Вода обогащена рудными элементами, из которых при контакте с морской водой формируются взвеси сульфидных и окисных рудных минералов. Выпадая в осадок, взвесь образует сульфидно-окисные рудные холмы и металлоносные осадки. Трубы, через



Геологическая схема района, где были обнаружены факелы, построенная по данным сейсмоустойчивого профилирования. Факелы, вероятно, являются выбросами подводных гидротермальных источников, расположенных среди трещиноватых пород в пределах вулканической зоны, продолжающей цепочку наземных вулканов юго-западной части о. Парамушир. 1—1 — положение гидрохимического профиля.

#### Вулканы:

- наземные
- подводные
- погребенные под осадками
- Гидротермальные источники
- Фундамент
- Осадочно-вулканогенный материал
- Осадки
- Подводная терраса
- Границы вулканических зон
- Разломы и трещины

с помощью глубоководных обитаемых аппаратов «Алвин» (США) и «Снана» (Франция) в пределах рифтовой зоны Восточно-Тихоокеанского поднятия на глубинах около 2500 м.

которые поступает термальная вода, также сложены сульфидами железа, меди, цинка, свинца и других металлов.

Масштабы этого процесса поистине грандиозны. Многие известные сейчас на континентах месторождения сульфидных руд меди, цинка, свинца и других металлов формировались именно в такой обстановке, т. е. в зонах проявления вулканизма и связанной с ним гидротермальной деятельности в рифтовых зонах или в

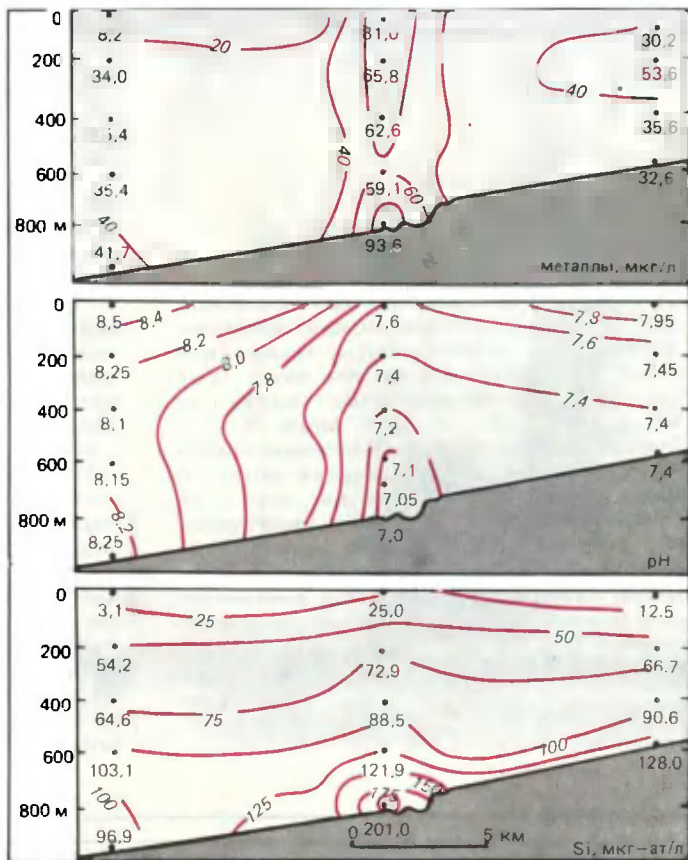
<sup>1</sup> См., напр.: Батурин Г. Н. Сульфидные руды на дне океана // Природа. 1985. № 6. С. 98—104; Базилевская Е. С. Металлоносные осадки // Природа. 1986. № 4. С. 34—41.

островных дугах на дне моря и только потом оказались на суше. Возраст наиболее древних таких месторождений около 3 млрд лет. С этих позиций понятен повышенный интерес к современным гидротермам и рудообразованию на дне океанов и морей.

Вот почему нас обрадовали первые результаты химического анализа осадков, поднятых дночерпателем вблизи выхода факела: они содержали в 1,5—2 раза больше никеля, марганца, фосфора, алюминия и других рудных компонентов. А в

природе факела аномальной воды и возможном количественном выносе рудных компонентов можно было бы только при наблюдениях и отборе проб с обитаемых глубоководных аппаратов. У нас таких аппаратов пока нет. Была разработана совместная с Институтом океанологии АН СССР программа: летом 1986 г. «Вулканолаг» и научно-исследовательское судно «Академик Мстислав Келдыш» с двумя аппаратами «Пайсис» на борту вместе отправятся к факелу. Напомним, что «Пайсис» способен погружаться, вести

**Распределение концентрации металлов (в микрограммах на литр) в растворенном и взвешенном состоянии, а также pH и кремния (в микрограмм-атом на литр) по профилю I—I. Наиболее высокие концентрации металлов и кремния и низкие значения pH приурочены к истоку факела — предполагаемому выходу гидротермального источника на дно моря. Аномальные «ореолы» охватывают всю водную толщу вплоть до поверхности. Точки на рисунке — места отбора проб.**



субколлоидной фракции, источником которой, по-видимому, являются гидротермальные поступления, доля подвижного (гидрогенного) железа достигает 75%. Косвенным признаком существования подводного гидротермального источника является и резко восстановительная обстановка илов вблизи источника, тогда как при удалении от него на 200—300 м уже наблюдается окислительная обстановка.

Но окончательно решить вопрос о

наблюдения и отбирать пробы воды и осадков до глубин 2000 м.

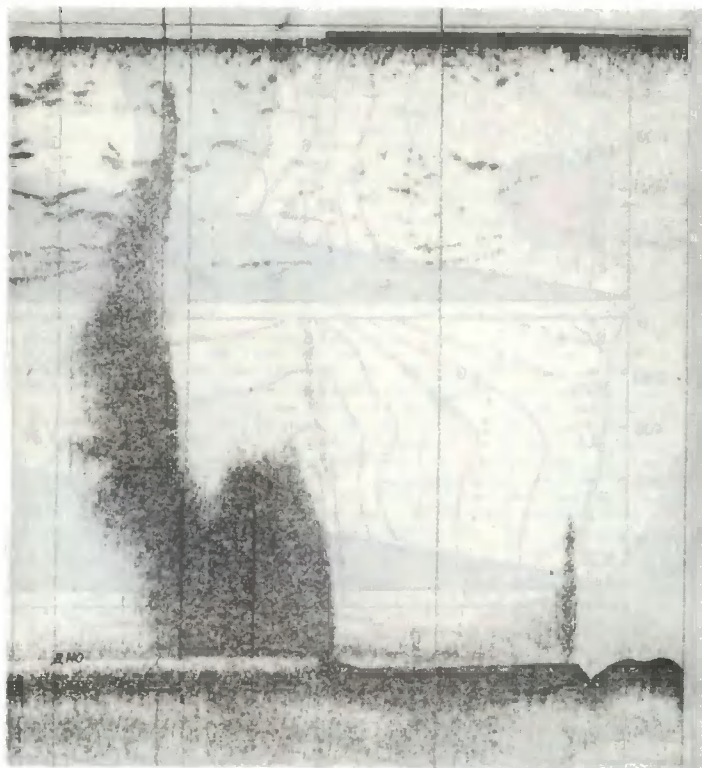
#### РУДНЫЕ КОМПОНЕНТЫ АНОМАЛЬНОЙ ВОДЫ

Но до этого срока факел находится под пристальным вниманием «Вулканолага». Для успешной работы глубоководных аппаратов нужны и детальная батиметрическая карта, и газогидрохимическая

характеристика морских вод в районе факела, и карта осадков, и схема тектонических нарушений, и данные об изменении параметров факела во времени. Все это заставляет нас проводить кратковременные наблюдения. Дважды за это время специалисты института модернизировали станцию непрерывного гидрогазопрофилрования. Был расширен спектр определяемых газов, поднята чувствительность приборов. Во время исследований в 17-м (1983 г.) и 24-м рейсах (1985 г.) «Вулканолога» установили, что в приповерхност-

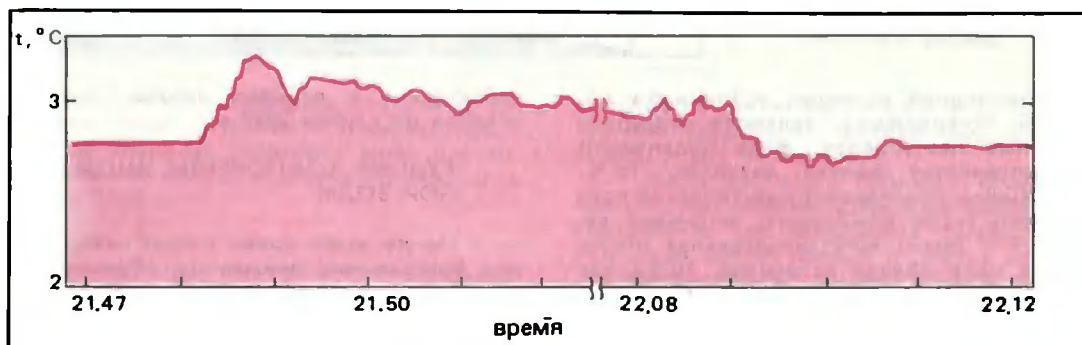
ном слое морской воды над факелом концентрации растворенных газов (водорода, азота, углекислого газа и в меньшей степени метана и аргона) повышены. Это очень важно для разработки методики поисков подводных гидротерм. Искать их с поверхности и дешевле и быстрее.

При детальных гидрохимических исследованиях в 24-м рейсе «Вулканолога» удалось выявить отчетливые зоны повышенных концентраций меди, железа, марганца, фосфора, цинка и других рудных компонентов над предполагаемым выхо-



Эзограмма, сделанная с борта «Вулканолога» 4 сентября 1985 г. Темные участки на рисунке — приповерхностный слой, дно, скопления планктона и, наконец, факел аномальной воды. Глубина моря в районе факела около 800 м, его диаметр — около 300 м. Вертикальные полосы — отметки времени, ограничивающие получасовой интервал.

Автоматическая запись температуры слоя воды на высоте 10 м от дна в районе факела, сделанная с борта «Вулканолога» 5 сентября 1985 г. Разрыв в записи обусловлен ее односторонностью. Температура воды в зоне факела на 0,2—0,5 °С превышает фоновую. Максимальное превышение температуры зафиксировано в начальный момент вхождения датчика в аномальную воду в интервале от 21 ч 48 мин до 21 ч 49 мин.



дом источника на дне. Это еще одно свидетельство в пользу гидротермальной природы факела.

Над источником зафиксирована такая же аномальная концентрация кремнезема — одного из наиболее характерных гидротермальных компонентов, и pH, т. е. концентрации ионов водорода. Регистрация pH представляет особую ценность — этот показатель фиксируется на многие километры от источника и его можно определять в автоматическом режиме на ходу судна. Так что это еще один сравнительно дешевый метод поисков подводных гидротерм.

Если мы имеем дело с подводной гидротермой, важным ее показателем должна служить температура воды. На поверхности моря никаких аномалий мы не обнаружили. Правда, непосредственно над факелом (а в августе 1985 г. факел доходил почти до поверхности, т. е. высота его составляла 800 м) температура воды была на 0,1—0,2 °C ниже окружающей. Это легко объясняется тем, что восходящей струей затягивается и поднимается холодная придонная вода.

А какова же температура на выходе источника? Замеры вблизи гидротермальных источников в рифтовых зонах Тихого океана с обитаемых глубоководных аппаратов «Алвин» и «Сиана» показали, что при температуре источников 350—400 °C, температура морской воды в 10—15 м от них отличается от фоновой всего лишь на 0,4—0,6 °C. Так что зафиксировать с «Вулканолога» такую температурную аномалию на дне моря было очень и очень трудно. По образному выражению нашего сотрудника Е. А. Вакина, это все равно, что измерить температуру, например, Малкинских гидротермальных источников на суше с вертолета, зависнув на высоте 800 м, да еще в туман. Но мы все-таки предприняли такую попытку и, как оказалось, безуспешно.

В. А. Сергеев изготовил специальный безынерционный датчик температуры, который на корабле опускался на расстояние 8—10 м от дна. Запись температуры производилась на ленте самописца на борту судна. За положением датчика относительно дна следили по эхолоту. Сначала при продвижении судна к факелу на самописце прописывалась обычная температура придонного слоя: 2,74—2,77 °C. При входе датчика в факел температура воды резко поднялась до 3,23 °C, т. е. почти на 0,5 °C. Это очень большой перепад, сопоставимый с перепадом температур у подводных источников

Тихого океана, имеющих собственную температуру 350—400 °C. Так что такие температуры не исключены и для источника у о. Парамушир.

Непрерывным сейсмоакустическим профилированием выявлены облакоподобные структуры осадков под дном в районе выхода источника и на значительном удалении от него. Они также могут быть созданы под воздействием поднимающихся горячих растворов. Такой процесс называют гидротермальным метаморфизмом. В подтверждение наших предположений при детальном исследовании, проведенных в сентябре 1985 г. в 24-м рейсе «Вулканолога», удалось обнаружить еще один факел аномальной воды, расположенный в 8 км от первого примерно в такой же обстановке.

Таким образом, скорее всего мы имеем дело с крупным подводным гидротермальным полем, расположенным к западу от о. Парамушир. И вполне возможно, что это поле является рудоносным. Во всяком случае, в пользу этого говорят пробы морской воды и осадков. Руды могут отлагаться как на дне, так и на путях миграции гидротермальных растворов при подъеме их к поверхности. А «маркировать» такие участки рудоотложения могут те самые облакоподобные структуры.

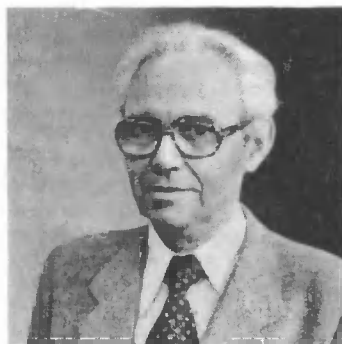
В июле 1986 г. «Вулканолог» из Петропавловска-Камчатского и «Академик Мстислав Келдыш» из Владивостока возьмут курс на о. Парамушир, в район проявления факелов. Все мы напряженно ждем, когда «Пайсисы» опустятся на дно и возьмут пробы воды и осадков у выхода источников, а участники погружения увидят непосредственное рождение факелов аномальной воды и зафиксируют этот процесс с помощью современной фото- и теле-техники.

## Электролиз в металлах

В. Б. Фикс, М. И. Каганов



Владимир Борисович Фикс, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник Физико-технического института им. А. Ф. Иоффе АН СССР. Область научных интересов — физика твердого тела и методы измерения физико-химических величин. Автор монографии: Ионная проводимость в металлах и полупроводниках. М., 1969.



Моисей Исаакович Каганов, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник теоретического отдела Института физических проблем АН СССР, профессор кафедры физики низких температур физического факультета Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова. Основные работы в области квантовой теории твердого тела. Автор ряда монографий, научно-популярных книг и статей в «Природе».

Пропуская ток через электронный проводник, мы не замечаем перераспределения атомов в нем — с проводником вроде бы ничего не происходит. Однако, если пропускать ток достаточно долго, а за распределением атомов следить достаточно внимательно, то можно обнаружить направленное движение ионов металла. Это электролиз — электроперенос ионов металла.

Явление, обнаруженное более ста лет назад, оказалось очень непростым, и понять его удалось лишь сравнительно недавно.

Все, что происходит в металлах, привычно относят к двум областям физики: проводимость, эффект Холла, магнетосопротивление, скин-эффект, металлоопти-

ка — к электронной физике металлов; диффузию, прочность, пластичность, структурные превращения — к физике атомных (решеточных) процессов. Электроперенос расположен на границе областей, точнее, он принадлежит им обеим. В этом его сложность. В этом его интерес для физиков.

\*

Законы электролиза, открытые М. Фарадеем в 1833—1834 гг., оказали мощное стимулирующее влияние на развитие кинетической теории вещества; они дали прямое указание на дискретность электрического заряда. Установлены законы электролиза были при изучении прохождения тока через электролиты — водные растворы

кислот, щелочей, солей, легко распадающиеся в воде на ионы противоположных знаков. Открытия Фарадея побудили физиков и химиков исследовать прохождение тока через самые различные вещества, в том числе металлы. В первых экспериментах (К. Рикке и др.) электролиз в металлах не был обнаружен — пропускание тока через них не вызывало переноса вещества. Впервые электролиз в металлах удалось продемонстрировать французскому физику К. Жирардену (1861 г.) в опытах со сплавами. Эти опыты были выполнены еще до открытия электрона (1877 г.), поэтому электролиз в металлах интерпретировался так же, как в электролитах: атомы металла распадаются на ионы противоположных знаков, которые дрейфуют под действием внешнего электрического поля. Малый выход металлов по отношению к пропущенному количеству электричества трактовался как следствие малой диссоциации металлов на ионы. Открытие электрона сделало понятным малый выход ионов металла, так как стало очевидным: ток в металлах, даже при распаде всех атомов на ионы и электроны, переносится в основном подвижными электронами.

На первом этапе количественных исследований электролиза металлов и механизма подвижности ионов (1908—1958 гг.) обычно использовалась ртуть, в которой были «растворены» ионы. Ртуть (металл, находящийся в жидком состоянии при комнатной и даже более низких температурах — точка плавления почти на  $39^\circ$  ниже нуля Цельсия) была наиболее удобным металлом-растворителем. При пропускании тока ионы растворенного металла двигались к одному из электродов, их концентрация у этого электрода увеличивалась, а у электрода противоположного знака — уменьшалась. Измеряя различными способами количество перенесенного вещества при пропускании через металлический раствор определенного количества электричества, можно найти подвижность и примесных ионов относительно растворителя<sup>1</sup>. Однако конвективные перемешивание и другие несовершенства экспериментов приводили к тому, что многие результаты раннего периода вызвали сомнения, а значительное число опытов попросту оказалось ошибочным. И тем не менее главные каче-

ственные особенности механизма подвижности ионов в жидкой ртути были установлены, а некоторые даже удалось описать количественно.

### ОСОБЕННОСТИ ПОДВИЖНОСТИ ПРИМЕСНЫХ ИОНОВ В РУТИ

Прямые измерения показали, что по порядку величины абсолютные подвижности примесных ионов в ртути, электролитах и расплавах солей совпадают:  $u \approx 10^{-3} - 10^{-4} \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ .

Соотношение Эйнштейна, устанавливающее связь между подвижностью  $u$  и коэффициентом диффузии  $D$  ( $u = Z |e| D / kT$ , где  $k$  — постоянная Больцмана,  $Z |e|$  — заряд иона), которое, казалось бы, должно выполняться всегда, содержало дополнительный множитель, изменяющийся от десятых долей единицы до нескольких единиц в разных экспериментах.

Предпринимались попытки объяснить этот факт без кардинального пересмотра механизма подвижности. Однако некоторые особенности подвижности ионов выглядели необычными, а иные — воистину парадоксальными.

Ионы некоторых металлов (цинка, олова, кадмия, золота, серебра) двигались к аноду так, как если бы они обладали отрицательными зарядами, что для металлов представлялось по меньшей мере странным. Для других ионов (калия, натрия, бария) с изменением их концентрации происходила инверсия направления движения. Ионы калия с концентрацией, меньшей 2 %, двигались к аноду, а с большей — к катоду<sup>2</sup>.

Наконец, наблюдалась корреляция между дополнительным удельным электрическим сопротивлением растворов, вносимым примесными ионами, и направлением движения этих ионов: если примесные ионы увеличивали сопротивление раствора — к ним относятся ионы цинка, кадмия, олова, золота, серебра, лития, — они двигались к аноду, если уменьшали его — ионы натрия, калия, цезия — к катоду. Эту закономерность назвали правилом электропроводностей. Правда, правило электропроводностей обнаруживало исключения: висмут, свинец и тантал ему не подчиняются<sup>3</sup>.

<sup>1</sup> Подвижность  $u$  — средняя скорость упорядоченного движения ионов, вызванная приложенным к проводнику электрическим полем, напряженность которого равна  $1 \text{ В/см}$ . Это есть мера сопротивления среды движению заряженных частиц в ней.

<sup>2</sup> Инверсия подвижности наблюдалась также у ионов натрия (при концентрации 2,5 %) и бария (при концентрации 2,7 %).

<sup>3</sup> Любопытно отметить, что ионы таких похожих металлов, как натрий, калий и литий, ведут себя по-разному: ионы натрия и калия движутся к катоду, а ионы лития — к аноду.



Один из первых исследователей ионного переноса в металлах Ф. Скаупи построил в 1907 г. сугубо качественную теорию, в которой была сделана попытка привлечь к объяснению наблюдаемых явлений электроны проводимости. Так как схема Скаупи не содержала никаких количественных соотношений и не всегда согласовывалась с экспериментом даже качественно, она по существу была забыта. На смену ей пришли представления, вовсе не учитывающие взаимодействия электронов проводимости с ионами (К. Вагнер, 1932 г.). Хотя теория Вагнера не могла объяснить всей совокупности экспериментальных данных по ртути, а особенно подвижности ионов в твердых металлах, его формулой пользовались для анализа результатов эксперимента вплоть до 1960 г.<sup>1</sup> Однако накапливались все новые парадоксальные факты, свидетельствовавшие о том, что необходим прямой учет взаимодействия электронов проводимости с ионами металла.

Важным толчком к созданию правильной микроскопической теории движения ионов послужили эксперименты Е. Гафнера (1953 г.) и других по разделению изотопов чистых жидких металлов при пропускании тока, т. е. в процессе электролиза. Опыты по разделению ионов различных изотопов ртути по подвижностям при электролизе привели к столь неожиданному результату, что он получил даже специальное название — эффект Гафнера: легкие изотопы ртути накапливались на аноде! Между тем многочисленные исследования по разделению изотопов на электролитах и расплавленных солях всегда приводили к однозначному результату — более легкие ионы изотопов обладают большей подвижностью, чем тяжелые, и всегда накапливаются в катодной части прибора для разделения изотопов. Итак, следовало предположить: либо в металлах существует совершенно особый механизм разделения ионов изотопов, либо неправильны все теоретические представления о механизме движения ионов в металлах.

Аномальный эффект разделения ионов изотопов в жидких металлах сыграл роль «катализатора» в создании правильной микроскопической теории ионной подвижности. Она была построена одним из авто-

ров статьи (В. Б. Фиксом) в 1957—1959 гг. Затем к аналогичным результатам пришли американский физик Х. Б. Хантингтон, французские физики К. Бовье и Ж. Фридель и другие теоретики. С 1958—1962 гг. начался новый этап экспериментальных работ, основанных на строгой теории.

Что же происходит с ионами в металле, по которому протекает электрический ток, от чего зависит характер их движения? Чтобы разобраться в этом, надо прежде всего определить силы, действующие на ион. Заметим, что агрегатное состояние металла (жидкий он или твердый) при этом не так важно. Важно другое — что речь идет о металлах — проводниках, а не о диэлектриках. Более того, все рассмотрение удобнее вести именно на примере твердого металла.

### ЭЛЕКТРОННЫЙ ВЕТЕР

На ион в металле, конечно, действует сила со стороны внешнего поля, равная произведению напряженности поля  $E$  на заряд иона  $Z|e|$ . Но это не единственная сила (как было бы в случае диэлектрика). С ионами кристаллической решетки металла сталкиваются электроны проводимости, которые отдают им часть импульса. Таким образом, ионы находятся под воздействием «электронного ветра». Как определить его силу? Естественно, по закону Ньютона, согласно которому сила равна изменению импульса тела в единицу времени.

Рассмотрим электронный ветер в рамках простейшей и исторически первой теории электропроводности металлов — теории Друде — Лоренца. Согласно этой теории, электроны представляют собой газ отрицательно заряженных частиц, удерживаемый в металле полем положительных ионов. От одного столкновения с решеткой до другого электроны перемещаются свободно. Путь свободного движения электронов называют длиной свободного пробега (мы обозначим ее  $L$ ). В отсутствие внешнего поля движение электронов носит хаотический характер. При наложении внешнего поля на этот хаос накладывается упорядоченное движение. Оно и обуславливает электрический ток. За время между столкновениями  $t=L/\bar{v}$  ( $\bar{v}$  — средняя скорость хаотического движения электронов) электрон приобретает от электрического поля импульс  $eEt$ . По металлу течет постоянный ток, значит, в среднем электроны не ускоряются, а полученный от поля импульс теряют при столкновениях с нерегулярностями решетки. Баланс потерь и приобре-

<sup>1</sup> Еще один исследователь (К. Е. Шварц) предложил в 1933 г. свою (правда, неверную) формулу для подвижности ионов. Его заслуга в том, что он ясно понимал: теория должна учитывать взаимодействие ионов с электронами.

тений приводит к следующему выражению для средней скорости упорядоченного движения:

$$\delta v = eEt / m_0,$$

где  $m_0$  — масса электрона<sup>5</sup>.

Итак, в единичном столкновении электрон передает решетке, и в частности примесному иону, импульс  $eEt$ . Но за одну секунду с ионом сталкивается не один электрон, а некоторое их число  $v_{ei} = n\bar{v}\sigma_{ei}$ . В этой формуле  $n$  — концентрация электронов проводимости, а  $\sigma_{ei}$  — сечение рассеяния электронов ионом (его можно представить себе как «площадь» иона, перпендикулярную потоку падающих на него электронов). Следовательно, сила  $F_{ze}$ , с которой электронный ветер «давит» на ион, равна —  $|e|nL\sigma_{ei}$ .

Электронный ветер стремится переместить ионы в направлении упорядоченного движения электронов, т. е. против поля. Величину  $nL\sigma_{ei}$ , стоящую множителем при  $|e|E$ , естественно назвать зарядом увлечения ионов электронами (электронным ветром!) и обозначить  $Z_{ze}$ .

Оценим величину этого заряда. Концентрация электронов проводимости в металлах  $n \approx (2 \div 4) \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$ , длина свободного пробега при комнатных температурах  $L \approx 10^{-6} \text{ см}$ , сечение рассеяния на примесном ионе  $\sigma_{ei} \approx 10^{-16} \div 10^{-15} \text{ см}^2$ . Тогда  $Z_{ze} \approx 4 \div 801$ .

Итак, мы пришли к основному выводу теории: кроме электростатической силы  $Z|e|E$  на ион в металле действует сила электронного ветра, которая может быть сравнима или даже существенно превышать электростатическую силу. Результирующая сила  $F_i$ , определяющая направленное движение ионов, представляет собой разность этих сил:

$$F_i = (Z_i - Z_{ze})|e|E.$$

Но определяют ли сила  $F_i$  скорость ионов? Ведь в твердых телах и жидкостях атомы (или, вернее, ионы) связаны силами, намного превосходящими  $F_i$ , так что она не может непосредственно вызвать перемещения ионов. Но роль этой силы велика: как мы увидим, она изменяет вероятность перехода иона из одного равновесного положения в другое. Механизм подвижности

ионов мы рассмотрим в следующем разделе. А сейчас внесем некоторые дополнения в изложенное выше — уточним то, что мы упростили.

Истинное состояние электронов проводимости в реальных металлах намного сложнее, чем в модели Друде — Лоренца. Прежде всего реальные электроны проводимости сильно взаимодействуют с ионным остовом и далеко не всегда могут рассматриваться как свободные. Кроме того, из-за принципа Паули на одном энергетическом уровне могут находиться не более двух электронов (с разными проекциями спина). Следовательно, на шкале энергий каждая последующая пара в системе электронов занимает очередной более высокий уровень. Поэтому даже при абсолютном нуле температур электроны не неподвижны, а заполняют все энергетические состояния от 0 до некоторой максимальной энергии  $\epsilon_F$  — энергии Ферми. Тепловое движение «забрасывает» небольшую часть электронов на свободные уровни, лежащие выше уровня Ферми, освобождая часть лежащих ниже энергетических состояний. В процессах рассеяния и других кинетических явлениях возможны лишь переходы электронов из занятых состояний в свободные.

Строгое рассмотрение такой системы частиц, взаимно отталкивающихся между собой и сильно притягивающихся к ионам, было бы практически невозможным, если бы не одно счастливое обстоятельство. Оказалось, что описание системы взаимодействующих частиц можно заменить описанием системы невзаимодействующих, свободных квазичастиц, обладающих зарядом электрона, но другими законами движения. При этом импульс электрона  $\vec{p}$  должен быть заменен квазиимпульсом  $\hbar\vec{k}$ , где  $\hbar$  — постоянная Планка,  $\vec{k}$  — волновой вектор электронной волны де Бройля.

Квазиимпульс очень похож на обычный импульс. Так, изменение квазиимпульса в единицу времени, как и изменение импульса, равно действующей на электрон силе. Только теперь это не полная сила, а только «внешняя» (без учета периодической силы, действующей со стороны ионов кристаллической решетки). Энергия квазичастицы зависит от квазиимпульса, но зависимость эта описывается не простой формулой  $\hbar^2 k^2 / 2m$ , как у обычной частицы, а сложной периодической функцией, точнее набором периодических функций  $\epsilon_s(\hbar\vec{k})$ ,  $s=1, 2, 3, \dots$  Индекс  $s$  называют номером зоны. Основное отличие металла от диэлектрика в том, что в металле есть

<sup>5</sup> Отметим: последняя формула связывает подвижность электрона с его временем свободного пробега ( $\mu = e\tau / m_0$ ).

зоны, частично заполненные электронами, — зоны проводимости.

Если учесть все эти свойства электронов-квазичастиц, то выражение для силы электронного ветра окажется весьма сложным. Но когда поверхность Ферми близка к сфере<sup>6</sup>, оно по виду совпадает с выписанным выше:

$$F_{z\alpha} = -Z_{z\alpha} |e| E, \quad Z_{z\alpha} = |e| n L \sigma_{\alpha i}$$

Отличие лишь в том, что теперь в  $Z_{z\alpha}$  входят длина свободного пробега и сечение рассеяния электронов, обладающих энергией Ферми. Это естественно, ибо, как отмечалось, только электроны с энергией, близкой к энергии Ферми, могут участвовать в процессах рассеяния<sup>7</sup>.

Один из важных выводов зонной теории гласит: если зона почти заполнена электронами, то в переносе заряда принимают участие не электроны, а пустые места в зоне. Их так и называют «дырками». Дырка — это квазичастица с зарядом, противоположным заряду электрона. Но это значит, что электроны почти заполненной зоны увлекают ионы не к аноду, а к катоду. Это на первый взгляд парадоксальное утверждение имеет строгое теоретическое обоснование.

\* Таким образом, в металле и с электронной, и с дырочной зонами проводимости результирующая сила электронного ветра имеет следующий вид:

$$F_{z\alpha} = (-n_e L_e \sigma_{ei} + n_h L_h \sigma_{hi}) |e| E,$$

где индекс  $e$  относится к электронам, а  $h$  — к дыркам.

Чтобы окончательно определить силу, приводящую ионы в движение, рассмотрим кратко механизм диффузии и подвижности ионов в конденсированных средах.

## МЕХАНИЗМ ДИФфуЗИИ И ПОДВИЖНОСТИ

Микроскопическая теория диффузии и подвижности атомных частиц в кристаллах и других конденсированных телах (аморфных и жидких) была разработана Я. И. Френкелем в 1926 г. Вот ее сжатое изложение.

Обычный «нормальный» атом или ион, находящийся в тепловом равновесии с соседями, испытывает малые колебания относительно своего положения равновесия и участвует в коллективных колебаниях. Взаимодействие каждого атома с соседями образует энергетическую потенциальную яму, в минимуме которой он и колеблется. Такая «оседлая», по выражению Френкеля, жизнь атома может длиться чрезвычайно долго, но в конечном счете за некоторое время  $t_i$  атом случайным образом накапливает кинетическую энергию, равную или превышающую высоту потенциального барьера, разделяющего два возможных равновесных состояния атома, и атом переходит в одно из соседних положений равновесия.

А. Эйнштейн, анализируя случайные блуждания произвольной частицы, получил общее выражение для коэффициента диффузии  $D = \bar{x}^2 / 6t_i$ , где  $\bar{x}^2$  — среднее квадратичное смещение («скачок») частицы, а  $t_i$  — среднее время между двумя скачками. Величина, обратная  $t_i$ , определяет вероятность  $W_i$  скачка в единицу времени. В приложении к тепловой диффузии атома в кристалле  $D = a^2 / 6t_i$ , так как длина «скачка» равна постоянной решетки  $a$ . Из общих законов статистической физики следует, что вероятность «скачка» пропорциональна больтцмановской экспоненте:  $W_i = C e^{-U_0/kT}$  ( $U_0$  — высота потенциального барьера, который должен преодолеть атом; множитель  $C$  зависит от числа попыток, которые атом делает, и пропорционален характерной частоте колебания атома  $\omega_0$ ).

Акт элементарного скачка, как правило, — весьма сложный процесс. Флуктуации теплового движения должны «собраться» на одном атоме и «поднять» его из потенциальной ямы на вершину потенциального барьера. Соседние атомы должны сместиться. В этом состоянии, на вершине барьера, атом в течение короткого времени  $\Delta t_i$  по существу является свободным. Время  $\Delta t_i$  примерно равно  $a/\bar{v}_i$ , где  $\bar{v}_i$  — средняя скорость атома на вершине барьера. Учитывая сложный акт тепловой флуктуации, такой атом обычно называют

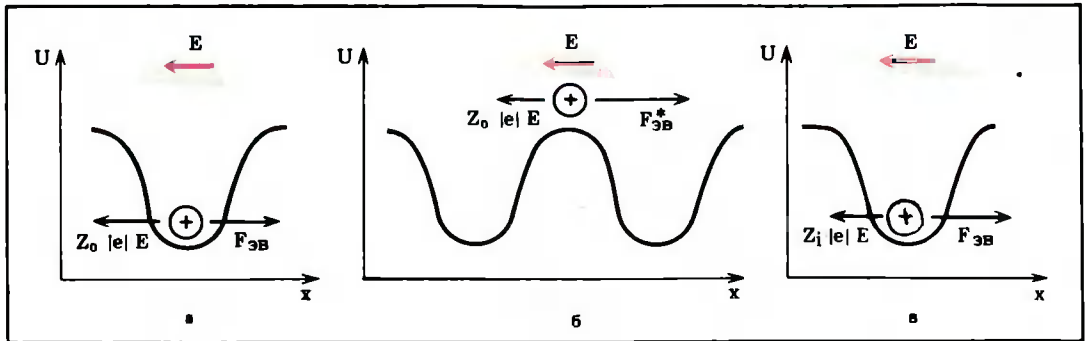
<sup>6</sup> Поверхность Ферми отделяет занятые электронами состояния от свободных в пространстве квазиимпульсов. Сферические поверхности Ферми — у щелочных металлов (натрия, калия и др.). При описании свойств металлов иногда можно не учитывать сложный (анизотропный, многосвязный) вид реальной поверхности Ферми. В частности, при описании многих свойств поликристаллического металла можно исходить из упрощенного представления, считая, что поверхность Ферми такого металла — сфера. Подробнее см.: Каганов М. И. Электроны на поверхности Ферми // Природа, 1981. № 8. С. 20—31.

<sup>7</sup> Для металлов со сложными поверхностями Ферми выражение для силы электронного ветра значительно сложнее, но физический механизм явления тот же.

«активированным», чтобы отличить его от «нормального» атома, испытывающего малые колебания вокруг положения равновесия. Сразу же отметим, пояснив это подробнее ниже, что активированный атом рассеивает электроны сильнее, чем нормальный. Это обстоятельство представляется почти очевидным, ведь рассеяние электронных волн в кристалле происходит только за счет отклонений атомов от положения равновесия — идеальная решетка, состоящая из строго упорядоченных атомов, не рассеивает электронные волны совсем.

див, однако, сечения звездочкой и помня, что в общем случае  $F_{эв}^* \neq F_{эв}$ , так как  $\sigma_{ei}^* \neq \sigma_{ei}$ ,  $\sigma_{hi}^* \neq \sigma_{hi}$ .

Теперь можно рассмотреть подвижность атомов или ионов, т. е. их направленный дрейф, возникающий, когда на атом действует внешняя сила  $F_i$ . Эта сила практически не изменяется на расстояниях порядка  $a$  и даже много больших  $a$ . Поэтому потенциальную энергию атома в поле этой силы и поле сил, обязанных окружению, можно записать в виде  $U_E = U_0 - F_i x$  где  $F_i$  — внешняя сила, а  $x$  — координата атома.



Ион в потенциальном поле  $U$  атомов кристаллической решетки, находящейся во внешнем электрическом поле  $E$ . Эффективная сила, действующая на ион в металле, представляет собой векторную сумму электростатической силы  $Z_0|e|E$  и силы электронного ветра  $F_{эв}$ . Действуя на собственный ион металла с зарядом  $Z_0$ , находящийся в состоянии равновесия на дне потенциальной ямы [а], сила электронного ветра строго компенсирует электростатическую силу:  $-nL\sigma_{ei}|e|E + Z_0|e|E = 0$  ( $n$  — плотность электронов проводимости металла,  $L$  — их средняя длина свободного пробега,  $\sigma_{ei}$  — эффективное сечение рассеяния электрона на ионе). Поскольку эффективное сечение рассеяния на активированном ионе  $\sigma_{ei}^*$  [б], как правило, больше, чем на обычном ионе металла, находящемся в потенциальной яме,  $nL\sigma_{ei}^* \times |e|E > Z_0|e|E$ , и ионы движутся туда, куда их «гонят» электроны. Что же касается примесного иона с зарядом  $Z_i$  [в], то в этом случае  $nL\sigma_{ei}^*|e|E \neq Z_i|e|E$ , так как сечение рассеяния на ионе примеси отличается от сечения рассеяния на собственном ионе металла в состоянии равновесия.

Внешняя сила изменяет величину барьера: потенциальный барьер в направлении силы  $F_i$  понижается на величину  $F_i a / 2$ , а в противоположном направлении повышается на такую же величину. Заметим, что в металлах во всех реальных внешних полях не только  $F_i a \ll U_0$ , но и  $F_i a \ll kT$ , хотя, как правило,  $kT \ll U_0$ . Понижение барьера с одной стороны и повышение с противоположной, естественно, приводит к преимущественному перемещению атома (иона) по направлению силы. Именно это и вызывает дрейф (упорядоченное движение) ионов в направлении действующей силы. Дрейфовую скорость  $v_i$  легко подсчитать как разность смещений за  $t$  с вдоль силы и против этого направления. Учитывая неравенство  $F_i a \ll \ll kT$  и то, что множитель перед  $F_i$  в выражении для скорости дрейфа, согласно соотношению Эйнштейна, равен коэффициенту диффузии  $D$ , деленному на  $kT$ , имеем

$$v_i = \frac{D}{kT} F_i.$$

Это один из парадоксальных выводов квантовой электронной теории. Активированный же атом отклоняется на максимально возможное расстояние от положения равновесия. Отметим сечения рассеяния на активированном атоме звездочкой ( $\sigma_{ei}^*$ ,  $\sigma_{hi}^*$ ).

Силу электронного ветра  $F_{эв}^*$ , действующего на активированный атом, следует записать так же, как и раньше, снаб-

Вместо силы, действующей на ион, надо подставить сумму электростатической силы  $Z|e|E$  и силы электронного ветра  $F_{эв}^*$ .

Таким путем получается основная формула теории — зависимость скорости

дрейфа ионов  $v_i$  от напряженности электрического поля  $E$ :

$$v_i = \frac{D}{kT} (Z_i - n_e L_e \sigma_{ei}^* + n_h L_h \sigma_{hi}^*) |e| E.$$

Подчеркнем, что ион свободен только в активированном состоянии — тогда, когда он находится на вершине потенциального барьера. В это время на него действует иная сила, нежели в потенциальной яме. Как мы увидим, это обстоятельство в некоторых случаях оказывается весьма важным.

Коэффициент при напряженности электрического поля в формуле для скорости дрейфа естественно назвать эффективной подвижностью ионов в металле  $u_{z\phi}$ , а выражение в скобках, полностью определяющее поведение иона в металле, — эффективным зарядом иона  $Z_{z\phi}$ .

#### НАПРАВЛЕНИЕ ПЕРЕНОСА ПРИМЕСНЫХ ИОНОВ И ПРАВИЛО ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЕЙ

Теперь, вооруженные правильными представлениями, вернемся к движению примесных ионов в жидком металле, например ртути. В жидкости кристаллическая структура отсутствует и поверхность Ферми можно считать сферой. Кроме того, учтем, что в ртути нет дырок:  $p_h = 0$ . Тогда в выражении для эффективного заряда исчезает один член.

Взаимодействие атомов в жидкости значительно слабее, чем в твердом теле, и высота потенциальных барьеров, разделяющих равновесные состояния, значительно меньше, чем в твердых телах ( $U_0/kT \approx 3-4$ ). Поэтому движение частиц в жидкости можно представить себе как наложение перемещений нескольких типов: активационного, подобного тому, которое имеет место в твердых телах, но с малым временем оседлой жизни  $t_i$ ; безактивационного, когда частицы переходят в полости, образованные при смещении соседей, и вынужденного, когда частица перемещается в результате смещения соседей. Подобный характер движения ионов приводит к тому, что сечение рассеяния на активированном атоме практически не отличается от сечения рассеяния на «нормальном», т. е.  $\sigma_{ei}^* \approx \sigma_{ei}$ . Тогда заряд увлечения опять есть  $Z_{z\phi} = nL\sigma_{ei}$ , а длина пробега электрона  $L$ , входящая в выражение для  $Z_{z\phi}$ , определяется в основном рассеянием не на примесном ионе (их мало),

а на любом ионе металла-растворителя (с эффективным сечением рассеяния  $\sigma_0$ ). Если заряд иона металла обозначить  $Z_0$ , то эффективный заряд примесного иона можно представить в виде<sup>8</sup>

$$Z_{z\phi} = Z_i - Z_0 \frac{\sigma_{ei}}{\sigma_0}.$$

Рассмотрим теперь направление переноса примеси. Наиболее прост и физически нагляден случай, когда заряды примесных ионов и ионов металла-растворителя совпадают. Тогда

$$Z_{z\phi} = (1 - \frac{\sigma_{ei}}{\sigma_0}) Z_0.$$

Если примесный ион рассеивает электроны сильнее, чем ион металла-растворителя (так что  $\sigma_{ei}/\sigma_0 > 1$ ), он движется к аноду. Если же примесный ион рассеивает слабее ( $\sigma_{ei}/\sigma_0 < 1$ ), он движется к катоду.

Пусть теперь  $Z_i \neq Z_0$ . Обозначим через  $\rho$  удельное сопротивление основного металла, а через  $\Delta\rho$  — дополнительное удельное сопротивление, вносимое примесными ионами. Тогда, если  $\Delta\rho_i/C_i\rho < Z_i/Z_0$  ( $C_i$  — концентрация примесных ионов) перенос примеси идет к катоду; если же  $\Delta\rho_i/C_i\rho > Z_i/Z_0$  — к аноду. При  $\Delta\rho_i/C_i\rho = Z_i/Z_0$   $Z_{z\phi} = 0$ . Это — точка инверсии переноса, или точка нулевой подвижности.

Теперь ясно, почему выполняется правило электропроводностей, а почему оно нарушается. Во-первых, в общем случае  $\sigma_{ei}^* \neq \sigma_{ei}$ ; во-вторых, приведенная формула верна лишь для сферических поверхностей Ферми. Поэтому трудно ожидать, что правило электропроводностей будет выполняться в твердых металлах. Но для жидкой ртути эксперимент неплохо подтверждает эту простую формулу: расчетные значения точки инверсии близки к экспериментальным.

Когда в металле есть и электроны, и дырки, то направление переноса зависит от того, какой ветер сильнее — электронный или дырочный. Это утверждение соответствует опытным данным. В некоторых металлах (железе, кобальте и т. п.) в жидком состоянии наблюдается перенос примесных ионов к катоду, и в них преобладает дырочная проводимость. Электроперенос в жидких металлах подробно изучался в работах Д. К. Белашенко и других авторов.

<sup>8</sup>  $L = 1/\sigma_0 N_0$ ,  $N_0$  — число ионов металла-растворителя в  $1 \text{ см}^3$ ;  $Z_0 = p/N_0$  — последнее равенство — условие нейтральности металла.

**Эффективные заряды ионов в процессах электролиза**

Металл	Примесь	Температура, °С	$Z_{эфф}$	
			эксперимент	теория
<b>Увлечение электронами</b>				
Sn	Sb	400	-70 ± 20	-45
Ag	Cu	1200	-10 ± 2	-7,5
Al	Sb	850	-34 ± 15	-70
Sn	Cu	1100	-43 ± 20	-135
Au	Sb	1100	-140 ± 40	-210
<b>Увлечение дырками</b>				
Fe	C	1000	+9,6	—
Ni	Fe	1600	+15,6	—
Ni	Mn	1500	+66	—
<b>Самоперенос</b>				
Au	Au*	900	-10 ± 5	-16
Ag	Ag*	800	-22 ± 8	-16
Cu	Cu*	1000	-25	-10
Zn	Zn*	350	-4,5	-15
Pb	Pb*	250	-48 ± 16	-31

**«САМОПЕРЕНОС» ПРИ ЭЛЕКТРОЛИЗЕ ЧИСТЫХ МЕТАЛЛОВ**

При электролизе чистых однокомпонентных металлов тоже происходит перемещение ионов — «самоперенос» вещества металла, по которому течет ток. На первый взгляд, это кажется парадоксальным. Сила, действующая на нормальный ион металла, в среднем равна нулю. Это видно из формулы для  $Z_{эфф}$ , если поставить в нее значения  $Z_i = Z_0$  и  $\sigma_{oi} = \sigma_0$ , и соответствует тому, что нормальный собственный ион металла находится в равновесии. Но вспомним, как происходит элементарное перемещение. Ион выходит на вершину потенциального барьера, становится на короткое время (время активированного состояния) свободным, и только в этот момент внешняя сила может изменить вероятность его перемещения. Ион, вышедший на вершину потенциального барьера, максимально отклоняется от положения равновесия. Между тем эффективное сечение рассеяния электронов пропорционально среднему квадрату отклонения атома от положения равновесия  $\overline{x^2}$ . Для активированного атома  $x^2 \sim a^2/4$ , тогда как для нормального  $x^2 \ll a^2/4$ . (Чтобы подчеркнуть этот факт, мы отмечали сечения рассеяния на активированном ионе звездочкой.)

Таким образом, на собственный активированный атом действует сила  $F_{эв}^* > F_{эв}^0$ , а разность  $Z_0 |e| E - F_{эв}^*$  отлична от нуля. Для металлов, в которых электроны почти свободны, результирующая сила направлена к аноду.

По-видимому, впервые самоперенос на качественном уровне наблюдался в специальных экспериментах В. Зайта и Х. Веффера в 1954 г. Обширные количественные исследования самопереноса были выполнены П. П. Кузьменко с сотрудниками начиная с 1958 г. Самоперенос был исследован в серебре, золоте, свинце, кадмии, олове и других металлах. В этих же опытах были впервые измерены значения эффективных зарядов собственных ионов металлов. Так же подробно исследовали самоперенос зарубежные авторы (Х. Б. Хантингтон и др.).

Эксперименты по самопереносу — одно из наиболее убедительных подтверждений теории электронного ветра.

**ЭФФЕКТ ГАФНЕРА**

Пришло время объяснить аномалии в разделении изотопов металлов по подвижности при электролизе (эффект Гафнера). Напомним, что эффективная подвижность собственного иона металла определяется не только коэффициентом самодиффузии, но и эффективным зарядом



$Z_{эфф}$ . Изотопический эффект может возникнуть как за счет зависимости от массы коэффициента самодиффузии, так и эффективного заряда. В первом приближении зависимость  $Z_{эфф}$  от массы  $M$  иона можно пренебречь, ведь в выражение для  $Z_{эфф}$  входят электронные, а не ионные характеристики.

С другой стороны, коэффициент диффузии  $D$  несомненно зависит от массы иона — от нее зависит частота колебаний иона  $\omega_0$ , определяющая число «попыток» перескочить потенциальный барьер. Частота  $\omega_0$  обратно пропорциональна корню квадратному из массы, а разность частот  $\Delta\omega_0$ , соответствующая разности масс  $\Delta M$ , равна  $-1/2 (\Delta M/M)\omega_0$ . Знак «минус» показывает, что у изотопов с меньшей массой частота больше. Легкие изотопы обладают большей частотой колебаний и, следовательно, большей подвижностью.

Таким образом, разность подвижностей ионов, различающихся по массе на величину  $\Delta M$ , может быть

$$\Delta u_{эфф} = -\frac{1}{2} |e| \frac{\Delta M}{M} \cdot \frac{D}{kT} Z_{эфф}.$$

Но эффективный заряд отрицателен — в силу того, что  $\sigma_0^+ > \sigma_0^-$ . Поэтому более подвижные легкие изотопы будут с большей скоростью двигаться к аноду, накапливаясь в анодной части прибора для разделения изотопов. Парадокс изотопического эффекта разрешается удивительно просто: легкий и тяжелый изотопы движутся не туда, куда им положено из-за отрицательного эффективного заряда. В жидких металлах положение несколько иное, поскольку, как мы уже говорили, диффузионные процессы в них значительно сложнее. Если приближенно описать самодиффузию в жидкости как наложение пассивных, индуцированных перемещений и активированных скачков, то оказывается, что и количественно, с точностью до множителя порядка единицы, экспериментальные значения эффекта Гафнера согласуются с теорией.

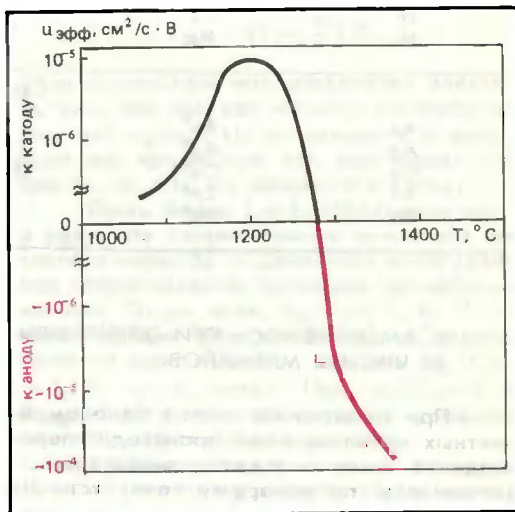
#### КРАТКО О ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Полупроводники отличаются от металлов, в первую очередь, меньшей концентрацией электронов проводимости:  $n \leq 10^{19} \text{ см}^{-3}$ . Правда, длина свободного пробега  $L$  может быть больше, чем в металлах, но все же произведение  $nL$  в полупроводниках на несколько порядков меньше, чем в металлах. Казалось бы, сила

электронного ветра в полупроводниках должна быть всегда меньше, чем электростатическая сила  $Z_i |e| E$ .

Однако в полупроводниках эффект увлечения ионов электронами наблюдается достаточно часто. Это связано с тем, что сечение рассеяния электронов примесными центрами в полупроводниках во много раз больше, чем в металлах. Во всяком случае в некоторых материалах (например, в кремнии) это именно так.

Роль электронов в полупроводнике проявляется в весьма специфической тем-



Температурная зависимость эффективной подвижности  $u_{эфф}$  ионов золота в кремнии. При температуре около  $1300^\circ \text{C}$  ионы золота изменяют направление своего движения. Причина этого — рост с увеличением температуры числа электронов проводимости  $n$  в кремнии. При низких температурах заряд увлечения электронным ветром  $Z_{эфф} = nL\sigma_{ei}$  мал — меньше заряда иона золота  $Z_i$ , эффективный заряд ионов золота  $Z_{эфф}$  положителен и ионы движутся к катоду; при высоких температурах  $nL\sigma_{ei} > Z_i$ , эффективный заряд отрицателен и ионы золота ведут себя как анионы.

пературной зависимости подвижности ионов. Пока  $nL\sigma_{ei} \ll 1$  подвижность иона с увеличением температуры растет экспоненциально за счет экспоненциального роста коэффициента диффузии  $D$ . Однако по мере повышения температуры растет и величина  $nL\sigma_{ei}$ , приближаясь к  $Z_i$ . Эффективная подвижность  $u_{эфф}$  проходит через максимум, а при  $nL\sigma_{ei} = Z_i$  обращает-

ся в ноль — происходит инверсия направления движения ионов: из-за преобладания силы электронного ветра над электростатической силой положительные ионы начинают двигаться к аноду. Инверсия подвижности в полупроводниках была предсказана теоретически одним из авторов этой статьи (В. Б. Фиксом) и экспериментально обнаружена Б. И. Болтаксом, Г. Е. Куликовым и Р. Ш. Малковичем.

### ЭЛЕКТРОЛИЗ В МЕТАЛЛАХ «РАБОТАЕТ»

Изучение электролиза в металлах не просто расширяет наши знания о металлах, но имеет и прикладное значение. С помощью электролиза можно очищать металлы от примесей<sup>9</sup>. Таким путем группе исследователей (под руководством Н. Н. Михайлова) удалось получить в полупромышленных масштабах наиболее чистый галлий. Очищенный индий получил С. И. Дракин. Металлофизики из ФРГ сообщают об успешной очистке от примесей переходных металлов. Оказалось, что процесс электролиза металлов существен для долговечности, надежности и стабильности ряда электронных и микроэлектронных устройств. Разрушение контактов токами большой плотности ( $10^5$ — $10^6$  А/см<sup>2</sup>) приводило к заметному снижению срока службы микроэлектронных схем. Изучение некоторых особенностей электролиза позволило американским физикам заметно удлинить срок службы таких схем.

Весьма эффективно проявляется электроперенос в технологии получения пленок путем нанесения жидких металлов на подложку под воздействием тока (электрожидкостная эпитаксия). Управляя процессом формирования тонких слоев с помощью электрического тока (электронного ветра), удалось создать оригинальные полупроводниковые структуры (Л. В. Голубев, Ю. В. Шмарцев и др.). Элементы, работающие в режиме электронной эмиссии при длительном пропускании тока, за счет электропереноса изменяют свои параметры (например, работу выхода) — происходит перестройка структуры поверхности. Это обстоятельство должно учитываться при конструировании приборов. Нет сомнения, что область технологического использования различных проявлений

электропереноса в металлах будет постоянно расширяться. Полное решение проблем надежности и долговечности приборов невозможно без учета движения ионов в металлах под действием электрического тока.

\*

Электролиз в металлах, открытый более ста лет тому назад, лишь в последние два десятилетия получил законченную (в главных чертах) теорию. Парадоксы этого интереснейшего явления оказались разгаданными. В 1957 г. теория электролиза была построена в рамках приближения свободных электронов, сейчас она находится на уровне современной квантовой теории металлов. Загадки электролиза и успехи теории привлекли большое внимание исследователей. Многие десятки диссертаций и примерно тысяча опубликованных работ появились в этой области. Эти «академические» работы уже окупались техническими приложениями электропереноса. Но главным успехом следует считать открытие и глубокое изучение явления электронного ветра. Процессы, обусловленные электронным ветром, не ограничены электропереносом. Они интересны для физики металлов в целом. Но это уже другая и весьма обширная тема — электронный ветер в металлах.

<sup>9</sup> Впервые это было показано в работах Б. П. Константинова, В. Б. Фикса, Е. А. Каймакова, Е. А. Бакулина, Е. В. Степина.

## Из Центральной Азии — в степи Нижней Волги

У. Э. Эрднев,  
доктор исторических наук

г. Элиста

В западной части Прикаспийской низменности расположена Калмыцкая АССР — республика с развитым тонкорунным овцеводством, мясомолочным животноводством и орошаемым земледелием. Есть здесь и своя промышленность по переработке сельскохозяйственного сырья, семь средних специальных учебных заведений, своя научная и художественная интеллигенция; в столице — г. Элисте — открыт университет на 4,5 тыс. студентов.

Недавно калмыки, последние переселенцы из Азии в Европу, отметили 375-летие со времени добровольного вхождения в состав России.

Но кто же такие калмыки? Их ранняя этническая история не вполне ясна. Некоторые исследователи считают, что на восточной периферии распространения ностратических языков некогда существовала алтайская этноязыковая общность<sup>1</sup>, распавшаяся затем на три группы племен: тюркскую, монгольскую и тунгусо-маньчжурскую. Монголоязычные племена, от которых происходят современные калмыки, вели кочевой образ жизни и широко расселились по Центральной Азии и по некоторым смежным регионам.

К. Маркс писал: «Чтобы продолжать быть варварами, последние должны были оставаться немногочисленными. То были племена, занимавшиеся скотоводством, охотой и войной, и их способ производства требовал обширного пространства

для каждого отдельного члена племени... Рост численности у этих племен приводил к тому, что они сокращали друг другу территорию, необходимую для производства. Поэтому избыточное население было вынуждено совершать те полные опасности великие переселения, которые положили начало образованию народов древней и современной Европы»<sup>2</sup>.

Это высказывание К. Маркса можно отнести и к скотоводческим племенам Центральной Азии, которые, часто попадая в зависимость от хунну, сяньби, тюрков, уйгуров, киданей, начали передвигаться в поисках пастбищ в районы Забайкалья.

Когда это началось, сказать трудно. На территории Читинской области найдены относящиеся ко II—VII вв. археологические памятники Бурхотуйской культуры, оставленные кочевниками-скотоводами. Они являются промежуточным звеном между памятниками хунну и тюрков<sup>3</sup>. А. П. Окладников раскопал могильник в местности Хабсагай, близ устья р. Манзурки, около улуса Сэгэнут, в котором обнаружил типичные для Бурхотуйской культуры вещи: кости скота и предметы конской сбруи<sup>4</sup>. В Ленских писаницах А. П. Окладников и В. Д. Запорожская нашли изображение группы древних кочевников: всадник на лошади гонит впер-

еди табора животное, по-видимому, лошадь, символизирующую табун, за ним скачет другой всадник. Позади всадников длинной цепью растянута пать кибиток, поставленных на повозки и запряженных волами<sup>5</sup>. Аналогичные изображения обнаружил П. П. Хороших среди писаниц на горе Манхай II неподалеку от с. Усть-Орда в Кудинской степи<sup>6</sup>. Эти памятники, датируемые XI—XII вв., по мнению упомянутых исследователей, могли быть оставлены первыми монголо-кочевниками, вероятно, даже северными монголами.

В XII—XIII вв. на территории современной Бурятской АССР обитали многие монгольские племена. Ойратские племена, предки калмыцкого народа, освоили бассейн Восьмиречья. В этих же местах жили бургуты, кори и тушасы, булагачины, кэрэмучины, татары. Северные монголы соседствовали с предками якутов, которые сперва жили в Прибайкалье, а затем ушли на север, на территорию современной Якутской АССР. Стоит отметить, что в современной Калмыкии есть значительная этническая группа, называющаяся сохад. Якуты же зовут себя саха.

Передвигаясь на юго-запад, в верховья Енисея, предки калмыков — ойраты — вступили в тесное общение с предками тувинского народа, что также оставило свой след: в составе калмыцкого общества есть этническая группа цаатани (цаа — северный олень), связанная своим происхождением с тувинскими племенами. Имеется среди калмыков и группа бурут, бур-

<sup>2</sup> Маркс К., Энгельс Ф. Соч. 2-е изд. Т. 8. С. 568.

<sup>3</sup> Окладников А. П. Бурхотуйская культура железного века в Юго-Западном Забайкалье // Тр. Бурятского комплексного н.-и. ин-та. Вып. 3. Сер. востоковедческая. Улан-Удэ. 1960. С. 16—30.

<sup>4</sup> Окладников А. П. Археологические данные о появлении первых монголов в Прибайкалье // Филология и история монгольских народов. М., 1958. С. 200—212.

<sup>5</sup> Окладников А. П., Запорожская В. Д. Ленские писаницы. М.; Л., 1959. С. 136—137.

<sup>6</sup> Хороших П. П. Наскальные рисунки на горе Манхай II // Краткие сообщ. ин-та истории материальной культуры. Вып. XXXVI. М., 1954. С. 191—195.

<sup>1</sup> Бромлей Ю. В., Пучков Ю. В. Этнические общности: их историко-типологическая и этнолингвистическая классификация // Природа. 1983. № 9. С. 83—84.

гуд, каковым именем они называли киргизов. Включение киргизских этнических элементов объясняется тем, что в верховьях Енисея предки калмыков соседствовали и с предками современных киргизов. Между ними устанавливались тесные экономические и культурные связи, что нашло отражение в киргизском эпосе «Манас», где почти у всех главных героев среди ойратов есть либо родственники, либо друзья, либо противники.

В XV в., в период распада империи Чингисидов, правителем ойратов становится Тогонтайш, объединивший под своей властью не только Западную, но и Восточную Монголию. Его сын и преемник Эсен (1440—1455) разгромил китайские императорские войска, в 1449 г. взял в плен самого императора Китая Ин-Цзуня с огромными трофеями. По-видимому, на протяжении XV—XVI вв. в пределах Западной Монголии, Южного Алтая, северной части провинции Синьцзян и верховьев Иртыша постепенно складывается ойратская народность. На севере граница ойратской земли доходила до современной Семипалатинской области Казахской ССР.

В конце XVI в. положение раздробленной и ослабленной Западной Монголии, управляющей ойратскими феодалами, было тяжелым. С востока ойратов теснили халха-монголы, с юго-запада — монгольские группы, объединившиеся еще в XIV в. в феодальное государство Моголистан, с запада — казахи, ощущавшие острую нехватку пастбищ из-за постоянно возрастающего поголовья скота. В Западной Монголии скотоводческое хозяйство во многом зависело от стихийных сил природы. Земледелие было ойратам практически неизвестно. Отсутствовали сколько-нибудь значительные населенные пункты типа городов — центров ремесла и торговли, что тормозило образование внутреннего рынка и формирование устойчивых экономических связей между отдельными районами ойратской земли. Все попытки ойратов пробиться к рынкам Китая и Средней Азии заканчивались неудачей.

Поголовье скота увеличивалось с каждым годом, что

требовало новых пастбищ, расширение которых возможно только за счет соседей. К тому же не прекращалась межфеодалная борьба за власть. Ойратское общество, таким образом, вошло в полосу экономического и политического кризиса. В этих условиях часть ойратов решила перебраться на северо-запад, вниз по течению р. Иртыш (Эрцес), к границам России. Такая откочевка в малонаселенные земли была наилучшим выходом из кризиса; ойратам открывался доступ к рынкам Русского государства, где можно было сбывать скот, скотоводческие продукты и сырье, взамен из России поступали промышленные товары.

Продвижение к восточным границам России более 200 тыс. ойратов, которые были весьма дружелюбно настроены к Русскому государству, отвечало и экономическим и политическим интересам последнего. Внутреннее и международное положение России к началу XVII в. было сложным. В 1603 г. вспыхнуло крестьянское восстание под руководством Хлопкэ, охватившее многие уезды запада, центра и юга страны. Не нормализовалась обстановка в занятых русскими войсками Казанском и Астраханском Поволжье. Война в Сибири с Кучумом не закончилась, он был готов начать новые военные действия, пользуясь малейшим ухудшением положения России. Да и отношения с крымскими феодалами, Турцией, Польшей и Швецией оставляли желать лучшего.

Эта ситуация побуждала русское правительство принимать серьезные меры к укреплению своих восточных рубежей. Братьям Якову и Григорию Строгановым еще Иван IV повелел укрепиться на берегах Тобола, добывать «полезные руды», беспощадно торговать с соседними народами, в том числе с калмыками. А в грамоте от 30 марта 1607 г. тарскому воеводе С. И. Гагарину приказывалось «послать от себя в Колмаки» трех человек, «им говорити колмыцким князем и мурзам и всем лутчим улусным людям, чтоб колмыцкие князи и мурзы и всякие улусные люди были под нашуу царскою високою рукою неотступным, наш ясяк

с себя платить по вся годы безпереводно... платили на Тару мягкою или иною какою рухлядкою или лошадыми, а для договору прислали бы они к вам на Тару мурз лутчих сколько человек будет пригожи»<sup>7</sup>.

Переговоры с ойратами шли еще долго. В грамоте от 18 сентября 1607 г. сообщается: «И июня в 16 день приехали на Тару калмыцкий тайши Кугонай Тубиев, а с ним людей 20 человек. А в распросе вам Кугонай-тайша сказал, прислал его, Кугоная, калмыцкие люди тайши Баатырь да Изеней с товарищи нам, великому государю, бити челом, чтобы нам их пожаловати, воевати их не велети,<sup>8</sup> и велети им быть под вашею царскою рукою и кочевать на нашей земле вверх по Иртышу к соленым озерам, а до нам с них колмацких людей имети годно конями или верблюдю или коровами...»<sup>8</sup>. Тайши от имени 120 тыс. своих соплеменников (часть ойратов откочевала назад в Центральную Азию) просили принять калмыцкий народ в русское подданство.

В ответ из Москвы пришло разрешение: «А будет тайши лутчие люди похотят ехать к нам к Москве самим и оне б к нам ехали безо всякого опасения, а наше им царское жалованье дадут в дорогу корм и подводы от Тары до Москвы, и они наши царские очи на Москве сами увидят, а мы их пожалуем великим своим жалованьем»<sup>9</sup>.

После неоднократных переговоров в 1608 г. калмыцкие тайши прибыли в Москву, о чем в одном из документов начала XVII в. сообщалось: «В прошлом году приезжали к царю Василью (Шуйскому.— У.Э.) колмацкие татарове Баучина да Девлет, да Арлай да Кесенчак.

Февраля в 7 день. И наперед на приезде были в посольской палате у дьяка у Василя у Телепнева. И Василий их расспрашивал про их проезд.

Февраля ж в 14 день. А как оне были у царя Василя

<sup>7</sup> Материалы по истории русско-монгольских отношений 1607—1636. М., 1959. С. 21.

<sup>8</sup> Там же. С. 22.

<sup>9</sup> Там же. С. 34.

на дворе, и посланы по ним приставы их да толмач. И приехали оне наперед в Посольский приказ и дожидались государева выхода в посольской палате...

А как послам велено итти к государю, и послы шли к государю площадке да середнею лестницею на красное крыльцо. А шел с ними в приставах воротинец Афонасей Тургенев да толмачи. А как вошли к государю в палату, и явил их государь челом ударить посольской дьяку Василей Телепнев, а молил:

«Великий государь царь и великий князь Василей Иванович всеа Руссии самодержец и многих государств государь обладатель. Колматские орды больших князей Богатырь-тайша с товарищ послы Арлай с товарищи вашему царскому величеству челом ударили».

И государь пожаловал послов к руке. И послы, быв у государя у руки, били челом государю от тайшей о том же, о чем в Посольском приказе дьяку Василью на приезде говорили. И государь против челобитья их велел им сказать свое государево жалованье и ответ учинить дьяку Василью же»<sup>10</sup>.

Так, 14 февраля 1608 г. было официально оформлено добровольное вхождение калмыцкого народа в состав России. Это был переломный момент в его истории. Две культуры — оседлая русская, земледельческая, и калмыцкая скотоводческая — вступили в плодотворное сотрудничество.

Добровольное принятие калмыцким народом русского подданства имело огромное значение, хотя бы потому, что на смену внутрийратским усобицам пришел мир, поддерживаемый русским правительством. Калмыцкое хозяйство стало составной частью более развитой российской экономики. Открылся путь и для относительно самостоятельного развития. Фактически только в составе России калмыки приобрели национальную государственность в виде Калмыцкого ханства («Халымг тангчин»), расположенного в степях Нижней Волги и Предкавказья. В пределах этого ханства из разрозненных феодальных группировок, переселив-

шихся сюда в первой половине XVII в., сложилась в течение XVII — первой половины XVIII в. калмыцкая народность. В ее состав вошли потомки монгольских племен: чоносов (чинисов), кередов (керетов), меркетов, течюдов (тайчиудов, тайджиутов), а также ойратские группы багутов, батутов, цоросов, шарнутов, харнутов, зтов, замудов и т. д. В образовании калмыцкой народности приняли также участие тюркские, кавказские и славянские этнические группы, включившиеся в разное время в состав ойратов, но не оказавшие сколько-нибудь заметного влияния на их этнографические и антропологические особенности.

Но почему все же все эти многочисленные племена стали называться калмыками? Имя это они получили от своих соседей — тюрков. Оно означало «оставаться, сохраняться, оставаться на месте, оказываться позади». «Оставшимися» называли тех ойратов, кто остался жить в низовьях Волги. Постепенно этот этнимом стал самоназванием.

О том, какое влияние оказало вхождение калмыцкого народа в состав Русского государства, сказал в начале XIX в. академик И. И. Лепехин: «Они (калмыки. — У.Э.) занимают пустые степи, ни к какому обитанию негодные. В них мы имеем, кроме других военных служб, хороших и многочисленных оберегателей наших пределов от набегов киргиз-кайсаков и кубанцев. От скотоводства получаем наилучший убойный и рабочий скот, ибо калмыцкие волы крупнее и тяглее бывают черкасских, и калмыки всякого скота около одного Дмитриевска меняют ежегодно на несколько тысяч рублей. Большая мена лошадям бывает у них... великое множество ежегодно от них как готовых тулупов, так и мерлушек продается»<sup>11</sup>. На это же обращал внимание один из крупных русских правительственных чиновников в Калмыкии Н. А. Страхов: «Калмыцкий народ по преносимым хозяйственным пользам заслуживает внимание пра-

вительства, обращая миллионы десятин земли бесплодной и иссушенной солнцем в миллионные табуны и стада, пустую степь — в надежный и богатый конный и скотный двор для целой России»<sup>12</sup>.

С начала XVII в. калмыки принимали активное участие в борьбе России против турецких, крымских, кавказских и шведских феодалов за выход к берегам Балтийского, Черного, Азовского и Каспийского морей. Однако царизм начал проводить жесткую колониальную политику в отношении калмыцкого народа. Ответом на нее было массовое участие калмыков в русских крестьянских восстаниях Степана Разина и Емельяна Пугачева.

Экономическому развитию калмыцкой степи способствовало заселение ее русскими и украинскими крестьянами. Согласно указу царя от 1846 г., в целях безопасности почтового тракта Царицын — Ставрополь создаются почтовые станции, превратившиеся впоследствии в богатые русские села Уласта (Плодовитое), Тундуртово, Садовое, Кюрюк (Обильное), Якшаво (Кеселево), Амтя (Заветное), Джурак (Ремонтное) и Амтя-Нур (Приютное). А калмыки постепенно переходили к оседлости, земледелию, заготовке корма скоту.

В конце XIX — начале XX в. калмыки испытали сильное влияние русского революционно-демократического движения, о чем свидетельствуют бунт калмыков-учащихся астраханских учебных заведений, крестьянские выступления бедных калмыков Хошеутовского улуса, возникновение среди донских калмыков культурно-просветительной и демократической организации «Халымг тангчин туг» («Калмыцкое зямля»).

После Великой Октябрьской социалистической революции калмыки в рядах Красной Армии боролись на фронтах гражданской войны в сформированных двух кавалерийских полках. Отсюда, собственно, и начинается их новая история.

<sup>11</sup> Полное собрание ученых путешествен по России. Т. 4. СПб., 1822. С. 379.

<sup>12</sup> Страхов Н. А. Нынешнее состояние калмыцкого народа. СПб., 1818. С. 42.

## Не Архимед, а Паскаль!

### Уважаемая редакция!

В прошлом году в вашем журнале неоднократно публиковались статьи, например «Математическое моделирование климата» (1985, № 6), в которых речь шла о влиянии циркуляции воздушных масс в атмосфере на климат Земли. Однако природа циркуляции в статьях не рассматривалась. Не нашел я удовлетворительного ее объяснения и в другой доступной мне литературе. Не могли бы вы рассказать подробнее об этом явлении.

**А. Арутюнов**  
Москва

Один из самых распространенных видов движения — циркуляция, возникающая в жидкости или газе при неравномерном нагреве или охлаждении. Это и движение воздуха в атмосфере, и воды в океане, и стекломассы в ваннных печах, и бульона в кастрюле, и т. д. Перечень может быть очень длинным. Одним словом, это привычное, всем хорошо знакомое явление.

Между тем широко распространено неверное представление о его причине, или движущей силе: ошибочно полагают, что это архимедова (подъемная) сила нагретых, т. е. более легких частей жидкости или газа. Но такая сила, очевидно, направлена вертикально вверх. При циркуляции же движение происходит в четырех направлениях: сначала поток поднимается, затем перемещается в горизонтальном направ-

лении, опускается и наконец снова течет горизонтально, но в обратном направлении. Кроме того, циркуляция возникает и при нагреве сверху, когда более легким слоям жидкости подниматься некуда, иначе говоря, когда архимедова сила вообще отсутствует.

В действительности же циркуляция возникает из-за горизонтальных градиентов давления, подчиняющегося в жидкости или газе закону Паскаля, согласно которому давление передается во все стороны равномерно. Это частный случай процесса тепло- и массообмена в жидких и газообразных средах при неодинаковой температуре.

При теплообмене движущей силой является разность температур. В соответствии с основным законом термодинамики тепловой поток всегда движется в сторону меньших значений температуры и интенсивность теплообмена зависит от градиентов температуры.

Сложнее определить движущую силу массообмена. Конечно, и здесь первопричина движения — неизотермичность среды. Однако, как показывают непосредственные наблюдения, иногда вещество перемещается то в сторону меньших, то в сторону больших температур. Значит, при этом температура действует не непосредственно, а через другие факторы.

Различие плотностей среды вследствие неоднородности температурного поля также не может вызвать циркуляцию, порождая лишь архимедову силу  $A = g(\rho_2 - \rho_1)$  ( $g$  — ускорение силы тяжести,  $\rho_2$  и  $\rho_1$  — плотности нагретого и холодного вещества), направленную против силы тяжести и ни к какому горизон-

тальному перемещению, естественно, не приводящую.

Как же случилось, что силу Архимеда стали считать единственной причиной циркуляции?

Возможно, здесь сказывается психологический фактор. С детских лет все видят, как поднимается дым над костром или печной трубой, и слышат, что происходит это по закону Архимеда, поскольку теплый воздух легче окружающего холодного. После этого, рассматривая, например, циркуляцию воздуха в пассатах, мы невольно представляем себе, как над раскаленными пустынями нагретый воздух поднимается вверх подобно воздушному шару, а затем, охладившись, опускается вниз. Процесс циркуляции тогда кажется совсем простым.

К этому еще можно добавить, что закон Архимеда известен свыше 2200 лет и, значит, выдержал испытание временем. И мы, замороженные его простотой и величием, упускаем из виду сущий «пустяк», а именно: под действием каких сил подымающийся вверх воздух совершает путешествие в 3000 км, там устремляется вниз, в плотные слои атмосферы, и, наконец, возвращается обратно к экватору. И уж вовсе загадочно, как это в океане циркулирует Гольфстрим, когда там солнце греет сверху и, стало быть, никакой архимедовой силы нет и в помине...

Возможно, в действительности упомянутый психологический фактор далеко не единственный, но, как бы то ни было, закон Архимеда «мешает» правильно понять механизм некоторых грандиозных природных явлений, скажем, общей циркуляции в атмосфере и океане или движения материков.

Но если не архимедова,



то какая же другая сила и как вызывает циркуляцию?

Чтобы ответить на этот вопрос, достаточно представить себе обычную ванну, наполненную жидкостью (желательно вязкой, чтобы все процессы в ней протекали не слишком быстро). Уровень жидкости в ванне всюду одинаков, а давление на любой глубине  $z$  равно весу столба жидкости с одинаковым поперечным сечением:  $p_z = \rho g z$ . По закону Паскаля оно направлено во все стороны, но всюду скомпенсировано, так что жидкость находится в равновесии.

Начнем теперь подогревать один конец ванны, все равно как — снизу, сбоку или сверху. Важно, чтобы нагрев был постоянным и достаточно сильным. Жидкость нагреется, ее плотность уменьшится и станет равна  $\rho_2$ , а объем соответственно увеличится, иными словами жидкость станет расширяться. Но куда? Стенки и дно ванны твердые, остается свободная поверхность. Повышение уровня над прежним на величину  $h$  создает избыточное давление  $\rho g h$ , а на произвольной глубине  $z$  давление изменяется на  $\Delta p_z = g[\rho_2 h - (\rho_1 - \rho_2)z]$ . Поскольку  $\rho_2 < \rho_1$ , эта величина уменьшается с ростом  $z$  и у дна  $\Delta p_z = 0$ .

Но все происходит именно так, только если нет оттока жидкости из зоны нагрева. Избыточное же давление вызывает горизонтальный поток у поверхности жидкости из нагретой зоны в холодную. Но как только  $h$  уменьшается, у дна появляется избыточное давление уже со стороны холодной зоны и возникает нижний поток из холодной зоны в нагретую, который компенсирует отток жидкости из зоны нагрева с верхним потоком.

В установившемся режиме расходы верхнего и нижнего потоков равны. Процесс поддерживается разностью температур  $\Delta T$  между нагреваемой и холодной зонами. При постоянном значении  $\Delta T$  сохраняется неизменным и  $h$ .

Возвращаясь к изменению давления с глубиной, отметим, что при установившейся циркуляции уровень  $p_z = 0$  (называемый нейтральным) находится не у самого дна, а под-

нимается на некоторую высоту  $h_0$  из-за уменьшения веса столба нагретой жидкости, стекающей в сторону меньших температур. Выше  $h_0$  избыточное давление направлено к холодной, а ниже — к нагретой зоне.

Верхний поток горизонтален, пока существует горизонтальный градиент давления, а затем опускается и соединяется с нижним, замыкая цикл циркуляции (из-за непрерывности потока количества поднимающейся и опускающейся жидкости или газа равны между собой).

Итак, механизм циркуляции можно себе представить, например, так.

От внешнего источника тепла нагревается одна зона в жидкости или газе. Из-за расширения вещества уровень в этой зоне превышает средний и возникает избыточное давление, имеющее горизонтальную составляющую.

Избыточное давление порождает верхний горизонтальный поток. Этот поток снижает уровень и давление у дна (им может быть и поверхность Земли), появляется избыточное давление со стороны холодной зоны, вызывающее нижний возвратный поток.

Нижний поток восполняет расход верхнего, поддерживая определенное превышение  $h$  верхнего уровня в нагретой зоне, необходимое для продолжения процесса.

Если появляется препятствие для образования разности высот  $h$  верхнего уровня в разных зонах, например при циркуляции по трубам, необходимое избыточное давление создается за счет сопротивления этого препятствия расширению нагреваемой среды.

Как видно, механизм циркуляции несложен, но воспринимается с трудом. Со школьных лет мы усваиваем, что поверхность жидкости всегда строго горизонтальна, значит, никакого превышения уровня в нагретой зоне как будто нет. В подтверждение этого в школе иногда даже демонстрируют наглядный опыт с водой в пробирке, нагреваемой сверху так, что сверху она закипает, а у дна остается холодной; иными словами, при нагреве сверху ника-

кой циркуляции, вроде бы, не наблюдается, а следовательно, и в океанах, где вода нагревается солнцем сверху, циркуляции, похоже, взяты неоткуда. Так ошибочно следствия равномерного нагрева сверху переносят и на случай неравномерного нагрева, когда возникают горизонтальные градиенты давления.

Переходя к природным крупномасштабным примерам циркуляции, нельзя не отметить, что горизонтальные потоки в них несравненно длиннее вертикальных.

Мы видели, что первопричина циркуляции — разность температур по горизонтали. В атмосфере Земли это условие, очевидно, выполнено: у экватора всегда жарко, а чем ближе к полюсам, тем холоднее. Высота верхней границы тропосферы тоже различна: у экватора она равна 16—18 км, а в средних широтах — 10—12 км. Вызванные разностью высот избыточные паскалевы давления, в свою очередь, порождают верхние горизонтальные потоки — так называемые антипассаты, которые смещаются от экватора к полюсам, слегка отклоняясь к востоку из-за вращения Земли. Градиентов давления хватает на путь в 3000 км — до 30°-х — 40°-х широт, где потоки опускаются, создавая внизу избыточное давление, способствующее образованию антициклонов и сильных штормов. Неспроса эти широты называют «неустойчивыми и ревущими».

Внизу воздушные потоки движутся в обратном направлении. Это знаменитые пассаты, которые во времена парусных судов боготворили моряки.

Хорошо известны с давних пор и сезонные циркуляции — муссоны, суточные бризы и т. п., имеющие ту же природу.

В верхних разреженных частях атмосферы (в стратосфере и ионосфере) наблюдается слоистое строение и сильные ветры, иначе говоря, интенсивная многоярусная система циркуляций. Увеличение объема и повышение из-за диссоциации молекул верхней «границы» слоя (этот образ, конечно, весьма условен) там может происходить и за счет солнечной радиации. Правда, в сильно раз-

реженных газах многие явления выглядят своеобразно: даже при ураганном ветре шляпу с головы не сдует; температура хоть и высока, воду или пищу не согреть. Тем не менее, возможно, именно в верхних слоях атмосферы находится «кухня» погоды.

Похожие рассуждения применимы, по всей вероятности, при рассмотрении океанических течений. Пожалуй, самый яркий пример циркуляции морских вод — это Гольфстрим. Зона у него — в Мексиканском заливе. Горизонтальных градиентов паскалевых давлений ему «хватает» на длинный путь от тропиков до Заполярья. По пути он обогревает значительную часть Скандинавии и «не дает» замерзнуть Мурманскому порту. Похоже, несколько веков назад он отклонился от берегов Гренландии («зеленой земли»), и теперь ей

вспору поменяться названиями с Исландией, обогреваемой им сегодня. Гольфстрим и другие океанические течения поддерживают в глубине океана низкую температуру, несмотря на непрерывный нагрев (сверху — солнечными лучами и снизу — геотермальным теплом). Наличие глубинных потоков доказывает и разнообразный животный мир морских глубин, немислимый без кислорода, доставляемого туда с поверхности (слабая диффузия не смогла бы насытить кислородом воду на глубине). Обнаружены в океанах и места выхода на поверхность холодных возвратных потоков, и места, где, опускаясь, большие массы воды образуют крупные водовороты, в которые подчас попадали, исчезая бесследно, небольшие парусные суда, что давало повод для сочинения страшных морских легенд.

Не исключено, что эти

же представления можно использовать и в столь модной ныне теории глобальной тектоники, пытающейся объяснить дрейф континентов.

Эти примеры показывают, какой титанической мощью могут обладать циркуляционные потоки, в возникновении которых архимедова сила участвует отнюдь не всегда и оказывается лишь вспомогательной, порождая, в лучшем случае, один только восходящий поток.

Что же, видимо, иногда полезно, вопреки «очевидности» установившихся взглядов, лишний раз критически осмыслить, казалось бы, хорошо известные представления об окружающем нас мире.

**А. А. Соколов,**  
доктор технических наук,  
профессор  
Москва

## К ЧИТАТЕЛЯМ «ПРИРОДЫ»

Напоминаем, что в следующем месяце начинается подписка на 1987 год. Подписка на «Природу» не ограничена и принимается во всех отделениях связи на любой срок.

Подписная цена:

на год — 9 р. 60 к.

на полугодие — 4 р. 80 к.

на квартал — 2 р. 40 к.

Цена одного номера — 80 к.

Индекс 70707.

Обо всех случаях отказа в подписке просим сообщать в редакцию журнала по адресу: 117049, ГСП-1, Москва, Мароновский пер., 26.

## Космические исследования

## Пролет «Джотто» через комету Галлея

14 марта 1986 г. в 0 ч 11 мин<sup>1</sup> космический аппарат «Джотто» пролетел комету Галлея на расстоянии 605 км от ее ядра. В тот момент космический аппарат и комета были удалены от Земли на 144 млн км, их относительная скорость составляла 68 км/с. Связь с «Джотто» во время пролета осуществляли приемные станции в Парксе и близ Канберры (Австралия).

Чтобы провести «Джотто» на таком небольшом расстоянии от ядра, использовались данные траекторных измерений советских автоматических межпланетных станций «Вега-1» и «Вега-2» (проект «Лощман»)², а также японского космического аппарата «Планета А». 12 марта в 20 ч 30 мин была произведена последняя коррекция траектории «Джотто», с тем чтобы он пролетел на расчетном расстоянии 540 км от ядра.

За 2 с до пролета ядра связь с «Джотто» прекратилась. Предполагаемая причина — столкновение с крупной пылевой частицей и последующая дестабилизация космического аппарата; бортовая остронаправленная антенна «потеряла» Землю (антенна должна быть направлена на Землю с точностью  $\pm 1^\circ$ ); в результате перестала поступать информация от научных приборов, а также прекратилась

передача цветных изображений кометы. Через 25 мин прием сигналов с «Джотто» возобновился, но информация поступала со сбоями. Видимо, демпфирующее устройство в значительной степени погасило колебания космического аппарата, но полностью его стабилизировать не удалось. После возобновления связи информация принималась еще в течение 25 мин.

Сообщаются некоторые предварительные результаты исследований кометы Галлея космическим аппаратом «Джотто».

13 марта в 19 ч 40 мин приборы показали, что аппарат прошел через фронт ударной волны у кометы на расстоянии примерно 1,5 млн км от ядра; первые столкновения с пылевыми частицами зарегистрированы 13 марта в 22 ч 08 мин на расстоянии 250 тыс. км от ядра. До подхода «Джотто» близко к ядру столкновений с крупными частицами зарегистрировано не было, в последние 2 мин перед дестабилизацией аппарата число столкновений достигло 120 в секунду. Противопылевой экран был пробит не менее чем 100 частицами.

Ядро окружено облаком пыли. Информация о составе вещества в голове кометы требует длительного анализа. Предварительно указывается присутствие в коме водяного пара, азота, кислорода и углерода, а также ионов некоторых металлов (железа, меди, никеля). Согласно оценкам, комета Галлея теряет вещество со скоростью 60 т в секунду.

Обнаружена турбулентность магнитного поля вблизи кометы, что позволяет высказать предположение о магнитной активности кометы.

Из запланированных 3500 получено свыше 2000 снимков, которые делались с интервалом 4 с. Первые снимки получены с расстояния 730 тыс. км, последний — с расстояния около 1400 км (разрешение лучше 50 м). Анализ снимков показал,

что ядро кометы Галлея представляет собой однородное тело неправильной формы (гипотеза о двойном ядре не подтвердилась). Длина ядра составляет 11—15 км, поперечный размер 4—8 км. Его форма напоминает земляной орех, картофелину или банан. Цвет ядра оказался темнее, чем ожидали; предполагается, что это одно из самых темных тел Солнечной системы. По-видимому, темный цвет — результат того, что ядро покрыто пылью сравнительно высокой температуры. Под слоем пыли, очевидно, находится лед. На снимках видна граница между освещенной Солнцем и теневой сторонами ядра. На самом ядре различимы холмы и кратеры. Зарегистрированы струйные выбросы пыли (два больших и два малых) из ядра на освещенной стороне. Видимо, основная часть пыли из ядра выбрасывается именно в виде струй. Согласно предварительным данным, большинство пылевых частиц имеет массу менее  $10^{-6}$  г.

8 марта 1986 г. совершил пролет около кометы Галлея японский космический аппарат «Планета А»; минимальное расстояние от ядра составило около 150 тыс. км. В результате столкновения с двумя кометными частицами массой 2 и 3 мг ось вращения аппарата отклонилась на  $0,7^\circ$  от расчетного положения.

Interavia Air Letter. 1986. № 10959. P. 1; № 10960. P. 5—6 (Швейцария).

## Космические исследования

## Международные исследования ионосферы

С конца 1985 г. развернулись работы по международному проекту EISCAT (European Incoherent Scatter facility — Европейская система для изучения некогерентного рассеяния).

<sup>1</sup> Время указывается по Гринвичу и с учетом 8 мин — времени прохождения сигнала от аппарата до Земли.

<sup>2</sup> Подробнее об этом см.: Балебанов В. М., Мороз В. И. Космическая экспедиция «Вега»: встреча с кометой Галлея // Природа. 1986. № 5. С. 3—17.

Цель проекта — исследование ионосферы, ионизированного слоя земной атмосферы, расположенного на высотах свыше 70 км.

В работе участвуют геофизики, космофизики, геомагнитологи и астрономы Великобритании, Франции, ФРГ, Швеции, Финляндии и Норвегии. К наблюдениям привлечены объединенные в единую сеть радиолокационные установки, расположенные в трех скандинавских странах.

Эта сеть позволяет непрерывно измерять плотность, температуру, скорость ионосферных ионов и электронов на высотах от 70 до 500 км. Самое же главное, удастся определить, как эти параметры изменяются со временем; раньше подобное было невозможно даже при использовании искусственных спутников Земли и ракет.

Ультравысокочастотная сеть радиолокаторов работает на 16 различных частотах в диапазоне около 933,5 МГц. Сигнал пиковой мощности (до 2 МВт) излучается вращающейся параболической антенной диаметром 32 м, расположенной в Тромсё (северная Норвегия). Отраженный и рассеянный ионосферой сигнал принимается той же антенной и двумя такими же антеннами в Соданкюле (Финляндия) и Кируне (Швеция). Тем самым, система EISCAT может принимать сигналы, отраженные как на различных высотах, так и в географически разнесенных точках.

В Тромсё расположена еще одна радиолокационная система, работающая на 16 частотах в диапазоне 225 МГц. Сигнал пиковой мощности 2,5 МВт излучается параболической антенной площадью  $120 \times 40$  м, которая служит и приемным устройством. Антенна может механически перемещаться в плоскости меридиана, а ее луч — двигаться в направлении запад — восток.

Важно, что вся система EISCAT размещена в северной авроральной зоне, где активно развиваются многие специфические высокоширотные процессы: крупномасштабные атмосферные волны, яркие полярные сияния. Силовые линии магнитно-

го поля Земли в этих областях «открыты» и могут выходить в межпланетное пространство.

Установки системы EISCAT, кроме того, используются для наблюдений солнечного ветра и приема сигналов от квазаров. Сопоставление сигналов, наблюдаемых в Кируне и Соданкюле, позволяет измерять скорость солнечного ветра на расстояниях от 10 до 50 радиусов Солнца. Такие измерения послужат важным дополнением к информации, которая будет получена с европейско-американского спутника "Ulysses"; в 1988 г. этот спутник должен пересечь орбиту Юпитера и приступить к изучению Солнечной системы за пределами плоскости эклиптики.

Предполагается, что система EISCAT является важным звеном Международной программы по солнечно-земной физике, планируемой на начало 90-х годов. В ней примут участие специалисты из многих стран мира, в том числе СССР.

New Scientist. 1985. Vol. 109. №1405. P. 46—52 (Великобритания)

#### Астрофизика

### Две стадии вспышки сверхновой звезды

В настоящее время считается общепринятым, что спектры и кривые блеска сверхновых II типа можно объяснить взрывом массивной ( $M > 8 M_{\odot}$ ) звезды, имеющей протяженную оболочку; это так называемый красный сверхгигант. Подобное объяснение не зависит от механизма взрыва; требуется только, чтобы определенное количество энергии, около  $10^{51}$  эрг, переносилось ударной волной в звездную атмосферу, радиус которой примерно равен  $10^{14}$  см.

Недавно для двух сверхновых II типа SN 1983k в галактике NGC 4696 и SN 1984 в NGC 3169 были получены спектры высокого разрешения, в которых обнаружилась следующая особенность. На фоне обычно-

го континуума выделялись необычные узкие линии: у SN 1984 интенсивные эмиссионные бальмеровские линии водорода, а у SN 1983k, помимо набора узких эмиссионных линий, наблюдалась также система узких линий поглощения<sup>1</sup>.

Американские исследователи, получившие эти спектры, интерпретировали их как свидетельство сильного звездного ветра, распространяющегося из предсверхновой со скоростью до 3000 км/с.

Э. К. Грассберг и Д. К. Надежин (Институт теоретической и экспериментальной физики) выдвигают альтернативную гипотезу. Согласно ей, наблюдаемые особенности спектра можно объяснить, если предположить, что вспышка этих сверхновых представляет собой двустадийный процесс. Во время первой стадии из недра предсверхновой звезды выходит ударная волна, которая, распространяясь по веществу с уменьшающейся наружу плотностью, сбрасывает внешние слои и динамическим путем создает структуру сверхгиганта. Затем происходит второй взрыв, который генерирует ударную волну, теперь уже распространяющуюся в расширяющемся веществе. Второй взрыв и сопровождающая его ударная волна и приводят к наблюдаемому спектру.

Используя данные наблюдений, авторы оценили интервал между первым взрывом и началом второго; он составил 1—2 месяца. Первый взрыв, по мнению авторов, связан с резкой перестройкой внешних слоев предсверхновой в ходе гравитационного коллапса. В процессе коллапса излучается большое количество нейтрино (нейтринная вспышка) и выходящая ударная волна из-за существенных нейтринных потерь сильно ослабляется; при выходе на поверхность звезды она уже не способна сбросить звездную оболочку с энергией около  $10^{51}$  эрг. Второй взрыв может быть связан с медленной

<sup>1</sup> Nemela V. S. et al. // Astroph. J. 1985. Vol. 289. P. 52—60.

передачей энергии от молодой нейтронной звезды к расположенному снаружи от нее веществу.

Преимущество предлагаемой модели по сравнению с моделью звездного ветра связано с возможностью естественно объяснить большие скорости истечения вещества, так как весьма трудно получить плотный звездный ветер со скоростью 1000—3000 км/с.

С точки зрения теории звездной эволюции, новая модель представляет существенный интерес, так как в качестве предсверхновой II типа выдвигается компактная звезда. До сих пор основным кандидатом в предсверхновую II считался красный сверхгигант.

Письма в *Астрономический журнал*. 1986. Т. 12. № 2. С. 168—174.

#### Астрофизика

### Еще одна загадка $\gamma$ -всплесков

Группа исследователей из Лос-Аламосской национальной лаборатории (США) и Европейского космического агентства сообщила о регистрации мощного  $\gamma$ -всплеска с необычно быстрыми временными вариациями.

Вспышка, получившая обозначение GB 841215, была зарегистрирована 15 декабря 1984 г. тремя космическими станциями: «Пионер-Венера», «ICE» и «EXOSAT». На них установлены детекторы, измеряющие поток  $\gamma$ -излучения в диапазоне энергий 0,1—2,5 МэВ. Приборы специально предназначены для регистрации  $\gamma$ -всплесков: запись сигналов производится при превышении скорости счета выше определенного предела.

Вспышка GB 841215 длительностью всего около 0,3 с состояла из десяти острых всплесков, ширина которых не превышала 0,005 с. Столь быстрое изменение интенсивности по времени является рекордным для всех  $\gamma$ -всплесков, зарегист-

рированных за 12 лет с момента их открытия. Данная вспышка, однако, уступает по мощности вспышке GB 790305 (5 марта 1979 г.), и интенсивность ее составляет примерно  $2,5 \times 10^{-3}$  эрг/см<sup>2</sup>с.

Способ регистрации сигнала (его временное накопление) позволяет думать, что подобные быстрые вариации присущи почти всем  $\gamma$ -всплескам, просто их очень трудно обнаруживать из-за малых интенсивностей. Характерное время изменения, которое, согласно наблюдениям, составляет несколько миллисекунд, настолько мало на фоне громадных мощностей (порядка  $10^{39}$  эрг/с), что отвергает почти все известные механизмы  $\gamma$ -излучения.

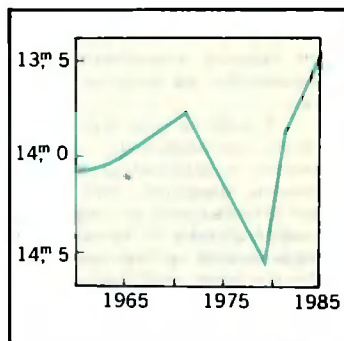
Поскольку регистрация  $\gamma$ -вспышки GB 841215 была проведена сразу тремя космическими аппаратами, это позволило методом триангуляции определить координаты источника излучения. Однако область на небе размером 33 квадратных угловых минуты, в которой должен находиться источник, не содержит каких-либо объектов, излучающих в различных диапазонах длин волн. Такими же невидимыми объектами являются почти все зарегистрированные источники  $\gamma$ -всплесков. Существует гипотеза, согласно которой источниками этих вспышек могут быть «старые» невращающиеся или медленно вращающиеся нейтронные звезды. Но до сих пор неясно, что собой представляют процессы, которые приводят к излучению гигантской энергии преимущественно в  $\gamma$ -диапазоне и с такими быстрыми временными изменениями.

*Nature*. 1985. Vol. 318. № 6045. P. 448 (Великобритания)

#### Астрономия

### Оптическая переменность ядра галактики M 33

Ядро спиральной галактики M 33 имеет ряд наблюдательных особенностей. Так, для него характерна высокая рентгеновская светимость  $1,1 \times$



Долговременная переменность ядра галактики M 33 в оптическом диапазоне (фильтр V).

$\times 10^{39}$  эрг/с. (Для сравнения: ядро нашей Галактики обладает меньшей светимостью в рентгеновском диапазоне —  $10^{35}$  эрг/с, а галактики M 31 —  $10^{36}$  эрг/с.) Кроме того, эта светимость сильно меняется, примерно в 2 раза за полгода. Но вот ни в оптическом, ни в радиодиапазонах подобной переменности ядра M 33 до сих пор не обнаруживалось.

С 1983 г. на 60-сантиметровом телескопе Крымской станции ГАИШа В. М. Лютый и А. С. Шаров начали фотозатрагиваемые наблюдения ядра галактики M 33. Как показали результаты наблюдений трех сезонов, ядро M 33 обладает оптической переменностью. Полная амплитуда изменения блеска составила: в фильтре V — 0,29, в фильтре B — 0,33, в фильтре U — 0,97 звездных величин. Максимальная амплитуда изменения блеска отмечается в фильтре U, как для сейфертовских галактик. Характерное время переменности составляет примерно 0,7 — 1 день.

Авторы провели сравнение с сейфертовской галактикой NGC 4051, которая обладает самой низкой светимостью среди объектов данного типа. Хотя светимость ядра NGC 4051 как в оптической, так и в рентгеновской областях на два порядка выше, чем у ядра M 33, характер переменности в оптическом диапазоне обоих ядер одинаков.

Использование наблюдательных данных, полученных другими исследователями, показало, что у ядра  $M 33$  существует и долговременная переменность.

Итак, ядро нормальной спиральной галактики оказалось переменным не только в рентгеновском, но и в оптическом диапазоне; при этом имеется аналогия с оптической переменностью ядер  $M 33$  и сейфертовской галактики NGC 4051, несмотря на существенное различие в их светимости.

Письма в Астрономический журнал. 1986. Т. 12. № 3. С. 187—193.

Физика

**Подтверждено существование квантовых аномалий**

В квантовой хромодинамике предсказывается существование приближенной «киральной» симметрии, связанной с фазовыми преобразованиями над лево- и правополяризованными компонентами полей легких кварков. Феноменологически такая симметрия была обнаружена еще до открытия кварков и выражалась в сохранении векторного тока и приближенном (частичном) сохранении аксиального тока в сильных взаимодействиях. Она проявлялась в изотопической инвариантности и в специальных ограничениях на амплитуды с участием  $\pi$ -мезонов с малым импульсом. (В квантовой механике вероятности процессов пропорциональны квадрату модуля комплексных чисел, называемых амплитудами.)

Но существовала трудность в описании распада  $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ , амплитуда которого из-за киральной симметрии должна быть почти на порядок меньше наблюдаемой на опыте.

Пытаясь разрешить это противоречие, С. Адлер (США) пришел к открытию специфического эффекта — аномалии в сохранении аксиального тока. Аномалия связана с рождением

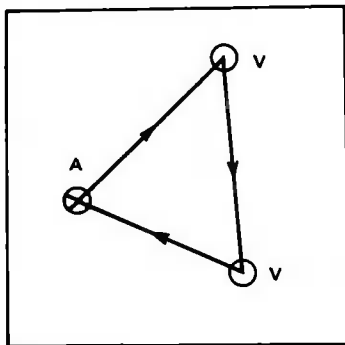


Рис. 1. Кварковая диаграмма. А — аксиальный ток, V — векторный ток. В распаде  $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$  А-ток переходит в  $\pi$ -мезон, V-токи — в фотоны. Киральная симметрия требует обращения этой диаграммы в нуль при нулевом значении импульса, придаваемого аксиальному току. Но это требование не выполняется. Возникает отличный от нуля вклад из-за интегрирования по области бесконечно больших импульсов виртуальных кварков. В этом и проявляется аномальность обсуждаемой диаграммы.

в вакууме пар кварков с очень большими импульсами под действием векторного и аксиального токов, создаваемых внешними источниками. Адлер установил, что в кварковой диаграмме существует аномалия (см. рис. 1). Оказалось, что диаграмма (и только она!) ответственна за распад  $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ . Амплитуда такого распада равна:

$$F_{\pi} = \frac{e^2}{12\pi^2 f} N_c,$$

где  $e^2 = 4\pi/137$  — квадрат электрического заряда в системе единиц  $\hbar=c=1$ ,  $f$  — константа, характеризующая взаимодействие  $\pi$ -мезона с аксиальным током ( $f$  измеряется независимо в распаде  $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu$ ),  $N_c$  — число кварков различного «цвета». При  $N_c=3$  эта амплитуда соответствует данным измерений, что в свое время явилось аргументом в пользу существования «цветных» кварков.

Некоторое время распад  $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$  оставался уникальным примером проявления аномалий. (Кроме того, существовали возможности объяснить феномен  $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$  с помощью других

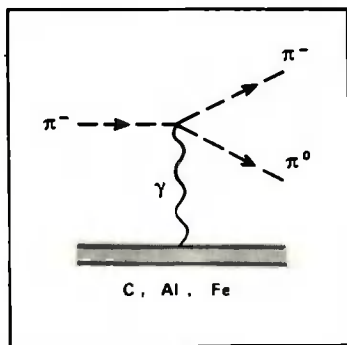


Рис. 2. Диаграмма, описывающая рассеяние  $\pi$ -мезонов на мишенях из углерода, алюминия и железа с рождением пары  $\pi^-\pi^0$  (за счет электромагнитного механизма).

гипотез.) Но в 1971 г. М. В. Терентьев (СССР)<sup>2</sup> и С. Адлером, Б. Ли, С. Трейманом и А. Зи (США)<sup>3</sup> было обнаружено, что только за счет квантовых аномалий должны происходить все процессы превращения одного и двух фотонов в нечетное число  $\pi$ -мезонов. Процесс  $\gamma \rightarrow 3\pi$  является простейшим из них. Его амплитуда вычисляется однозначно:  $F_{3\pi} = eN_c/12\pi^2 f^3$ . При  $N_c=3$  она равна  $10,5 \pm 1,5 \text{ ГэВ}^{-3}$  (ошибки связаны с неопределенностью в экспериментальном значении  $f$ ).

Измерения этой амплитуды были недавно выполнены группой физиков из Объединенного института ядерных исследований (Дубна), Института физики высоких энергий (Серпухов), Института физики АН ГрССР (Тбилиси) и Института ядерной физики (Милан, Италия). В эксперименте  $8 \cdot 10^{10}$   $\pi^-$ -мезонов с энергией 40 ГэВ были рассеяны на мишенях из углерода, алюминия и железа. Отбирались события с рождением пары  $\pi^-\pi^0$  в конечном состоянии под очень малыми углами ( $\theta \leq 10^{-4}$  рад).

<sup>2</sup> Терентьев М. В. // Письма в ЖЭТФ. 1971. Т. 14. № 1. С. 140—143; Он же. // Усп. физ. наук. 1974. Т. 112. С. 37—82.

<sup>3</sup> Adler S., Lee B., Treiman S., Zee A. // Phys. Rev. 1971. Vol. D4. P. 3497—3501.

<sup>1</sup> Adler S. // Phys. Rev. 1969. Vol. 177. P. 24—26.



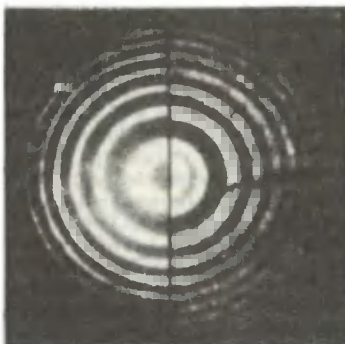
В таких условиях процесс происходит за счет электромагнитного механизма и описывается диаграммой, изображенной на рис. 2. Его сечения должны зависеть от значения амплитуды  $\gamma \rightarrow 3\lambda$ . Электромагнитный механизм приводит к острому («кулоновскому») пику в рождении  $\lambda^{-1}$  при переданных мишени импульсах  $q^2 \leq 5 \cdot 10^{-3} \text{ ГэВ}^2$ . Для событий «внутри кулоновского пика» фон от ядерного механизма рассеяния невелик. Так, при  $q^2 < 10^{-3} \text{ ГэВ}$  авторы смогли зафиксировать на железной мишени около 30 событий, возникших благодаря фотонному обмену (при ядерном фоне меньше 5 событий). Обработка таких случаев позволила установить экспериментальное значение константы  $F_{3\pi}^{\text{кп}} = (13,0 \pm \pm 0,9 \pm 1,3) \text{ ГэВ}^3$  (первая ошибка — статистическая, вторая — систематическая).

Видно, что экспериментальное число хорошо согласуется с теоретическим предсказанием (при  $N_c=3$ ), и этот факт служит подтверждением целого ряда фундаментальных концепций: существования киральной симметрии, существования кварков с тремя цветовыми степенями свободы, существования и универсального характера квантовых аномалий. *Physical Review Letters*. 1986. Vol. 56. № 8. P. 796—799 (США).

Физика

## Повышение коэффициента усиления лазерного усилителя

Радиолюбители знают, как нелегко получить высокий коэффициент усиления в усилителе — он все «норовит» самовозбудиться и превратиться в генератор. Происходит это из-за возникновения паразитных положительных обратных связей. Аналогичное явление характерно и для оптических квантовых усилителей. Получить в них коэффициент усиления свыше  $10^5$  очень трудно, так как усилитель самовозбуждается, причем основная причина са-



Интерференграмма спектров генерации для неподвижной (число Маха  $M=0$ ; слева) и движущейся ( $M=2,3$ ) активной среды лазера. Видно, что в движущейся среде происходит расщепление частот.

мовозбуждения — паразитные отражения на его входе и выходе ( $R_1$  и  $R_2$ , соответственно). В результате коэффициент усиления  $K$  не может превышать величину  $(R_1 R_2)^{-1/2}$ .

Однако  $K$  можно повысить, если создать условия, в которых при прохождении активной среды усилителя паразитное излучение усиливается только в одном направлении. Подобный эффект наблюдается, например, в усилителях с бегущей волной накачки; в них зона усиления движется со скоростью света в направлении распространения импульса. Однако такой способ пригоден только для коротких (меньше 1 нс) импульсов и требует точной синхронизации моментов прихода усиливаемого импульса и включения накачки.

Л. И. Зыков, С. Б. Кормер, С. М. Куликов, С. А. Сухарев и А. Ф. Шкапа получили однонаправленное усиление в газовом лазерном усилителе за счет сверхзвукового движения активной среды вдоль направления усиливаемого импульса. Вследствие эффекта Доплера линия излучения сдвигалась в противоположные стороны для импульсов, распространяющихся по движению жидкости и в противоположном направлении. Если сдвиг заметно превышал ширину линии (в случае, когда число Маха  $M$  больше единицы), паразитное излучение, уси-

ливаемое в одном направлении, не усиливалось в обратном. Условие самовозбуждения такого усилителя имеет вид  $K R_1 R_2 = 1$ , т. е. предельный коэффициент усиления может достигать величины  $10^{10}$ .

Проверка полученной квадратичной зависимости проводилась в проточном фотодиссоционном лазере на  $\text{CF}_3\text{I}$ . На интерферограмме спектров генерации лазера для неподвижной ( $M=0$ ) и движущейся ( $M=2,3$ ) сред видно расщепление частот во втором случае (см. рис.). При использовании лазера в режиме усиления получена связь между коэффициентами усиления в неподвижной ( $K_n$ ) и движущейся ( $K_d$ ) средах:  $K_d = K_n^{1,5}$ . Для получения предельного соотношения  $K_d = K_n^2$  необходимо повысить число Маха до 3—4.

Квантовая электроника. 1985. Т. 12. № 10. С. 2157—2158.

Физика

## «Сжатое» состояние света

Физики из лаборатории фирмы «Белл» (Нью-Джерси, США) сообщили о создании источника, генерирующего свет в «сжатом» состоянии.

Сжатое состояние света — термин квантовой оптики, появившийся в научной литературе лишь несколько лет назад; в классической оптике аналога сжатых состояний нет. Анализ сжатых состояний света проводится на языке синусной и косинусной составляющих электрического поля излучения (сумма их квадратов пропорциональна интенсивности светового пучка). Квантовые флуктуации этих компонент подчиняются соотношению неопределенностей Гейзенберга: произведение их неопределенностей не может быть меньше квантового предела.

Современные источники излучения — лазеры — генерируют свет в когерентном состоянии, в котором обе компоненты равноправны и предельные квантовые флуктуации в каждой из них одинаковы. Для лазерного света принцип неопределенности означает, что квантовые флуктуации каждой

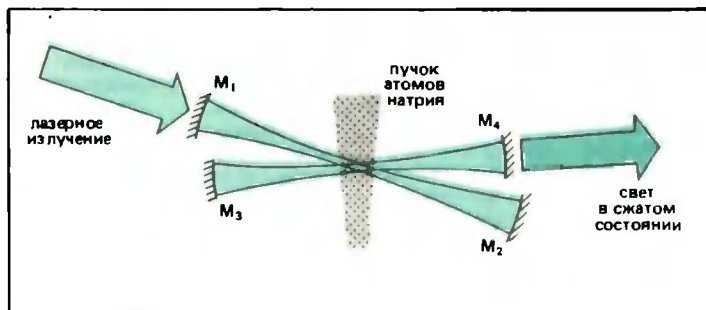


Схема «четырёхволнового смешения» в экспериментах по генерации света в сжатом состоянии.  $M_1-M_4$  — зеркала резонаторов.

из компонент также не могут быть меньше известного предела. Однако в сжатом состоянии флуктуации компонент различны: за счет увеличения квантовых флуктуаций одной из них флуктуации другой уменьшены, т. е. «сжатые», и могут быть значительно меньше, чем в пучке обычного лазерного излучения. На языке квантовой оптики, свет в сжатом состоянии отличается от когерентного состояния иной статистикой фотонов.

Американские исследователи получали сжатое состояние света, используя нелинейное преобразование лазерного луча в процессе «четырёхволнового смешения» в пучке атомов натрия. Применялись два резонатора с областью пересечения, через которую проходил атомный пучок (см. рис.). Оба резонатора настраивались по частоте на «крыло» линии оптического перехода в атомах натрия (590 нм). Излучение в резонаторах распространялось в двух направлениях — от одного зеркала к другому и обратно. Таким образом, атомы натрия взаимодействовали с четырьмя световыми волнами, передавая воздействие исходного лазерного луча на излучение во втором резонаторе. Причем фотоны во втором резонаторе могли рождаться только парами. Благодаря этому статистика фотонов в резонаторе существенно иная, чем в исходном пучке лазерного света, и соответствовала она ста-

тистике фотонов в сжатом состоянии.

Для анализа полученного света использовались два счетчика фотонов: на каждый счетчик направлялась часть пучка света в сжатом состоянии и часть исходного лазерного излучения, причем относительные фазы световых пучков на счетчиках были различны. Электрические сигналы счетчиков вычитались друг из друга, что приводило к исключению флуктуаций числа фотонов лазерного луча, а затем обрабатывались с помощью анализатора спектра.

Полученная в эксперименте степень сжатия света (разница в величинах флуктуаций компонент) оказалась небольшой — около 7 %, однако этого было достаточно, чтобы используемая в эксперименте регистрирующая аппаратура могла фиксировать квантовые флуктуации одной из компонент, которые были меньше, чем флуктуации в обычном лазерном свете.

Низкий уровень квантовых флуктуаций одной из компонент делает сжатые состояния света привлекательными для различных практических приложений, например, в оптических линиях связи при передаче слабых сигналов, для увеличения чувствительности датчиков, основанных на преобразовании измеряемой физической величины в характеристику света. Предполагается также использовать сжатые состояния света для проведения сверхчувствительных интерферометрических измерений по детектированию гравитационных волн.

Physical Review Letters. 1985. Vol. 55. № 22. P. 2409—2412 (США).

## Способ «упаковки» ДНК в ядре

Упаковка ДНК в клеточном ядре — или компактизация — происходит в три последовательных этапа: сначала ДНК закручивается вокруг белковых глобул, образуя нуклеосомы; затем нуклеосомная нить определенным образом организуется и возникает более толстая нить, фибрилла; и, наконец, фибрилла формирует гигантские петли, концы которых фиксированы на ядерном скелете. Наименее изученным этапом компактизации остается организация фибриллы, поскольку неизвестно, какую конформацию принимают линкерные участки — фрагменты ДНК, соединяющие две соседние нуклеосомные глобулы.

Английские исследователи Дж. Уидом, Дж. Финч и Дж. Томас (J. Widom, J. T. Finch, J. O. Thomas; лаборатория молекулярной биологии Кембриджского университета) сравнили строение фибриллы в хромосомах двух животных: морского ежа и курицы. Дело в том, что длина линкерного участка в хромосомах морского ежа намного больше, чем у курицы, поэтому в случае прямолинейности линкера можно было ожидать, что параметры фибрилл у этих животных будут сильно отличаться. Оказалось, однако, что диаметры фибрилл совпадают (около 30 нм); это означает, что линейные размеры линкерного участка не влияют на структуру фибриллы. Иными словами, конформация линкера не прямолинейна.

Несущественный, казалось бы, вклад в решение проблемы организации ДНК имеет, на самом деле, огромное значение, ибо резко ограничивает число возможных способов формирования фибриллы и, тем самым, приближает к пониманию способа упаковки ДНК в ядре. А ведь ДНК не просто хранится в клеточном ядре, а управляет всей жизнью клетки; при этом любой процесс, связанный с ДНК, не-

возможен без «снятия упаковки» — декомпактизации. EMBO Journal. 1985. Vol. 4. № 12. P. 3184—3194 (ФРГ).

### Молекулярная биология

## Вирус-контрабандист

Успех применения лекарственных препаратов во многом зависит от точности доставки лекарства к месту его действия. Если мишень, на которую действует препарат, располагается вне клетки, например на стенке кровеносного сосуда, то нужно лишь обеспечить избирательность действия лекарства. Значительно сложнее поразить мишень, находящуюся внутри клетки, поскольку каждая клетка окружена мембраной, которая защищает внутриклеточное содержимое от внешних воздействий. Одним из способов проникновения крупных молекул в некоторые клетки является процесс фагоцитоза, когда поглощенное вещество остается окруженным мембраной до тех пор, пока не окончится его переработка (см. рис.). Но лекарству — чаще всего сложному высокомолекулярному соединению — надо не только «узнуть» клетку, но и попасть внутрь без всякой переработки. Можно ли найти иной путь проникновения в клетку?

Сотрудники Иерусалимского университета А. Гитман (A. G. Gitman), А. Грэмман (A. Grassmann) и А. Лойтер (A. Loyter) для переноса препарата внутрь клетки использовали вирус Сендай. Этот вирус интересен тем, что, прикрепившись к клеточной мембране, впрыскивает свою ДНК в цитоплазму клетки, причем обе функции — прикрепление и впрыскивание — выполняют гликопротеины вирусной оболочки. Идея работы заключалась в том, чтобы заменить ДНК вируса на какое-либо высокомолекулярное вещество и выяснить, попадет ли оно в клетку, — в случае успеха вместо него можно использовать лекарство.

В ходе эксперимента вирус обрабатывали слабыми де-

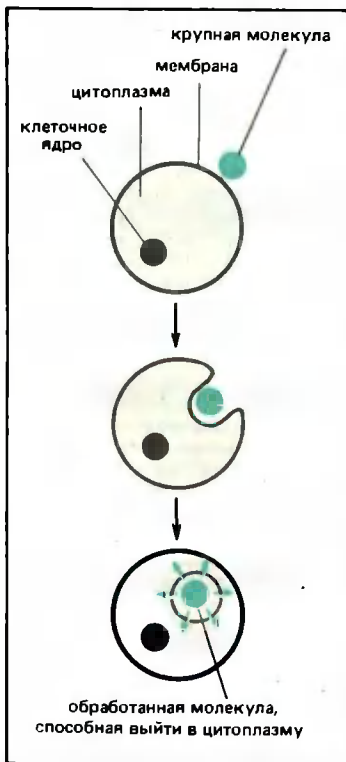


Схема фагоцитоза. Поглощаемая клеткой молекула окружается мембраной и подвергается обработке.

тергентами, которые вызывают разрушение оболочки, но не повреждают ДНК-белковый комплекс вируса. Такая обработка дает возможность отделить этот комплекс от гликопротеинов оболочки. К «очищенному» от ДНК раствору гликопротеинов добавляли белок — растительный токсин рицин А — и затем постепенно уменьшали концентрацию детергентов. При этом происходила самосборка оболочки вируса, и вместо ДНК внутри нее оказывался рицин А. Реконструированный «вирус» прикреплялся к поверхности клеток и впрыскивал рицин А в цитоплазму.

На следующем этапе предстояло обеспечить специфичность связывания реконструированного «вируса» с клетками-мишенями. Для этого исследователи воспользовались известным приемом — к одному из компонентов оболочки «пришили» гормон (в дан-

ном случае инсулин). Этот гормон обеспечивал связывание «вируса» с теми клетками, которые обладают рецептором для инсулина.

Последним препятствием к использованию реконструированного вируса Сендай в качестве «транспортного средства» для лекарств служит то обстоятельство, что на поверхности многих клеток есть рецепторы для нормального, неизмененного вируса. Предстоит так изменить часть оболочки вируса, соответствующую клеточному рецептору, чтобы рецепторы для нормального вируса Сендай не мешали высокой специфичности реконструированного «вируса» с пришитой молекулой гормона.

Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA. 1985. Vol. 82. № 21. P. 7309—7313 (США)

### Молекулярная биология

## Родственники или соседи!

Факторы некроза опухолей (ФНО) — это полипептиды, образуемые стимулированными макрофагами ( $\alpha$ -ФНО) и Т-лимфоцитами ( $\beta$ -ФНО)<sup>1</sup>. Они способны разрушать многие типы злокачественных клеток или замедлять их рост, не оказывая при этом действия на нормальные клетки. Не исключено, что ФНО могут служить средством для торможения роста опухолей.

Сотрудники Института молекулярной биологии АН СССР (С. А. Недоспасов, А. Н. Шахов, Г. П. Георгиев) и Института биорганической химии им. М. М. Шемякина (В. Н. Добрынин, В. Г. Коробко) провели клонирование гена  $\alpha$ -ФНО человека и изучили прилежащие к нему области генома. Оказалось, что в непосредственной близости к этому гену (на расстоянии всего лишь 1000 пар оснований)

<sup>1</sup> Подробнее о факторе некроза опухолей см.: Клонирован ген фактора некроза опухоли // Природа. 1986. № 5. С. 110.

расположен ген  $\beta$ -ФНО. Столь близкое соседство указывает на то, что один из генов возник, вероятнее всего, путем дупликации другого.

Несмотря на близкую локализацию генов ФНО в геноме, их экспрессия проходит не одновременно; и сами белки образуются разными видами клеток. Очевидно, что каждый из генов обладает собственными регуляторными элементами. Дальнейшие исследования должны не только выявить конкретный механизм регуляции активности генов ФНО, но и способствовать пониманию общих закономерностей функционирования генов, расположенных на небольших расстояниях друг от друга.

Доклады АН СССР. 1985. Т. 285. № 6. С. 1487—1490.

#### Генетика

### Рыбы — объекты генной инженерии

В связи с уменьшением запасов рыбы в Мировом океане рассматривается возможность создания широкой сети морских ферм, в которых морские обитатели будут находиться в благоприятных условиях под контролем человека. Главными препятствиями к реализации этого проекта служат загрязнение токсичными веществами прибрежных вод, инфекционные заболевания рыб и относительно медленная скорость их роста. Д. Пауэрс (D. Powers) с сотрудниками из Университета Дж. Голкинса (Балтимор, США) разработали генно-инженерные методы, направленные на ускорение роста рыб, а также на придание им устойчивости к пониженной температуре и сопротивляемости к токсическим веществам и инфекционным агентам.

Для повышения скорости роста рыб используется клонированный ген гормона роста млекопитающих, обладающий большим сходством с аналогичным геном рыб. Установлено, что введение этого гена в оплодотворенную икру некоторых

видов рыб вызывает заметное повышение скорости их роста.

Проведены эксперименты по пересадке генов, придающих рыбам устойчивость к пониженной температуре. Такие гены кодируют образование белков, обладающих свойствами антифриза. Один из этих белков способен присоединять мельчайшие кристаллики льда, понижая тем самым на 1—2° температуру замерзания жидкости. Белки, обладающие свойствами антифриза, были выделены из тканей антарктических видов рыб.

И, наконец, третье направление работы — использование генов, кодирующих белки металлотионеины, способные связывать токсические соединения, например ионы тяжелых металлов. Введение таких генов в оплодотворенную икру рыб должно повысить устойчивость особей к присутствию отравляющих веществ в морской воде. По мнению авторов, более перспективно использовать клонированные гены металлотионеинов для получения этих белков обычным микробиологическим способом и с их помощью удалять тяжелые металлы из морской воды.

Genetic engineering news. 1985. № 4. P. 11 (США).

#### Биохимия

### Новые варианты $\alpha_1$ -анти-трипсина

Главная функция белка  $\alpha_1$ -антитрипсина ( $\alpha_1$ -АТ), вырабатывающегося в печени, состоит в ингибировании фермента эластазы, синтезируемого клетками крови. Эластаза способна гидролизовать большинство компонентов соединительной ткани. Врожденный дефицит  $\alpha_1$ -АТ приводит во многих случаях к возникновению эмфиземы легких. Известно также, что окислители, входящие в состав табачного дыма, могут инaktivировать  $\alpha_1$ -АТ, поэтому у заядлых курильщиков часты случаи эмфиземы.

Французские исследователи из общества Трансген

(Страсбург) во главе с М. Куртнеем (M. Courtney) предположили, что причиной инактивации  $\alpha_1$ -АТ служит действие окислителей на один из остатков метионина, входящих в состав этого белка. С помощью методов генной инженерии они получили аналог  $\alpha_1$ -АТ, в котором метионин был замещен валином. Этот аналог сохранил способность тормозить активность эластазы человека, а кроме того, в отличие от своего предшественника, обычного  $\alpha_1$ -АТ, приобрел способность ингибировать эластазу поджелудочной железы свиней. Воздействие окислителя N-хлоросукцинимидом на немодифицированный белок приводило к полной инактивации последнего, тогда как действие окислителя на модифицированный  $\alpha_1$ -АТ почти не влияло на его антиэластазную активность.

Устойчивость аналога  $\alpha_1$ -АТ к действию окислителей может оказаться эффективным терапевтическим средством при лечении дефицита организменного  $\alpha_1$ -АТ или для предупреждения эмфиземы.

Авторы получили и другой аналог белка, в котором метионин замещен аргинином. У него антиэластазная активность не проявлялась. Зато, в отличие от немодифицированного  $\alpha_1$ -АТ, этот аналог приобрел способность тормозить действие тромбина (протеолитического фермента, участвующего в процессе свертывания крови). Это свойство второго аналога может оказаться весьма перспективным в клинике тромбозов.

Таким образом, показано, что замена всего лишь одной аминокислоты  $\alpha_1$ -антитрипсина на другую способна коренным образом изменять ингибиторную активность этого белка.

Nature. 1985. Vol. 313. № 5998. P. 149—151 (Великобритания).

#### Биохимия

### Фторуглероды влияют на ферменты печени

Исследования Ф. Ф. Белоярцева, Г. Р. Иваницкого и сотрудников (Институт биологической физики АН СССР, Пущино) позволяют пересмотреть точку

зрения на химически инертные фторуглероды ПФОС (полностью фторированные органические соединения) как на соединения, нейтральные в отношении биологических систем.

Низкая энергия межмолекулярных взаимодействий в жидких ПФОС обеспечивает им способность растворять большие объемы газов, поэтому они используются в качестве газопереносящих сред. При взаимодействии ПФОС с биологическими объектами никаких следов химического превращения этих соединений не обнаруживалось, однако было отмечено взаимодействие фторуглеродов с микросомами — пузырьками, образующимися при разрушении мембран эндоплазматической сети клеток печени. В ходе этого взаимодействия ПФОС влияют на работу цепи ферментов монооксигеназ, расположенных в мембранах и способных окислять органические молекулы, что необходимо для выведения печенью токсинов из организма.

В экспериментах крысам вводили эмульсии различных ПФОС, а затем из их печени выделяли микросомальные мембраны и определяли содержание в них цитохромов (белков, регулирующих монооксигенную систему). Все использованные в работе ПФОС, а также кровезамещающая эмульсия «Перфторан» (созданная в Институте биологической физики) обнаружили способность повышать уровень цитохрома P-450 и тем самым воздействовать на содержание и активность ферментов монооксигенной системы печени крыс.

Таким образом, выяснилось, что химически инертные фторуглероды обладают определенной биологической активностью.

Доклады АН СССР. 1986. Т. 286. № 3, С. 729—732.

Иммунология

## Исследуется механизм иммунного распознавания

В современной иммунологии одной из центральных проблем является специфиче-

ское распознавание чужеродных антигенов Т-лимфоцитами. В последние годы удалось выяснить основные черты строения особого белка-рецептора на мембране Т-лимфоцитов, с помощью которого узнаются антигены, точнее, их специфические участки (антигенные детерминанты). Кроме того, стало ясно, что распознавание происходит лишь в том случае, если антиген расположен на поверхности так называемых «антиген-представляющих» клеток (АП-клеток) и сцеплен с белками главного комплекса гистосовместимости. Однако многие узловые моменты процесса распознавания все еще остаются невыясненными.

Так, неизвестно, происходит ли какая-либо предварительная обработка антигена АП-клетками. К решению этой проблемы приблизилась группа исследователей из Калифорнийского университета (Лос-Анджелес, США) под руководством Э. Серкарца (E. E. Sercarz). В качестве антигенов использовались два очень сходных по строению лизоцима. Эти небольшие белки были выделены из яиц фазана и курицы. Они отличаются на 10 аминокислотных остатков (из общего числа 129). В эксперименте Т-лимфоциты специфически реагировали на лизоцим фазана в 100 раз интенсивнее, чем на куриный лизоцим. Однако после укорочения лизоцима фазана на 15 и 14 остатков с той и другой стороны полипептидной цепи различие в степени реагирования исчезло. Существенно, что укорочение фазаньего белка приводило лишь к удалению участков, которыми он отличается от куриного белка, а область, непосредственно связывающаяся с рецепторами Т-лимфоцитов, сохранялась.

Очевидно, что для процесса иммунного распознавания важны не только специфически узнаваемые Т-лимфоцитами антигенные детерминанты, но и удаленные участки антигена, прямо с рецепторами Т-лимфоцитов не реагирующие. Именно они, видимо, имеют значение для обработки антигена ферментами АП-клеток. Этот процесс составляет важный этап в цепи иммунного распознавания, и его нарушение может

обусловить отсутствие иммунного ответа на какие-либо антигены.

Journal of Immunology. 1986. Vol. 136. № 2. P. 371—376 (США).

Иммунология

## Аминокислоты и иммунитет

Первые данные об иммунологической активности аминокислот были получены в 1983 г. при изучении известного препарата тафцина: было установлено, что входящие в его состав аминокислоты пролин и аргинин сами по себе способны стимулировать фагоцитоз бактерий, так же как и препарат в целом.

Исследования в данном направлении продолжены Г. А. Белокрыловым, И. В. Молчановой и Е. И. Сорочинской (Институт экспериментальной медицины АМН СССР). Аминокислоты вводились подкожно мышам, затем животных внутривенно иммунизировали эритроцитами барана, после чего определяли количество клеток, способных к образованию антител, и оценивали дифференциацию Т-предшественников костного мозга в зрелые Т-лимфоциты и способность последних стимулировать иммунный ответ.

Из 20 исследованных аминокислот у 9 выявлена способность ускорять дифференциацию Т-предшественников в Т-лимфоциты. Интересно, что это оказались незаменимые аминокислоты: аспарагиновая, аспаргин, глутаминовая, цистин, серин, треонин, триптофан, аланин и валин.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что иммунологической активностью обладают не только определенные пептиды, но и отдельные аминокислоты, входящие в их состав. Такие аминокислоты содержатся во всех 158 известных сейчас биологически активных пептидах, что важно для изучения пептидной регуляции иммунной системы организма и гомеостаза в целом.

Доклады АН СССР. 1986. Т. 286. № 2. С. 471—473.

## Медицина

**Причины паркинсонизма**

Болезнь Паркинсона часто поражает наркоманов, употребляющих героин, загрязненный N-метил-4-фенилтетрагидропиридином (МФТП). Возникло предположение о связи болезни с действием не самого героина, а МФТП — побочного продукта его синтеза. Опыты показали, что при введении МФТП у животных развивались типичные симптомы паркинсонизма и характерные поражения определенных участков головного мозга. В последующих экспериментах на обезьянах и мышах было установлено, что под действием МФТП фермента моноаминоксидазы изменяется структура входящего в состав молекулы МФТП пиридинового кольца. При этой трансформации МФТП становится токсичным для нервной системы.

Д. Калн (D. V. Kaln) с трудниками из Отделения неврологии Центра исследования здоровья г. Ванкувера (Канада) обследовали с помощью позитронной эмиссионной томографии 4 наркоманов, вводивших себе героин, загрязненный МФТП, 6 больных паркинсонизмом и 7 здоровых добровольцев. Известно, что у здоровых людей содержание допамина (одного из веществ, с помощью которых передаются нервные импульсы) с возрастом снижается, а симптомы паркинсонизма начинают проявляться, когда уровень допамина понижается примерно на 70%. Авторы предположили, что влияние токсина может ускорить этот процесс.

Было выявлено достоверное уменьшение синтеза и содержания допамина в мозге обследованных наркоманов. Еще большее снижение этих показателей в сравнении с нормой отмечено у больных паркинсонизмом. Полученные результаты позволяют приблизиться к пониманию причин возникновения болезни Паркинсона. Важно и то обстоятельство, что МФТП входит в состав некоторых пестицидов, в связи с чем необхо-

димо изучение агентов внешней среды, способных вызывать это заболевание.

Nature. 1985. Vol. 317. № 6034. P. 246—248 (США).

## Биология

**Еще одна роль феромонов**

Исследования последних лет существенно расширяют представления о значении феромонов — веществ, выделяемых животными и влияющих на поведение других особей. Так, необычное явление, связанное с половыми феромонами, обнаружили Р. Мейсон и Д. Крюс (R. T. Mason, D. Crews; Техасский университет, США), наблюдая брачное поведение подвздошных змей. Весной вокруг самки, выделяющей специфический феромон, собирается до 100 ухаживающих самцов. Оказалось, что подобного рода скопления могут образовываться и вокруг некоторых самцов. Эти самцы выделяют точно такой же феромон, что и самки, т. е. речь идет о запаховой мимикрии «под самку». «Необычные» самцы внешне ничем не отличаются от остальных, а спариваются с самками даже успешнее, чем «обычные».

Мимикрия «под самку» известна у ряда позвоночных животных. Ее основное биологическое преимущество в том, что подделывающиеся под самку самцы вводят в заблуждение конкурентов и избегают агрессии с их стороны. Однако запаховая мимикрия подобного рода обнаружена впервые.

Авторы предполагают, что мимикрирующие самцы отвлекают внимание других самцов от самок и таким образом получают больше шансов оставить потомство. Изучение этого феномена только начато, и перед исследователями встает целый ряд интересных вопросов. Как реагируют самки на мимикрирующих самцов и сами такие самцы друг на друга? Как поддерживается в эволюции соотношение мимикрирующих и обычных самцов?

Nature. 1986. Vol. 316. № 6023. P. 18—19, 59—60 (Великобритания).

## Биология

**Тип поведения крыс и их плодовитость**

Известно, что скученность оказывает сильнейшее стрессовое воздействие как на животных, так и на человека, вызывая нарушения самых разнообразных физиологических функций. А. В. Зухарь (Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии АН СССР) исследовал влияние скученности и изоляции на плодовитость крыс. Предварительно животные были разбиты на две группы по типу их поведения и условно названы «эгоистами» и «альтруистами». Методика отбора состояла в следующем: крыса, находящаяся в комфортных для нее условиях (в небольшом темном помещении), слышит крики другой крысы, которой наносят болевое раздражение; избежать этих криков можно, только покинув уютный отсек и выйдя на открытое пространство, чего крысы обычно не любят. Крысы-«альтруисты», выбежав, включают электрическое раздражение своего сородича; крысы-«эгоисты» отсиживают в темноте, несмотря на крики.

Крысы-самки обоих типов поведения содержались в течение двух месяцев либо в изоляции, либо, наоборот, в условиях скученности, а затем производилось спаривание. Исследователи фиксировали длительность беременности, количество родившихся крысят и их вес. У «альтруистов» — в обоих случаях число потомков было больше, чем у «эгоистов»; при содержании в контрольных, удобных, условиях (две крысы в клетке) различий в потомстве между «альтруистами» и «эгоистами» не было. Средний вес родившихся крысят у «альтруистов» во всех условиях выше, чем у «эгоистов». У обоих типов животных средний вес крысят максимален в контрольных условиях, меньше — после содержания в изоляции и еще меньше — после пребывания в темноте.

Считается, что поведение в ситуации наказания другой



особи отражает принципиальные особенности высшей нервной деятельности животного. «Эгоисты» — животные со склонностью к пассивно-оборонительным реакциям избегания, тогда как для «альтруистов» характерна тенденция к активному ориентировочно-исследовательскому поведению. Эксперименты А. В. Зухаря показывают, что эти психофизиологические особенности существенно сказываются на репродуктивных свойствах крыс. Следует подчеркнуть при этом, что преимущество более активных особей, не столь значительное при содержании в удобных условиях, ярко проявляется в наиболее трудных критических ситуациях «социального» стресса, таких как изоляция и особенно скученность.

Журнал высшей нервной деятельности. 1985. Т. 35. Вып. 5. С. 985—987.

#### Биология

### Рыбы и стресс

Изучение чувствительности рыб к различным воздействиям проводится обычно в лабораториях, а полученные данные экстраполируются на рыб в естественных условиях. При этом не учитывается возможность сильного стрессового воздействия самого факта отлова. Правомочность такого переноса исследовал В. И. Мартынянов (Институт биологии внутренних вод АН СССР).

Автор предположил, что у рыб, выдержанных какое-то время после отлова в лаборатории, чувствительность к стрессу будет ниже, чем у свежевыловленных особей. Для оценки чувствительности определялось изменение содержания ионов  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$  в сыворотке крови леща (*Abgarnis brama*).

Пойманных рыб разделили на две группы. В первой анализ крови провели сразу же и несколько раз в течение суток. Вторую группу разместили в аквариуме в условиях, приближенных к естественным. Через три недели имитировался отлов,

причем лещей преследовали до полной потери ими сил, что заведомо превышало стрессовую нагрузку при обычном отлове.

Оказалось, что изменение содержания ионов в крови рыб, привыкших к лабораторным условиям и подвергнутых повторному стрессу, значительно меньше, чем у особей из первой группы. Так, изменение содержания  $\text{Na}^+$  ниже более чем в 5 раз,  $\text{K}^+$  — почти в 4 раза,  $\text{Ca}^{++}$  — в 3 раза. Результаты эксперимента показывают, что чувствительность рыб к повторному стрессу после отлова снижена. Это говорит о том, что переносить лабораторные результаты на рыб, обитающих в природных водоемах, не следует. Вопросы ихтиологии. 1985. Т. 25. Вып. 6. С. 1042—1044.

#### Биология

### Способности енота

До сих пор способность к счету, хотя бы примитивная, была известна лишь у обезьян (в первую очередь — у шимпанзе), крыс, мышей, тюленей, ворон и сорок. Ныне зоолог Х. Дэвис (H. Davis; Гуэлфский университет, Канада) на основании проведенных им экспериментов полагает, что к этому перечню можно присоединить американского енота-полоскуна (*Procyon lotor*).

Енот по кличке Роки был обучен выбирать из прозрачных плексигласовых кубиков лишь те, в которых содержалось по три ягоды винограда (в остальных кубиках их было от одной до пяти, а число кубиков в каждом эксперименте не превышало пяти штук). В последующем такие же опыты проводились с кубиками, в которых вместо винограда находились маленькие колокольчики. В награду за правильный выбор Роки получал возможность съесть виноград или же поиграть с любимой игрушкой.

В экспериментах количество совершаемых енотом ошибок быстро сводилось к минимуму; экспериментатор не исключает, исходя из этого, что животное в действительности не

считало объекты, а использовало прямую перцептуальную оценку, без последовательной их нумерации.

Так или иначе, эти наблюдения хорошо согласуются с прежними свидетельствами немалой разумности в поведении енотов.

Animal Learning and Behaviour. 1985. Vol. 12. P. 409 (США).

#### Этология

### Как строят гнезда муравьи-ткачи

Энтомологи из Университета им. И. В. Гете во Франкфурте-на-Майне (ФРГ) обнаружили в тропических лесах Малайзии два новых вида муравьев-ткачей, относящихся к роду *Camponotus*, и подробно описали их биологию<sup>1</sup>. Самым удивительным и сложным оказалось строительное поведение этих муравьев, изученное с помощью фотографирования и киносъемки.

Их гнезда состоят из множества отдельных «павильонов», разбросанных в кроне одного или даже нескольких стоящих рядом деревьев. У *S. texens* все павильоны однокамерные, почти всегда вытянуты вдоль центральной жилки на нижней стороне листа, имеют одно входное отверстие. Павильоны *S. gombaki*, как правило, расположены между двумя или несколькими листьями, состоят из нескольких камер и имеют до четырех входных отверстий. Всего в кроне дерева может быть более 200 павильонов, в которых обитают несколько сотен рабочих муравьев, единственная плодовая самка и молодь. Часть павильонов используется для выращивания молодежи — в них можно обнаружить яйца, личинок всех возрастов и куколок. В других обитают толь-

<sup>1</sup> Maschwitz U., DumPERT K., Schmitz G.—Z. Tierpsychol., 1985, Bd. 69, № 3, S. 237.

ко рабочие муравьи и крупные личинки, участвующие в строительных работах.

Приступая к строительству гнезда, муравьи берут крупных взрослых личинок челястями поперек тела и, удерживая их над выбранным местом, стимулируют к выделению шелковой нити частыми прикосновениями усиков. В ответ личинка совершает «прядающие» движения: она двигает очень гибкой передней частью тела вперед-назад и немного в стороны и, часто прикасаясь к субстрату ротовыми органами, выделяет шелковую ниточку. Авторы насчитали в среднем около 70 таких прикосновений в минуту. Муравьи, удерживающие личинок, медленно перемещаются, постепенно заплетая нитью лист. Так же сооружают они и стенки павильона. Интересно, что муравей одной антенной стимулирует личинку, а другой постоянно прикасается к листу и образующейся шелковой нити, контролируя строительство. Если муравей не стимулирует личинку, она продолжает прядание не более 30 секунд.

В строительстве участвуют еще две группы муравьев, которые выполняют совершенно иные функции. Одни приносят в гнездо песчинки, мелкие кусочки растительной ткани, помещают их на строящуюся стенку и плотно к ней прижимают. Оказавшись включенными в стенку, эти кусочки образуют в ней сплошной слой, что повышает прочность конструкции и позволяет экономить шелк. На каждого муравья с прядающей личинкой приходится в среднем два рабочих, приносящих материал-наполнитель. Почти в пять раз больше муравьев входит во вторую вспомогательную группу. Эти рабочие челястями и передними ногами тщательно утрамбовывают шелковую стенку и вплетаемый в нее материал-наполнитель; в результате поверхность шелка становится очень гладкой, а прочность гнезда возрастает.

До сих пор среди всех муравьев-ткачей наиболее сложным считали строительное поведение муравья-портного экофиллы (род *Oecophylla*): одни

муравьи у них сближают края листьев, а другие, используя выделяющих шелк личинок, скрепляют их края. Но, как оказалось, еще более сложное и дифференцированное строительное поведение демонстрируют муравьи рода *Camponotus*: у них уже не две, а три группы рабочих выполняют совершенно разные функции, четко координируя при этом свои действия.

**В. Е. Кипятков**,  
кандидат биологических наук  
Москва

#### Ботаника

### Почему выжил колючий латук!

У дикого латука (*Lactuca scariola*), произрастающего в жарких прериях и других местностях с недостатком влаги, листья всегда растут точно вдоль оси север — юг. Чтобы выяснить, с чем связана эта особенность, К. Уэрк и Дж. Элерингер (K. Werk, J. Ehleringer; Университет штата Юта, США) провели эксперименты в оранжерее и в естественных условиях. Оказалось, что у латука, растущего под покровом тополя, листья ориентируются в случайных направлениях. Следовательно, в ориентации роста латука главную роль играют солнечные лучи.

В процессе своего развития лист постоянно изгибается почти у самого основания таким образом, чтобы избежать прямых лучей полуденного солнца. Прикрепив к листьям термопару, исследователи установили: растение при такой ориентации листьев существенно снижает свою температуру и уменьшает потерю влаги на испарение. Фотосинтез у него идет в основном в прохладную пору раннего утра или в конце дня. Именно эти интересные адаптивные реакции *L. scariola* и позволяют ему выживать при жаре и недостатке влаги.

Plant Cell and Environment. 1985. Vol. 7. P. 81 (Великобритания).



### Косули возвращаются

А. А. Данилкин (Институт эволюционной морфологии и экологии животных им. А. Н. Северцова АН СССР) собрал и проанализировал обширный материал по распространению косуль.

Ареал косуль<sup>1</sup> за последнее столетие претерпел значительные изменения, вызванные в основном антропогенными воздействиями. В начале века косули на большой территории от Днепра до Урала, в Западной Сибири и на части Казахстана были уничтожены человеком. К настоящему времени ареал как европейского (*Sarpeolus capreolus*), так и сибирского (*S. pygargus*) вида косуль существенно расширился и приблизился к своим максимальным историческим границам, а в некоторых регионах вышел за их пределы. Особенно заметен этот положительный процесс в Скандинавии. В 1978—1979 гг. произошло смыкание ареалов европейской и сибирской косуль на правобережье Волги в районе от Борисоглебска до Волгограда, а в начале 80-х годов здесь образовалась небольшая зона наложения их ареалов и стала возможна гибридизация.

Европейская косуля акклиматизирована в Северной Америке, в штате Техас. Отдельный очаг обитания сибирского вида возник в результате искусственного расселения косуль в районе Ставрополя на Северном Кавказе.

Относительно будущего распространения косуль есть основания предполагать, что со временем, при увеличении численности европейской косули на востоке ареала, произойдет слияние северокавказского очага обитания с основным ареалом, расположенным севернее. Си-

<sup>1</sup> Подробнее см.: Гептнер В. Г., Насимович А. А., Банников А. Г. Млекопитающие Советского Союза, т. I, М., 1961, с. 776.

бирская косуля, как более крупная по размерам и более приспособленная к передвижению по глубокому снегу, вероятно, проникнет еще дальше на запад и северо-запад от современной границы и, также при условии увеличения численности, полностью восстановится в границах своего исторического ареала на севере.

Магистральными путями расселения косуль служат долины рек. Анализ особенностей распространения косуль показывает, что горные массивы являются для них более существенными географическими барьерами, чем равнинные степи или полупустынные участки. Установлен разрыв ареала сибирской косули в районе горных хребтов Алтая, Западного и Восточного Саян и оз. Байкал, по-видимому, исторически давно сложившийся, что могло привести (и, вероятно, привело) к географической изоляции косуль Урало-Предбайкальского региона от популяций, обитающих южнее и восточнее этого географического барьера.

Доклады АН СССР, 1985, т. 283, № 3, с. 749—752.



Биология Охрана природы

## Проблема сохранения однополовых «популяций» птиц

Недавняя работа американских орнитологов указывает на возможность сохранения популяций вымирающих видов птиц, у которых остались лишь особи одного пола, и вместе с тем иллюстрирует многочисленные трудности на этом пути.

Относящийся к семейству выюрковых узкоареальный подвид *Ammospiza maritima nigrescens* (иногда рассматриваемый в ранге вида) совсем недавно был многочисленным на маршах восточного побережья Флориды. В 60-х годах большинство его местообитаний было разрушено, а сохранившиеся участки Служба рыбы и дичи США выкупила у частных вла-

дельцев (сейчас на этих землях размещается природный резерват Сент-Джонс). Однако эта программа сохранения подвидов себя не оправдала из-за непрекращающегося наступления человека на оставшиеся биотопы (осушение и пожары): в 1976 г. была встречена последняя самка, а в 1979 г. удалось отловить шесть самцов — вот все, что осталось от популяции.

Самым реальным в сложившейся ситуации был лишь один путь: скрестить самцов *nigrescens* сначала с самками близкого подвида *Ammospiza maritima*, а далее — с последующими поколениями гибридных самок. Выведенные таким образом птицы пяти поколений должны были являться «*nigrescens*» соответственно на 50; 75; 87,5; 93,8 и 96,9%. Затем достаточно большую стаю гибридов пятого поколения можно было бы выпустить в естественные угодья исчезающего подвида.

С этой целью самцы *nigrescens* были скрещены в неволе с самками другого подвида и дали четыре 50-процентных гибрида. Однако в последующие два года, когда уцелевшие чистокровные самцы заметно постарели, Служба рыбы и дичи США не только прекратила финансирование, но и запретила продолжение программы гибридизации. В 1983 г., когда были получены солидные пожертвования от частных и международных организаций и разрешение на продолжение работ, родилась и первая 75-процентная самка, а в 1984 г. — 75-процентный птенец, пол которого еще не был установлен к моменту публикации. Единственный 87,5-процентный птенец погиб вскоре после рождения. Таким образом, к весне 1985 г. судьба генофонда исчезающего подвида зависела от трех сохранившихся 10-летних самцов, возраст которых близился к критическому.

Эта программа хорошо иллюстрирует две основные технические трудности решения проблемы: повышенную чувствительность популяции к возможным несчастным случаям и слабость репродуктивной линии, которую дают старые самцы

(один из престарелых чистокровных самцов был просто отвергнут самками; при спаривании с другим яйца оставались неоплодотворенными). В 1984 г. из 20 яиц, отложенных одной 50-процентной самкой, вылупилось только 5 птенцов, а в живых остался один. Поэтому практическое осуществление таких мероприятий необходимо начинать вовремя, пока уцелевшие птицы не состарились.

В настоящее время число видов, для которых разведение в неволе и обратное скрещивание — единственный шанс на спасение, быстро увеличивается. Опыт, полученный орнитологами в процессе осуществления программы сохранения этой небольшой желто-коричневой птицы с прибрежных болот Флориды, может иметь весьма широкое приложение.

Nature, 1985, v. 313, № 6024, p. 104 (Великобритания).

Геофизика

## Земные токи и землетрясения

Греческие геофизики П. Варотсос и К. Алексапулос (P. Varotsos, K. Alexopoulos; Университет г. Афин) исследовали возможную связь землетрясений с теллурическими, или земными, токами (т. е. естественными электрическими токами в земной коре, связанными главным образом с вариациями магнитного поля Земли, с электрическим полем атмосферы, электрохимическими и термоэлектрическими процессами в горных породах). Регистрируя теллурические токи несколькими станциями, установленными на западе Греции, они обратили внимание, что в ряде случаев эти токи канализируются в зонах повышенной проводимости (например, вдоль водонасыщенных разломов), а поскольку в момент подготовки землетрясения поле напряжений меняется, могут появиться и электрические сигналы — предвестники подземных толчков.

На основе трехлетних исследований авторы пришли к выводу, что каждое заметное землетрясение сопровождается сейсмoeлектрическим сигналом, благодаря которому с известной долей вероятности можно предсказать силу и эпицентр толчка. Они установили, что перед землетрясением электрический потенциал в коре изменяется обратно пропорционально расстоянию между регистрирующей станцией и эпицентром землетрясения, а амплитуда сейсмoeлектрического сигнала в ряде случаев связана с магнитудой землетрясения логарифмической зависимостью. Характерное время появления сейсмoeлектрического сигнала — от 6 до 115 часов до землетрясения — вполне достаточно, по мнению авторов, для оповещения населения и принятия необходимых мер.

Для подтверждения достоверности своих выводов исследователи отправляли в сейсмологический центр телеграммы с предсказанием места и силы толчка магнитудой более 5. За восемь месяцев 1983 г. в западной части Греции Национальной сейсмологической обсерваторией в Афинах было зарегистрировано 23 таких землетрясения, из них 20 были предсказаны авторами.

Проведя критический анализ работ греческих исследователей, П. Бартон (P. Barton; Геологическая служба Великобритании, г. Эдинбург) обратил внимание, что за тот же период времени на западе Греции произошло несколько сот землетрясений меньшей силы, так что метод отождествления конкретных сейсмoeлектрических сигналов с последующими землетрясениями нуждается в дальнейшей разработке и уточнении. Вместе с тем Бартон разделяет убежденность греческих геофизиков в том, что определение места и силы подземных толчков по сейсмoeлектрическим сигналам — при наличии сети регистрирующих станций — может оказаться весьма перспективным.

*Tectonophysics*, 1984, v. 110, № 1/2, p. 73—98, 98—105 (Нидерланды); *Nature*, 1985, v. 315, № 6018, p. 370—371 (Великобритания).

## Океанология

### Новый глубоководный аппарат

Только 2 % площади Мирового океана находится на глубине свыше 6000 м, тем не менее исследование этих глубоководных районов представляет значительный интерес. В США построен недавно новый подводный обитаемый аппарат «Си Клифф» ("Sea Cliff"), способный опускаться на такие глубины и находиться там в течение 16 часов. Аппарат имеет легкий титановый корпус; электропитание обеспечивают серебряно-цинковые батареи; экипаж рассчитан на трех человек.

Отметим, что хорошо известный подводный аппарат «Алвин», принадлежащий Вудсколльскому океанографическому институту (США), опускался в районе подводного хребта Хуан-де-Фука на глубину 3200 м, у подножия Флоридского эскарпа — на глубину 3266 м<sup>1</sup>.

Недавно «Си Клифф» совершил погружение на максимально возможную для его конструкции глубину — 6100 м — у западного побережья Центральной Америки.

*The Nautical Magazine*, 1985, v. 234, № 4, p. 239 (Великобритания).

## Вулканология

### Извержение Невадо-дель-Руиса

В ночь на 13 ноября 1985 г. два мощных взрыва потрясли окрестности вулкана Невадо-дель-Руис, самого северного из 7 вы-

тянутых в линию вулканов Центральной Кордильеры на западе Колумбийских Анд. Раскаленные до 1000 °С вулканические продукты мгновенно растопили лед и снег на вершине горы; вода смешалась с пеплом и мелкими обломками, отложившимися во время прежних извержений, образовав селевые потоки. Со скоростью 90—100 км/ч они скатились по склонам горы (высота ее 5200 м над ур. м.), захватывая огромные блоки льда, камни, вырванные с корнем деревья. Особенно мощным был поток, сошедший по восточному склону в ущелье р. Лагунилья: вырвавшись на открытую долину в 50 км от вершины, сель обрушился на город Армеро и полностью покрыв его; почти все жители погибли.

Этой трагедии, очевидно, можно было избежать или, крайней мере, уменьшить ее масштабы, если были бы услышаны голоса специалистов, задолго предостерегавших о ее приближении. Было известно, что Невадо-дель-Руис на памяти людей извергался неоднократно, причем в 1595 и 1845 г. извержения тоже сопровождались катастрофическими селями. Более того, в ноябре 1984 г. здесь стали отмечаться подземные толчки, усилившиеся в декабре. С января 1985 г. геоземники наблюдали выход газовых струй из расщелин на склонах, а у самой вершины начали отлагаться сольфатарные соли, что обычно свидетельствует о росте вулканической активности. 22 февраля 1985 г. была взята проба воды из заполнявшего старый кратер озера — это была концентрированная соляная кислота. С июля началось сильное таяние ледников, а в конце месяца над горой появилось желтоватое сернистое облако. 11 сентября Невадо-дель-Руис начал извергаться. След за слабыми взрывами 7 часов длился пеплопад. По склону со скоростью 10—30 км/с сошел грязевой поток, образовав в 27 км от кратера стену высотой 20 м. Гидрологи отметили, что в течение сентября расход воды в реках этого района и уровень грунтовых вод неуклонно повышались. 5 октября в городе Манисалес, расположенном к северо-западу от горы,

<sup>1</sup> Подробнее см.: Глубоководные залежи полиметаллических руд. — *Природа*, 1985, № 2, с. 116; Гидротермальная фауна вне гидротермальных излияний. — *Природа*, 1985, № 6, с. 116.

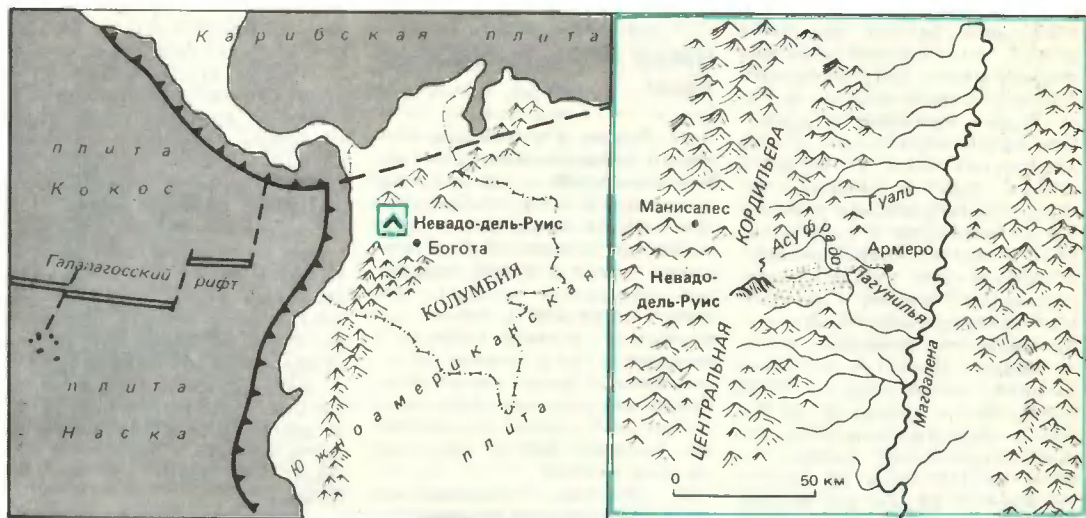


Схема взаимодействия плит земной коры на северо-западе Южной Америки и район расположения вулкана Невадо-дель-Руис.



Центр спрединга



Глубоководный желоб

наблюдался пеплопад. Все эти сведения были сообщены колумбийским властям, но они приняли единственную предохранительную меру: запретили полеты самолетов над вершиной горы. За два месяца до катастрофы сейсмологи и геофизики предупреждали о возможности селей, но и это не было учтено.

Готовясь к возможным событиям, международная группа специалистов установила вокруг вулкана 5 новых сейсмометров, которые начиная с сентября регистрировали по нескольким локальным подземным толчкам в сутки и, кроме того, фиксировали так называемые гармонические толчки — низкоамплитудные продолжительные вибрации, связанные с перемещением магмы. Эти явления, хорошо известные ученым; исследовавшим извержения на Гавайях, в Японии, Исландии и других районах мира, обычно предвещают

повышенную вулканическую активность. В октябре международная группа составила карту вулканического риска, охватывшую окрестности Невадо-дель-Руиса. Объяснительная записка к карте содержала указания, что в случае нового крупного извержения существует 75 %-ная вероятность схода селевых потоков по руслам рек Гуали, Асуфрадо и той же Лагунилья. Карта и разработанный швейцарским геофизиком Б. Мартинелли план эвакуации населения поступили в распоряжение центральных властей за 5 дней до извержения. Однако точной даты предстоящего извержения специалисты, разумеется, назвать не могли; и это, очевидно, частично объясняло бездействие властей.

Геодинамическая теория объясняет, в общих чертах, события, происходящие в Колумбийских Андах, тем, что крайний северо-запад Южной Америки представляет собой место стыка трех плит океанической земной коры — Карибской, Кокос и Наска — с Южно-американской континентальной плитой. Галапагосский рифт, разделяющий плиты Кокос и Наска, является активным центром спрединга (расширения дна океана). По существующему в этом районе глубоководному желобу океаническая плита земной коры погружается в зоне Анд под континент. Все эти процессы неизбежно

должны сопровождаться мощными сейсмическими и вулканическими явлениями; одно из которых — извержение Невадо-дель-Руиса.

По характеристике вулканиологов, Невадо-дель-Руис — довольно типичный стратовулкан: он сложен лавами и пирокластическими породами (пеплом и мелкими изверженными частицами), которые образуют чередующиеся слои. Магма содержит здесь большое количество кремния, калия и натрия; она отличается высокой плотностью, и скапливающиеся в недрах газы с трудом находят выход на поверхность. Отсюда — значительная вероятность извержений именно эксплозивного (взрывного) типа, что должно было усугубить последствия.

Посетивший район бедствия известный вулканолог Г. Тазиев не исключил возможности повторения катастрофы, если новый выброс вулканических материалов достигнет сохраняющейся части ледника на вершине горы и вызовет массовое таяние.

Отмечают, что за 80 с лишним лет — после извержения Мон-Пеле на о. Мартиника в 1902 г. — все подобные катастрофы, вместе взятые, стоили жизни 16 тыс. человек; колумбийская трагедия удвоила это число.

New Scientist. 1985. Vol. 108. №1483. P. 18—19 (Великобритания).

## Метеорология

## Пыль Сахары над Англией

В ноябре 1984 г. над восточными районами Англии на большой площади выпали красноватые частицы мелкой пыли, принесенной из Сахары. Метеорологи указывают, что подобное явление за последние 80 лет наблюдалось семь раз, причем пять раз — за последние 8 лет.

В течение нескольких предшествовавших суток над Британскими о-вами отмечались устойчивые южные ветры, которые были связаны с циклоном, сформировавшимся 4 ноября 1984 г. в районе Бискайского залива. В приземном слое скорость ветра редко превышала 25 км/ч, в то время как на высоте 5 тыс. м она достигала 72 км/ч, а еще выше, в области струйных течений, — 96 км/ч. Очевидно, что на больших высотах пылевые частицы, подхваченные воздушными потоками над Африкой, могли достигать Северо-Западной Европы всего за 2—3 суток. Не исключено, однако, что перемещение пылевых частиц не было строго ограничено определенной высотой.

В воздушном пространстве над Англией облака, из которых выпадали пылевые частицы, отличались большой вертикальной протяженностью: их основания находились на высоте 500 м, а верхняя часть — около 6000 м над ур. м. Однако, несмотря на столь мощный облачный слой, осадки были незначительными.

Исходным фактором для данного явления послужили пыльные бури, отмечавшиеся над Сахарой 7 ноября 1984 г. Крупные пылевые частицы сравнительно быстро оседали, а более мелкие были захвачены циклонической циркуляцией и перенесены через Средиземное море и Францию в восточную часть Англии. Интересно, что события 1984 г. — единственный зарегистрированный случай, когда они были связаны с наличием системы низкого давления; в предыдущих случаях в процессе участвовала система высокого давления — антициклон.

Выпадение пылевых частиц в сухом виде, без осад-

ков, — событие на Британских о-вах исключительно редкое. Хотя в северо-восточной части Англии интенсивность явления была меньшей, чем в юго-восточной, но и там в осадкомере диаметром 13 см отложилось 50 мг пылевых частиц (преобладающий размер — от 4,5 до 13,5 мкм, частицы меньших размеров служили ядрами конденсации облаков). Это позволяет считать, что на 1 км<sup>2</sup> поверхности выпало более 4 т сахарской пыли. Если тенденция к учащению подобных явлений сохранится, в Англии не исключено изменение почвенных и климатических условий.

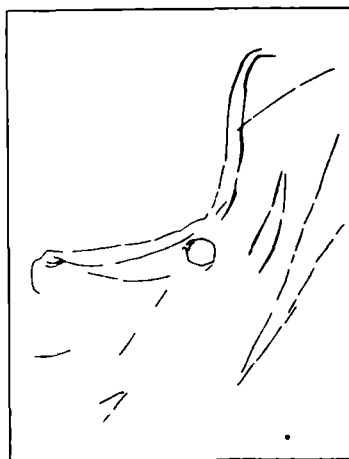
New Scientist. 1985. Vol. 105. № 1443. P. 26 (Великобритания).

## Археология

## Искусство ледникового периода

Принципиально важное открытие в области наскального искусства ледникового периода сделано недавно на юге Франции, в Восточных Пиренеях. В результате длительных планомерных поисков в малоисследованном горном районе Ж. Абеланэ (J. Abelanet) обнаружил во Французской Каталонии на высоте 750 м над ур. м. наскальные изображения, выполненные на открытой местности. Долгое время в науке господствовало представление, что петроглифы эпохи палеолита могут сохраниться до наших дней лишь в тех случаях, когда они находятся в погребенных пещерах, оставшихся недоступными, или же в недрах глубоких пещер, далеко от входа. Однако позднее в Испании были открыты скульптурные фризы и гравировки, расположенные в гротах и при входе в пещеры. И вот теперь стали известны изображения на скалах, находящихся под открытым небом. Вновь открытые петроглифы детально исследованы Д. Сакки (D. Sacchi) — ведущим специалистом в области первобытного искусства этого региона.

Изображения, выполненные тонкой резной линией,



Голова серны — фрагмент (высота 7,5 см) изображения на открытой скальной поверхности в Восточных Пиренеях. Верхний палеолит. (Прорисовка Д. Сакки.)

сохранились на восточной стороне большой (выше человеческого роста) глыбе метаморфических сланцев. Вся поверхность глыбы сильно пострадала в процессе выветривания, однако восточная ее сторона была защищена от атмосферных осадков козырьком, и потому петроглифы выглядят довольно отчетливо. На плоскости можно обнаружить около десятка незаконченных фигур животных, а также многочисленные прямые и зигзагообразные линии, идущие в разных направлениях. Лучше других изображений удается проследить гравировку головы серны. Это животное и поныне обитает в Восточных Пиренеях, в пределах массива Канигу, в то время как каменный козел, тоже представленный на скале, исчез из данного региона еще в XVIII в.

Сравнительный анализ петроглифов позволяет датировать их эпохой верхнего палеолита (11—12 тыс. лет до н. э.). Эта находка дает основание надеяться на новые открытия памятников искусства ледникового периода под открытым небом, что углубит наши представления о художественном творчестве первобытного человека.

Nature. 1986. Vol. 313. № 6003. P. 530—531 (Великобритания).



## Физик о своей науке

**Д. А. Киржниц,**  
доктор физико-математических наук

Москва



**В. Л. Гинзбург.** О ФИЗИКЕ И АСТРОФИЗИКЕ. Статьи и выступления. М.: Наука, сер. «Наука. Мировоззрение. Жизнь». 1985. 400 с.

Популярные книги о науке и людях науки привлекают к себе особое внимание, если их автор — крупный ученый, обладающий большим профессиональным опытом, широким кругозором и активной жизненной позицией. К числу таких книг относится сборник статей и выступлений академика В. Л. Гинзбурга.

Этот сборник расчленяется на три раздела, по тематике их можно условно соотнести с названием серии, в которой вышла книга — «Наука. Мировоззрение. Жизнь». Раздел I, самый большой и в известном

смысле центральный, — это расширенный вариант статьи «Какие проблемы физики и астрофизики представляются сейчас особенно важными и интересными?»

Автор статьи поставил перед собой задачу помочь молодым физикам сформировать представление о современном состоянии физики и астрофизики, приведя список и раскрыв содержание наиболее важных и интересных проблем, стоящих перед этими науками. Конечно, при таком перечислении невозможно избежать субъективности в отборе проблем и их оценке, что также неизбежно должно вызвать критику (в свою очередь субъективную). Полностью сознавая это, автор книги видит выход в появлении и обсуждении нескольких конкурирующих списков, принадлежащих разным людям. К сожалению, соответствующий призыв, содержащийся и в прежних изданиях статьи, остался до сих пор без ответа.

Может быть, это отчасти связано с трудностью задачи. Чтобы успешно проделать такую работу, нужно быть физиком в истинном понимании этого слова, уметь видеть за хитросплетениями формул и умозаключений подлинную суть вещей и связь явлений, обладать «монистическим» взглядом на физический мир. Нужно принадлежать к редчайшей в наше время категории физиков-универсалов, иметь широкий диапазон прямых научных интересов и следить, хотя бы в идейном плане, за состоянием физики и астрономии в целом. Все это как раз соответствует принципам школы теоретической физики Мандельштама — Тамма, которые автор книги активно воплощает в жизнь и на страницах печати, и в работе руководимого им общемосковского семинара по теоретической физике, и в других формах.

Хотя обсуждаемый раздел книги непосредственно ад-

ресован молодежи, он принесет пользу и зрелым специалистам — физикам и астрономам, которые в наш век узкой специализации и порожденной ею разобщенности вряд ли могут быть удовлетворены своей информированностью о состоянии этих наук в целом. При этом имеется в виду нечто большее, чем просто удовлетворение любознательности или повышение уровня общей культуры. Речь идет также и о чисто профессиональных требованиях к широте научного кругозора специалиста.

Не исключено, что упомянутая выше разобщенность будет нарастать и приведет к более или менее полной изоляции друг от друга разных разделов физики, как это произошло, например, с физикой и медициной, некогда слитых воедино (при этом хотелось бы отметить, что бурное развитие пограничных областей не вызывает сомнения). Однако в последние годы все больше проступают противоположные тенденции сближения разделов физики друг с другом и с астрофизикой: взаимопроникновение идей физики твердого тела и физики элементарных частиц, появление тесных контактов ядерной физики низких и высоких энергий с астрофизикой, бурное сближение физики элементарных частиц с космологией и т. д.

Если эти тенденции возобладают, то понадобится соответствующее расширение профессионального багажа специалиста (в определенной степени это относится уже к настоящему времени). Соответственно возникает нужда в новых формах обзорной литературы, помимо существующих обзоров по отдельным направлениям и более редких обзоров по целым разделам науки. Речь идет о «суперобзорах», охватывающих в той или иной степени физику и смежные науки в целом (но дающих, конечно, лишь общее представление о предмете). Обсуждаемый раздел книги

В. Л. Гинзбурга можно рассматривать как первый шаг в этом направлении.

Содержание раздела делится на три части. Первая часть — «Макрофизика» — охватывает проблемы физики конденсированного состояния, нелинейной динамики, управляемого термоядерного синтеза и др. Сюда же автор относит и проблему сверхтяжелых элементов, смещая традиционную границу между макрофизикой и микрофизикой. При всей условности этой границы и при всех сделанных автором оговорках нелегко понять, почему он отступил от традиции.

Ко второй части раздела — «Микрофизика» — относится физика элементарных частиц (точнее говоря, субъядерная физика): проблемы кварк-глюонной теории сильных взаимодействий и единых теорий частиц, а также более частные вопросы о нарушении CP-симметрии, массе нейтрино и т. д. Много внимания уделено научно-технической и общечеловеческой роли микрофизики (атомная энергия, электроника). Вряд ли можно оспаривать основную тезис автора: сегодня эта роль не столь исключительна, как во времена, когда основными объектами микрофизики служили электрон или нейтрон, и не исключено, что ее бывшее значение не возродится уже никогда (при сохранении, разумеется, за микрофизикой роли первого края в изучении среднего вещества). Смушает, однако, настойчивость, с какой этот тезис провозглашается. Чувствуется, что здесь автор обращается больше к своим оппонентам по прежним изданиям статьи, чем к молодым физикам, которым она предназначена.

Третья часть раздела — «Астрофизика» — пожалуй, самая содержательная и увлекательная. Она освещает широкий круг проблем собственно астрофизики, физики космических лучей, общей теории относительности и космологии, а также включает ряд соображений о современном состоянии астрономии. В заключение приводится ряд общих замечаний о характере развития науки в целом.

Второй раздел сборника объединяет ряд материалов методологического характера, за-

служивающих профессионального разбора со стороны специалистов по философии естествознания, истории науки и науковедению. Будучи просто физиком, рецензент вынужден ограничиться немногими замечаниями частного характера.

Раздел открывается текстом доклада 1981 г. «Замечания о методологии и развитии физики и астрофизики», в котором обсуждаются вопросы о границе между философией и естествознанием, о роли философии в развитии естествознания, о научных революциях, о развитии науки сегодня и в будущем. Здесь несколько разочаровывает содержание параграфа с обязывающим заголовком «Какова роль философии в развитии естествознания?» Вместо ожидаемого в контексте доклада обсуждения общего вопроса о философских корнях научных революций рассматриваются лишь весьма частные проблемы, связанные с «бюрократской» космогонической концепцией.

Следующие две статьи имеют остро критическую направленность. Первая из них — «Как развивается наука?» (впервые она опубликована в «Природе», 1976, № 6, с. 73—85) — представляет собой реакцию на книгу Т. Куна «Структура научных революций» и содержит обсуждение ряда проблем, связанных с закономерностями развития науки (принцип соответствия, экспоненциальный закон развития и т. д.). Вторая статья — «Как и кто создал теорию относительности?» — написана в связи с изданием книги «Принцип относительности. Сборник работ по специальной теории относительности». Помимо основного для этой статьи вопроса о персональном авторстве теории относительности, здесь затрагиваются и более общие проблемы, касающиеся особенностей истории науки, приоритета, соотношения науки и нравственности и др.

Содержание лекции 1975 г. «Нужна ли «новая физика» в астрономии?» в действительности относится не только к астрономии, но и к физике микромира. Речь здесь идет о тех достаточных основаниях, которые позволили бы усом-

ниться в справедливости общепринятых фундаментальных положений физики под влиянием наблюдательных или экспериментальных фактов, не поддающихся простому объяснению в рамках «старой физики». Нужно заметить, что, отставив в этом вопросе «идею здорового консерватизма», автор мог бы использовать яркий пример, относящийся к эволюции теории элементарных частиц за последние четверть века. Ее кризисное состояние в 50—60-е годы привело многих выдающихся ученых к убеждению в необходимости более или менее радикальной ломки фундамента физической теории. Однако последующее развитие науки отправило на слом не этот фундамент, а лишь прежние модели частиц и их взаимодействий. Границы же применимости к микромиру «старой физики» отодвинулись сейчас достаточно далеко.

К этой лекции примыкает доклад 1971 г. «Законы физики и проблема внеземных цивилизаций», где обсуждается возможность действия необычных физических законов на отдаленных планетах и в других потенциальных центрах цивилизации. Раздел завершается материалами более частного характера, где речь идет об условиях эффективной научной работы, о преподавании физики, о прогнозировании науки и т. д.

В последний раздел сборника включены воспоминания автора об И. Е. Тамме, Л. И. Мандельштаме, Н. Д. Папалекси, Л. Д. Ландау, А. А. Андронове, С. И. Вавилове, Е. К. Завойском. Это интересные и ценные документы, которые обогащают в общем скудную межуарно-биографическую литературу, посвященную отечественным физикам. В особенности удались автору очерки об И. Е. Тамме и Л. Д. Ландау, которых он считает своими учителями и с которыми его связывали многолетнее сотрудничество и дружеские отношения.

Кроме того, в книгу вошли заметки о создателях теоретической физики XX в. — Альберте Эйнштейне и Нильсе Боре.

Как видно из всего сказанного, в рецензируемый сборник включены самые, казалось бы, разнородные материалы.

Однако их объединение под одним переплетом представляется вполне разумным и оправданным. Они составляют в совокупности многоплановую панораму, дающую широкому кругу читателей представление и о конкретных достижениях современной физики и астрофизики, и об общих проблемах методологии и истории науки, и о людях, которые внесли важный вклад в развитие физической науки.

К числу таких людей принадлежит и автор книги, с которым читателя неясным образом знакомит она сама. В конкретном содержании и общей направленности книги, ярком и темпераментном стиле изложения нашли живое воплощение индивидуальность ее автора как ученого и человека и характерные черты научной школы, принципы которой он претворяет в жизнь.

## Эволюция живой природы и состав атмосферы

Г. А. Заварзин,  
член-корреспондент АН СССР  
Москва

Вряд ли вам удастся достать эту книгу, написанную тремя выдающимися советскими исследователями на тему, представляющую большой интерес для широкого круга читателей, прежде всего для естествоиспытателей. Не знаю почему — из-за застенчивости авторов, правил издательства или небрежности машинистки, забывшей поставить лишний ноль, — но Гидрометеиздат выпустил ее тиражом в 2000 экземпляров. По стилю изложения, простому и точному языку, отсутствию технических подробностей и удручающе длинному списку источников книга отвечает нормам междисциплинарной публикации. Материал дан в такой форме, когда он легко усваивается представителями других специальностей.

Авторы — геологи и метеоролог — основное внимание



М. И. Будыко, А. Б. Ронов, А. Л. Яншин. ИСТОРИЯ АТМОСФЕРЫ. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 207 с.

в этом исследовании уделили выяснению взаимной зависимости эволюции живой природы и изменения состава атмосферы. В соответствии с этим главной задачей было изучение истории двух компонент атмосферного воздуха — углекислого газа и кислорода. Эта постановка задачи дает право мне, микробиологу, выступить с рецензией.

О составе атмосферы много писали и особенно много пишут сейчас, когда стало ясно, что это одна из наиболее уязвимых оболочек Земли, причем нарушения в ней быстро приобретают глобальный характер. Обычно история атмосферы рассматривается с ее начальных этапов, состояние которых относится к гадательной области. Авторы пошли строго фактическим путем, основываясь на взаимосвязи состава осадочных пород и состава атмосферы. Дело в том, что «скорость поступления кислорода в атмосферу... равна разности скорости образования  $O_2$  при фотосинтезе и скорости его расхода на окисление органического вещества. Для Земли в целом эта разность для любых интервалов времени может считаться пропорциональной количеству органиче-

ского углерода, накапливаемого в отложениях» (с. 112). Органический (точнее, восстановленный по отношению к  $CO_2$ ) углерод можно учесть геохимическими методами и, зная среднее содержание  $C_{орг}$  объем породы, время ее образования, получить достоверную основу для суждения о составе важнейших компонентов атмосферы в течение того или иного геологического периода.

Нет нужды говорить о том, какое важное, я бы сказал — мировоззренческое, значение имеют выводы, полученные в результате такого исследования, и как важно оценить их достоверность. Естественно, что достоверность этих выводов основывается на доступности для исследования соответствующих осадочных пород. В ранее опубликованных работах этих авторов учитывались осадки континентов. Здесь удалось дополнить их океаническими осадками за последние 150 млн лет. Глобальные расчеты сделаны на основании вычисленного соотношения между континентальными и океаническими осадками для доступного периода времени и пересчета для прошлого. Основываясь на данных геологии, авторы совершенно обоснованно идут от пород фанерозоя вглубь. Все выводы относительно докембрия сделаны в очень осторожной предположительной форме.

Центральное место в книге, в соответствии с принятым балансовым методом расчета, занимает глава 2, посвященная осадочной оболочке Земли, углероду в осадочной оболочке, зависимости количества  $CO_2$  и  $O_2$  в атмосфере от массы углерода в отложениях. В таблицах суммированы данные по содержанию  $C_{орг}$  и  $C_{карб}$  по стратиграфическим интервалам фанерозоя. Основным выводом являются резкие колебания этих величин по времени, причем они синхронны колебаниям в накоплении вулканогенных пород. Это значит, что накопление карбонатов и органического углерода совпадало по времени с выносом из глубин  $CO_2$ .

Производным от расчетов содержания  $C_{орг}$  является определение содержания  $O_2$ . Для неогена, т. е. последних 1,6 млрд лет, получился следующий баланс:

Масса $C_{орг}$ во всей осадочной оболочке Земли, г	118 · 10 <sup>20</sup>
В том числе:	
в континентальных осадках	83,3 · 10 <sup>20</sup>
в осадках шельфов	33 · 10 <sup>20</sup>
в осадках океанов	1,7 · 10 <sup>20</sup>
Масса $O_2$ , поступившего в атмосферу, г	314 · 10 <sup>20</sup>
В том числе:	
расход на окисление серы в осадочной оболочке	102 · 10 <sup>20</sup>
» окисление серы вод океана	25 · 10 <sup>20</sup>
» окисление железа в осадочной оболочке	41 · 10 <sup>20</sup>
масса $O_2$ в современной атмосфере	12 · 10 <sup>20</sup>
масса несбалансированного $O_2$	134 · 10 <sup>20</sup>

Таким образом, для неогоя оказывается несбалансированным 43 % поступившего в атмосферу кислорода. Другие пути связывания значительных масс кислорода в осадочной оболочке неизвестны. Поэтому далее авторы выдвигают предположение, что существенная часть несбалансированного кислорода расходовалась на восстановленные газы, которые выносятся при вулканической деятельности. Они составляют до 5 % от массы  $CO_2$ . Из «недоокисленных газов, поступающих из глубин земной коры ... основное значение имеет, по-видимому, окись углерода ( $CO$ )» (с. 121). Это утверждение авторов мне не совсем понятно. Значительного выделения  $CO$  при вулканической деятельности в общем не происходит. Гораздо более характерным газом является  $H_2$ , окисление которого не даст следов.

Однако здесь более существенным представляется другой вывод. 97 %  $O_2$ , поступившего в атмосферу в результате дисбаланса процессов фотосинтеза и деструкции органического вещества в фанерозое, было израсходовано на окисление минеральных веществ. Окисление совершается либо фотохимически (эту область авторы совсем не затрагивают, хотя сейчас имеются хорошие расчеты возможного баланса газов в атмосфере), либо в результате деятельности хемосинтезирующих бактерий. Окисление соединений серы, составляющее 40 % от поступившего  $O_2$ , — хорошо изученный микробиологический процесс.

Окисление железа и других металлов, хотя и не всегда, но часто контролируется бакте-

риями. Наконец, окисление газов, таких как  $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $CO$ , аммиак, также осуществляется бактериями, которые конкурируют с фотохимическими процессами при повышенных концентрациях этих газов в приземном слое. Авторы оценивают расход  $O_2$  на окисление газов величиной от  $0,7 \cdot 10^{19}$  до  $3,5 \cdot 10^{19}$  г/млн лет. По другой оценке, основанной на балансовых расчетах, расход  $O_2$  на окисление газов в фанерозое —  $2,6 \cdot 10^{19}$  г/млн лет (с. 122). Это, конечно, очень большие величины, и много лет занимаясь хемосинтезирующими бактериями, я никогда не предполагал, что они до такой степени важны для кислородного баланса атмосферы. Но эта интерпретация исходит из неполноты баланса и, вероятно, оставляет возможность для поисков иных объяснений глобальных процессов.

В связи с колебаниями уровня кислорода — а различие в содержании  $C_{орг}$  в осадках фанерозоя неизбежно ведет к допущению резких колебаний  $O_2$  в атмосфере — необходимо остановиться на часто высказываемом предположении, что антропогенная деятельность приведет к снижению уровня  $O_2$ . Авторы обоснованно отводят это грубо ошибочное предположение: «Даже если имеющиеся запасы углеродного топлива будут полностью израсходованы, количество кислорода в атмосфере уменьшится только на долю процента от объема атмосферы. Таким образом, воздействие хозяйственной деятельности на количество атмосферного кислорода несравнимо слабее аналогичного воздействия на концентрацию углекислого газа в атмосфере. Причина этого

проста — масса атмосферного кислорода приблизительно в 500 раз превосходит массу атмосферного углекислого газа» (с. 34).

Колебания содержания  $O_2$  и  $CO_2$  в атмосфере при временной шкале в миллионы лет в фанерозое представляются авторам значительными. Колебания  $O_2$  оцениваются от  $0,4 \cdot 10^{21}$  г до  $2,08 \cdot 10^{21}$  г (при современном значении  $1,2 \cdot 10^{21}$  г).

Разумеется, такие колебания в содержании  $O_2$  должны были очень резко сказываться на органическом мире. Это влияние обсуждается в разделе «Кислород, углекислый газ и жизнь». Однако я бы воздержался от оценки правдоподобности сделанных здесь выводов. Авторам изменяет здесь количественный подход к явлениям. Мы помним, что баланс по  $O_2$  не сходится на 43 % и, по суждению самих авторов, «расход кислорода на окисление газов, поступающих из глубоких слоев Земли, составляет около половины возможного максимального значения этого расхода, т. е. около 21,5 % прихода кислорода в атмосферу» (с. 158). Далее, в цикле  $CO_2$  и  $O_2$  животные, палеонтологией которых аргументируют авторы свои выводы, играют совершенно подчиненную роль. Основное значение придают растениям и водорослям и разлагающим органические вещества микроорганизмам, например на суше — грибам. Животные расходуют примерно столько же  $O_2$ , сколько пожары.

С позиций рецензента важнейший вопрос — масштаб событий. Апелляция к глобальным масштабам не всегда обоснованна. Поясним это примером. Бентосное сообщество цианобактерий (такое, которое образует строматолиты) продуцирует  $O_2$  до насыщения днем, а ночью кислород быстро исчезает и заменяется иногда сероводородом. Сделаны точные измерения этих процессов, хотя, вообще говоря, достаточно взглянуть на дно лужи с осцилляториевыми водорослями, усеянные пузырьками  $O_2$ . Для планктона океана эти колебания могут быть не столь значительными, так как требуется обмен через 200 м фотического слоя.

Поэтому, говоря о составе атмосферы, имеющем среднее значение для всего земного шара, не следует сразу же переходить к концентрации  $\text{CO}_2$  и  $\text{O}_2$  в местах развития фотосинтезирующих организмов, не оценивая для каждого места обитания скорости обмена с атмосферой.

Вместе с тем рецензент с большим удовольствием присоединяется (фактически уже опубликовал сходное мнение) к оценке «гипотезы Гея» Дж. Ловелока и Л. Маргулис. Эта гипотеза предполагает, что живые организмы обладают способностью контролировать состояние окружающей их среды, поддерживая это состояние благоприятным для их жизнедеятельности в глобальном масштабе. Авторы считают, что Ловелок и Маргулис «не привели никаких доказательств данной гипотезы и эта точка зрения главным образом основана на кажущейся невозможности объяснить другим путем длительное существование биосферы» (с. 185).

Состав атмосферы непосредственно связан с климатом. Эта связь основывается на установленном еще в конце прошлого столетия С. Аррениусом влиянии содержания  $\text{CO}_2$  на температуру Земли. Получив данные о вероятном содержании  $\text{CO}_2$

в атмосфере на основании геологической летописи, авторы имели возможность оценить изменения средней температуры воздуха в фанерозое. Таким образом, для значительного периода существования Земли получены оценки важнейших для биолога параметров.

Книгу завершает исключительно ясная глава, пять страничек которой хочется перепечатать, чтобы дать полное представление о выводах авторов. Основной вывод тот, что состав атмосферы сильно менялся как в докембрии, так и в фанерозое, а не был постоянным. Хотя авторы и очень осторожно обсуждали состав атмосферы докембрия, для которой нет баланса осадочных пород, тем не менее в выводах утверждается, что существовали два этапа: бескислородной и кислородной атмосферы со сравнительно быстрым переходом между ними. В докембрийской атмосфере шло убывание  $\text{CO}_2$  и нарастание азота в связи с дегазацией Земли. Предполагается возможность относительно кратковременных колебаний  $\text{CO}_2$  из-за вулканической активности. На протяжении основной части истории атмосферы существенное влияние на ее химический состав оказывали живые организмы. «Если объяснение появления жизни на Зем-

ле связано со значительными трудностями, не менее трудно объяснить факт сохранения жизни на протяжении 4 млрд лет в условиях постоянно изменяющихся химического состава и физического состояния атмосферы» (с. 198). В противоположность мнению Ловелока и Маргулис авторы считают, что относительное постоянство климата и характер изменений состава атмосферы являются результатом очень маловероятного совпадения ряда независимых событий.

Рецензируемая книга скрывает массу черновой статистической работы, потребовавшейся для установления состава осадочных пород в геологическом прошлом, и знакомит лишь с выводами, которые следуют из этих данных. Возможно, что при иных допущениях эти данные могут послужить основанием для иных выводов, чем сделанные авторами, но при любых обстоятельствах суждение о составе атмосферы на основании осадочных пород перестает быть строгостью воздушных замков.

Если рецензенту не удалось убедить читателя преодолеть все трудности, созданные малым тиражом книги, и ознакомиться с ней самому — значит рецензент не достиг своей цели.

## НОВЫЕ КНИГИ

### Охрана природы

А. В. Яблоков, С. А. Остроумов. УРОВНИ ОХРАНЫ ЖИВОЙ ПРИРОДЫ / Отв. ред. Н. Г. Хрущов. М.: Наука, сер. «Человек и окружающая среда», 1985. 175 с. Ц. 60 к.

Системный подход открывает уникальные возможности для анализа природоохранных проблем. Авторы в полной мере использовали эти возможности и дали яркую картину воздействия человеческой деятельности на живую природу на разных уровнях ее организации: молекулярно-генетическом, он-

тогенетическом, популяционно-видовом и биогеоценологическом биосферном. Каждому из них посвящена отдельная глава. Особенно важно, что в книге привлечено внимание к охране живой природы на ее нижних «этажах» — молекулярно-генетическом и онтогенетическом, что раньше оставалось без должного внимания.

Отрадно, что авторы оптимистически смотрят в будущее. Для этого есть основания: и снижение темпов прироста мирового населения, и улучшение охраны местобитаний животных, и появление новых пу-

тей охраны природы, и, самое главное, растущая экологизация сознания.

Не со всеми утверждениями, содержащимися в книге, можно безоговорочно согласиться. Так, говоря об экологической инженерии как об одном из методов охраны природы, авторы приводят в качестве положительного примера интродукцию европейской норки на о. Кунашир. К сожалению, они обходят молчанием тот факт, что вселение млекопитающих (акклиматизация), широко применявшееся в нашей стране как средство «реконструкции» фау-

ны, во многих случаях отнюдь не способствовало охране природы, а нанесло ей ущерб. Остров Кунашир — заповедная территория, и выпуск туда нового вида противоречит целям охраны природы. Можно предвидеть, что новый хищник станет истреблять не только мышевидных, но и местные виды земноводных и пресмыкающихся. Вспомним, что индийский мангуст, завезенный на о-ва Карибского бассейна, истребил редкий эндемичный вид ящерицы. Не слишком ли большую цену придется заплатить и за «экологическую инженерию» на Кунашире?

Книга хорошо оформлена, легко читается. Каждый болеющий за нашу родную природу прочтет ее с удовольствием, найдя для себя что-то новое, интересное и практически важное.

**Н. И. Чесноков,**  
кандидат сельскохозяйственных наук  
Москва

#### Геология

**С. В. Ефремова.** МАГМАТИЧЕСКИЕ ЛИНИИ И КОЛЬЦА ЗЕМЛИ. М.: Недра, 1986. 85 с. Ц. 15 к.

Эта научно-популярная книга посвящена дайкам — геологическим телам, образовавшимся в процессе магматизма. Огненно-жидкий расплав внедрялся из глубин Земли в земную кору по трещинам и, остывая, превращался в узкие, вытянутые по вертикали или горизонтально, а также залегающие наклонно структуры. Это и есть дайки. Из космоса, на аэрофотоснимках и геологических картах они выглядят, как прямые полосы, кольца, веерообразно расходящиеся, радиальные, дуговые линии.

Автор знакомит читателя с минеральным составом даек и их размещением в земной коре, рассказывает, как по ним изучают общую эволюцию образования трещин. Читатель узнает, что изучение даек помогает геологам реконструировать древние тектонические движения, судить о химическом составе

магматических очагов, искать руды. Дайки дают информацию и геофизикам: по магнитным свойствам дайковых пород, обнаруженных в Швеции, была уточнена траектория движения магнитного полюса Земли. Палеомагнитное изучение даек Новой Зеландии позволило установить, что она отделилась от Западной Антарктиды и Восточной Австралии в позднемеловое время.

#### Палеогеография. Археология

**М. В. Агбунов.** ЗАГАДКИ ПОНТА ЭВКСИНСКОГО (Античная география Северо-Западного Причерноморья) / Отв. ред. И. Т. Кругликова. М.: Мысль, 1985. 160 с. Ц. 50 к.

Книга посвящена спорным вопросам античной географии Северо-Западного Причерноморья, охватывающего приморскую часть междуручья Дуная и Днепра. Два с половиной тысячелетия назад здесь возникли греческие города и поселения, но в первом веке нашей эры они прекратили свое существование, затем превратились в руины и были поглощены морем. Расположение многих из этих поселений до сих пор не определено: археологи часто не обнаруживают их следов в тех местах, на которые указывали античные авторы. В результате сложилась традиция недоверия к античным источникам.

Лишь в последние годы методами палеогеографии (в сочетании с источниковедением, археологией и картографией) удалось решить некоторые спорные вопросы. Автор рассказывает, например, как были восстановлены маршруты судов, плававших в северо-западной части Понта Эвксинского (Черного моря), определено местоположение города Никония и башни Неоптолема. Читатель узнает, что в античное время в дельте Борисфена (Днепра) на месте нынешнего Кинбурского п-ова был большой остров и что античный Одесс стоял вовсе не там, где раскинулась современная Одесса.

В книге доказывается, что произведение древних авторов — по большей части досто-

верный источник для географических реконструкций. А кажущиеся противоречия античных авторов с современными данными имеют объективные причины, одна из которых — изменение береговой линии. Автор признает, что не все содержащиеся в книге выводы аргументированы с одинаковой полнотой, некоторые пока остаются гипотезами.

#### История науки

**Роберт Р. Ньютон.** ПРЕСТУПЛЕНИЕ КЛАВДИЯ ПТОЛЕМЕЯ. Пер. с англ. Н. Б. Малышевой. Под ред. Е. А. Гребенникова. М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит.-ры, 1985. 384 с. Ц. 2 р. 60 к.

Основной трактат по астрономии в докоперниковую эпоху — «Альмагест», написанный древнегреческим астрономом Клавдием Птолемеем. Сочинению Птолемея почти два тысячелетия; за это время опубликовано множество трудов, восхваляющих его вклад в сокровищницу знаний, но не раз также предпринимались попытки найти противоречия между наблюдательным материалом, которым мог располагать Птолемей, и его логическими конструкциями.

Американский ученый Р. Ньютон в течение десяти лет изучал «Альмагест» в сравнительно-историческом плане и пришел к выводу, что абсолютное большинство наблюдений, положенных в основу геоцентрической картины мироздания и приписанных Птолемеем самому себе и другим ученым, на самом деле сфабриковано им или подделано, а основные достижения античной астрономии изложены неполно и необъективно.

По мнению Р. Ньютона, Птолемей сам не вел наблюдений небесных светил, а пользовался лишь имевшимися вычислениями положения Солнца, Луны, планет и звезд, добавляя к ним влияние прецессии. И даже эту операцию делал хуже, чем его предшественники.

Итак, заключает Р. Ньютон, «величайшим астрономом античности Птолемей не является, но он является еще более необычной фигурой: он самый удачливый обманщик в истории науки».



## Маховик и... антигравитация!

**Н. В. Гуля,**  
доктор технических наук  
Москва

Вот уже около десяти лет в популярной, а иногда и научной печати, нет-нет да и проскальзывают сообщения о том, что вращающийся маховик приобретает свойство... антигравитации. Что за смысл вкладывают авторы в это понятие — неясно, но они утверждают, будто, вращаясь, маховик утрачивает часть своего веса. При этом некоторые авторы приводят теоретические обоснования этого явления.

Приведу выдержки из двух научно-популярных журналов.

«Лондон, конференц-зал Королевского технологического института. Известный английский физик Эрик Лейтуэйт демонстрирует собравшимся сравнительно несложный прибор: электромотор, пара тяжелых латунных роторов и спиральная раampa. Установлен прибор на весах, и, как видно, весит 10 килограммов. Включается электромотор, роторы-гироскопы начинают вращаться, и собравшиеся видят, что вес прибора уменьшается до семи килограммов». Сам автор идеи — «один из крупнейших», — как говорилось в заметке, — мировых авторитетов в области изучения электромагнитных измерений» объясняет это явление следующим образом: «Гироскоп имеет еще одну особенность — он на некоторое время преодолевает гравитацию... Возникающий антигравитационный эффект переносится на целый прибор, и он теряет в весе» (Знание — сила // 1977. № 1. С. 29).

Другой массовый журнал «Техника — молодежи» (1983. № 11. С. 27) дает уже подробное описание опыта по обнаружению «воздействия на силу гравитационного притяжения с по-

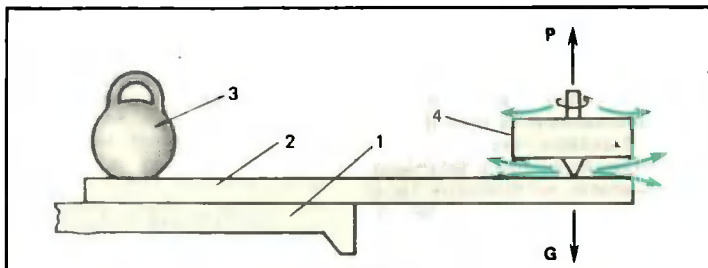


Рис. 1. 1 — стол; 2 — подставка; 3 — гиря; 4 — маховик; G — сила тяжести; P — аэродинамическая подъемная сила. Цветными стрелками указано направление движения воздуха.

мощью механических процессов». Этот опыт, проведенный сотрудниками Общественного института энергетической инверсии, нам еще пригодится, а поэтому здесь приведена его схема (рис. 1) и дословно процитировано описание: «Показательный эксперимент по выявлению воздействия вращения на силу тяжести. На столе 1 лежит выходящая за его край подставка 2 с гирей 3, удерживающей от падения гироскопическое устройство 4 (понимай — волчок. — Н. Г.). Опыт показал, что при достаточно большом количестве оборотов (по-видимому, имеется в виду частота вращения. — Н. Г.) гироскопического устройства его вес настолько уменьшится, что равновесие сохранится даже при удаленной гире». Не правда ли, до удивительности корректный и современный эксперимент по обнаружению антигравитации?

В газете «Социалистическая индустрия» от 20 ноября 1977 г. сообщалось об опыте профессора Н. А. Козырева, где вращающийся гироскоп массой 90 г стал легче неподвижного на 4 мг. А объяснялось это тем, что «направление движения волчка противоречит ходу времени. Время оказалось на него давление, возникли допол-

нительные силы. Их можно измерить».

Наконец, в газете «Труд» (11 февраля 1986 г.) появилась сенсационная статья «Тайна смерча» с подзаголовком: «Сделан еще один шаг в исследовании гравитации».

Из статьи следует, что «с увеличением скорости вращения гироскоп теряет вес» и «если скорость превысит определенную критическую величину, то прибор приобретает отрицательный вес, то есть уже не притягивается к земле, а отталкивается от нее». И в той же статье поразительное это явление получает теоретическое обоснование. Притом автор теории Г. В. Талалаевский говорит корреспонденту следующее: «Моя теория позволяет по-новому взглянуть на привычные истины. Из нее вытекает новый общий закон материального мира — закон различия природы поступательного и вращательного ускорений. Владая этим законом, мы научимся управлять гравитацией, по своему усмотрению изменять притяжение Земли в нужной нам точке. Много тысячелетий люди могли об этом только мечтать». И все это закреплено «Комментарием специалистов».

Реклама сделала свое дело: потоком пошли заявки на изобретения, использующие явление антигравитации, вызываемой маховиком. В редакции журналов приходят многочисленные письма с проектами применения антигравитации в хозяйственных нуждах, оживля-

ются незадачливые авторы инерциодов и вечных двигателей. Вращающиеся маховики предлагают применять для «облегчения» автомобилей при езде по грязи или по шатким мостам. (Это прозаическое применение антигравитации — уже из писем, адресованных лично мне.)

Среди писем есть и такие, авторы которых требуют немедленно разобраться, уменьшает ли, наконец, свой вес (или массу?) вращающийся маховик или нет. Ведь это не мелочь, а, можно сказать, сенсация века. Шутка ли — антигравитация у нас под боком, а мы столько лет игнорируем ее.

Сам я посмеялся над первой публикацией, задумался над второй, огорчился, прочтя третью, а когда в четвертой столкнулся с тем, что об антигравитации говорится как об установленном факте, подумал, что дело зашло далеко и пора, наконец, внести ясность в проблему «маховичной антигравитации». Тем более, что, занимаясь маховиками как накопителями энергии, я бы не хотел, чтобы несостоявшаяся сенсация бросила на них тень.

Итак, изменяет ли свою массу вращающийся маховик по сравнению с неподвижным? Изменяет, но в сторону... увеличения ее. Накапливая энергию  $E$ , которая, согласно релятивистской механике, имеет массу  $M = E/c^2$ , где  $c$  — скорость света в пустоте, мы увеличиваем и массу маховика. Правда, даже самые лучшие из современных супермаховиков, накапливающие около 1 МДж энергии на 1 кг массы, прибавляют в массе настолько мало, что эту прибавку, пожалуй, не могут измерить ни одни весы в мире. Судите сами — стокилограммовый супермаховик прибавит в массе одну тысячную миллиграмма!

Что же касается уменьшения массы вращающегося маховика, то это уменьшение только лишь кажущееся. Почти каждый из нас может поставить опыт, демонстрирующий эту мнимую «антигравитацию».

Начну с самого простого опыта, дающего, кстати, максимальный «антигравитационный» эффект. Того, что описан в «Технике — молодежи».

Известно, что, вращаясь,

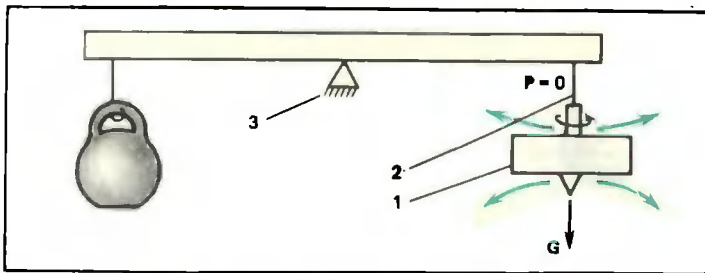


Рис. 2. 1 — маховик; 2 — нить; 3 — призма весов.

маховик, подобно центробежному насосу, качает воздух из центра на периферию, отбрасывая его. При этом около торцов маховика возникает разрежение. Однако внизу, в щели между подставкой и маховиком, это разрежение лишь прижимает подставку к маховику, а в верхней части, где нет поблизости никаких поверхностей, разрежение «втягивает» маховик вверх. Совсем как вертолет, хотя никто не пытался надеть его свойством антигравитации.

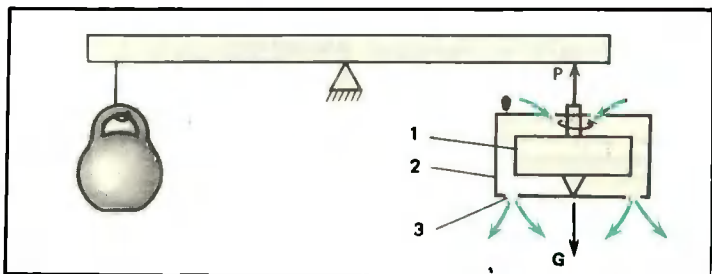
Подвесьте вращающийся маховик за длинную нитку к коромыслу весов и вы убедитесь в исчезновении этого эффекта (рис. 2).

Аэродинамические эффекты могут проявляться и по-другому. Корпус гироскопа часто имеет отверстия, несимметрично расположенные на разных торцах. Подвесьте такой вращающийся гироскоп на коромысле весов, и в определенных условиях вы получите убавление веса, если внизу отверстия расположены ближе к периферии, чем наверху. Переверните гироскоп, и он будет уже утяжеляться (рис. 3). Это, повторим,

Рис. 3. 1 — маховик; 2 — корпус; 3 — отверстия в корпусе.

объясняется тем, что маховик, как центробежный насос, гонит воздух от центра на периферию. Через отверстия, расположенные ближе к центру, воздух заходит, а через периферийные уходит, дует из этих отверстий. В результате создается аэродинамическая подъемная сила, что и изменяет показания весов.

В некоторых опытах гироскоп помещают в герметичный корпус, чтобы избежать аэродинамических явлений. Но и тогда на показания весов может повлиять многое. Так, когда корпус жестко закреплен на коромысле весов, а гироскоп вращается в плоскости качания последних (рис. 4), на показания весов будет влиять реактивный момент, создаваемый электромотором гироскопа на корпусе. Если мы включим мотор гироскопа на разгон маховика, то корпус будет стремиться повернуться в сторону, противоположную вращению маховика, и потянет за собой коромысло весов. Этот момент подчас бывает настолько велик, что гироскоп может стать «невесомым». Возможно, это и имело место в опытах Лейбузита. При свободном вращении маховика гироскопа на корпус начинают действовать моменты сопротивления вращению маховика — трение в подшипниках, о воздух внутри корпуса, и коромысло весов будет уже поворачиваться в другую



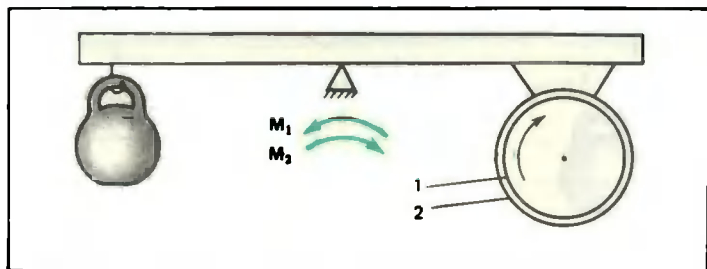


Рис. 4. 1 — маховик; 2 — корпус, жестко закрепленный на коромысле весов. Черной стрелкой показано направление вращения маховика гироскопа, электромотор которого порождает реактивный момент (моменты показаны цветными стрелками) на корпусе гироскопа, передающийся коромыслу весов. При разгоне маховика этот момент  $M_1$  направлен в сторону, противоположную моменту силы тяжести маховика. При этом складывается впечатление «облегчения» маховика. При свободном вращении маховик замедляется под действием трения в подшипниках, о воздух и других факторов, а момент трения  $M_2$  передается корпусу гироскопа, а от него к коромыслу весов. Так возникает минное «утяжеление» маховика.

сторону, т. е. маховик как бы «утяжеляется».

Но это достаточно «грубое» явление, и его можно избежать, например, закрепив гироскоп на весах так, чтобы плоскость его вращения была перпендикулярна плоскости качания

весов. Но и тогда показания весов будут неточны, что доказано опытами, проведенными в Институте проблем механики АН СССР В. Ф. Журавлевым. Вращаясь, маховик никогда не бывает идеально уравновешен, да и идеальных подшипников не бывает. Поэтому всегда возникает вибрация, как радиальная, так и осевая. Когда корпус вибрирующего маховика стремится вниз, он нагружает призмы и другие чувствительные элементы весов не только своей тяжестью, но и дополнительной силой, связанной с ускорением. При ходе же его вверх призмы разгружаются, так как гиря сама стремится вниз под действием силы тяжести. При этом трение в призмах в первом случае будет больше, чем во втором, и весы начинают поворачиваться в сторону гири, создавая впечатление «облегчения» гироскопа. Вот это явление и обусловило те 4 мг в упомянутых опытах

Н. А. Козырева. Сам Н. А. Козырев до публикации статьи в «Социалистической индустрии» согласился с таким объяснением.

И еще один фактор, могущий повлиять на показания весов при взвешивании вращающихся маховиков, — магнитное поле. Известно, что ферромагнитный маховик при разгоне самопроизвольно намагничивается (эффект Барнетта) и начинает взаимодействовать с магнитным полем Земли.

Если же маховик неферромагнитный, но хотя бы электропроводный, то, вращаясь в анизотропном магнитном поле, он оттуда выталкивается из-за возникновения токов Фуко. Вспомним школьный опыт, где вращающийся латунный волчок буквально «шарахается» от приближающегося к нему магнита.

На этом явлении основан опыт, который может поставить в тупик несведущего человека. В подставку весов под латунным маховиком смонтирован магнит. Весы уравновешены. Но стоит раскрутить маховик, как он будет настолько сильно отталкиваться от магнита, что может приобрести даже «отрицательный вес». Попробуйте — и поразите своих друзей открытием антигравитации.

Позвольте, позвольте, а не потому ли в опытах Лейтуэйта маховики были именно латунными!..

В номере использованы фотографии БАХУРИНОЙ Н. Н., БОЧАРОВА М. Н., ГРИГОРЬЕВА А. В., ЗАХАРЧЕНКО А. А., ЛЮБИНСКОГО Е. Г., МАЦУЯ В. М., НАДЕЖНОГО А. М., ПОДТАБАЧНОГО В. А., СОЛОМЕНЦЕВА Г. И., ТАРАСЕНКО А. Н.



— 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

Ордена Трудового Красного  
Знамени издательство «Наука».

Адрес редакции:  
117049, Москва, ГСП-1,  
Мароновский пер.—26.  
Тел. 238-24-56, 238-26-33

Сдано в набор 13.05.86.  
Подписано к печати 16.06.86.  
Т—15204  
Формат 70×100<sup>1</sup>/<sub>16</sub>  
Офсет  
Усл.-печ. л. 10,32  
Усл. кр.-отт. 1365,3 тыс.  
Уч.-изд. л. 15,3  
Бум. л. 4

Тираж 51 000 экз. Зак. 1372  
Ордена Трудового Красного Знамени Чеховский полиграфический комбинат ВО «Союзполиграфпром» Государственного комитета СССР по делам издательства, полиграфии и книжной торговли. 142300 г. Чехов Московской области



## В следующем номере

Борьба с вирусными инфекциями не проста, а защита от них растений особенно трудна потому, что у растений нет иммунной системы, подобной иммунитету животных. Тем не менее фитовирусологи разрабатывают способы оздоровления культурных растений, которые, будучи внедрены в сельскохозяйственное производство, позволяют сохранить урожай.

На пути к безвирусному растениеводству.  
Интервью с И. Г. Атабековым



Моделирование на ЭВМ процессов сочинения музыки — это еще один шаг на пути к научному познанию глубинных закономерностей творчества. От первых музыкальных автоматов до современных компьютерных систем простирается этот путь.

Зарипов Р. Х. Компьютер в исследовании и сочинении музыки



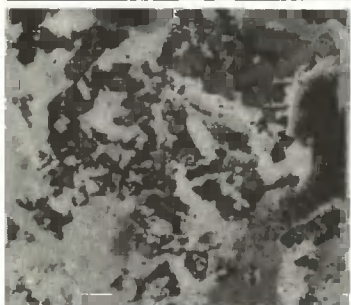
Хозяйственная деятельность людей становится одним из главных факторов изменения климата Земли. Выброс в атмосферу  $\text{CO}_2$  и других газов приводит к росту температуры, изменению режима осадков, сокращению площади морских льдов.

Будыко М. И. Антропогенное изменение климата



Необычный ландшафт увидели гидронавты через иллюминатор «Пайсиса» на глубине около 1,5 км. Поверхность пологих склонов оказалась покрытой чехлом черных рудных корок и железо-марганцевых конкреций.

Богданов Ю. А., Подражанский А. М. Руды на подводных горах



В космических снимках содержится много информации о земной поверхности. Но как ее правильно извлечь оттуда? Так же, как из спектров анализируемых в физических лабораториях образцов, — с помощью термодинамического подхода.

Бялтер Б. М., Егоров В. В. Термодинамика в дистанционном зондировании



Цена 80 к.  
Индекс 70/07

