

ISSN 0032 — 8/4X

1 ПРИРОДА

1979





РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор
академик
Н. Г. БАСОВ

Доктор физико-математических наук
Е. В. АРТЮШКОВ

Доктор биологических наук
А. Г. БАННИКОВ

Академик
Д. К. БЕЛЯЕВ

Академик
А. И. БЕРГ

Академик
Ю. В. БРОМЛЕЙ

Доктор биологических наук
А. Л. БЫЗОВ

Заместитель главного редактора
член-корреспондент АН СССР
В. М. ГАЛИЦКИЙ

Заместитель главного редактора
В. А. ГОНЧАРОВ

Член-корреспондент АН СССР
Б. Н. ДЕЛОНЕ

Доктор физико-математических наук
С. П. КАПИЦА

Академик
Б. М. КЕДРОВ

Доктор физико-математических наук
И. Ю. КОБЗАРЕВ

Член-корреспондент АН СССР
Н. К. КОЧЕТКОВ

Член-корреспондент АН СССР
В. Л. КРЕТОВИЧ

Академик
К. К. МАРКОВ

Доктор философских наук
Н. Ф. ОВЧИННИКОВ

Заместитель главного редактора
В. М. ПОЛЫНИН

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

Заместитель главного редактора
доктор биологических наук
А. К. СКВОРЦОВ

Доктор геолого-минералогических наук
М. А. ФАВОРСКАЯ

Заместитель главного редактора
кандидат технических наук
А. С. ФЕДОРОВ

Член-корреспондент АН СССР
В. Е. ХАИН

Член-корреспондент АН СССР
Р. Б. ХЕСИН

Академик
Н. В. ЦИЦИН

Доктор географических наук
Л. А. ЧУБУКОВ

Академик
В. А. ЭНГЕЛЬГАРТ

Доктор биологических наук
А. В. ЯБЛОКОВ



— 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. См. статью «Международная программа ЮНЕСКО «Человек и биосфера».

На первой странице обложки. Ранним утром можно наблюдать следы ночной активности обитателей пустыни. См. статью В. Е. Соколова, П. Д. Гунина «Репетекский заповедник — первый пустынный биосферный заповедник в СССР».

Фото В. Ф. Степанова.

На третьей странице обложки. Общий вид августинского монастыря св. Томаша в Старом Брно. См. заметку И. Сайнера «Герб Грегора Менделя».

На четвертой странице обложки. Герб Грегора Менделя, изображенный на потолке монастырской библиотеки.

Редакция рукописей не возвращает.

© Издательство «Наука»,
«Природа», 1979 г.

В НОМЕРЕ

Л. С. ПонTRYгин Оптимизация и дифференциальные игры	2
А. И. Опарин Проблема происхождения жизни	8
А. А. Трофимук, Н. В. Черский, В. П. Царев Газогидраты — новые источники углеводородов	18
В. М. Неронов, В. А. Гончаров Международная программа ЮНЕСКО «Человек и биосфера»	28
В. Е. Соколов, П. Д. Гунин Репетекский заповедник — первый пустынный биосферный заповедник в СССР	32
Ю. Г. Птушинский, А. Г. Наумовец, О. А. Панченко Электронные и адсорбционные явления на поверхности металлических монокристаллов	42
В. В. Ляхович Камни на значках	52
М. Б. Волошин Спектр чармония и взаимодействие кварков	54
Б. М. Келлер Загадки верхнего докембрия	66
С. В. Ошибкина К истории заселения европейского Севера	76
С. М. Гершензон Прыгающие гены	82

**ЛАУРЕАТЫ
НОБЕЛЕВСКОЙ
ПРЕМИИ 1978 ГОДА**

А. С. Боровик-Романов По физике — П. Л. Капица	93
П. Л. Капица Вязкость жидкого гелия при температурах ниже точки λ .	96
Е. М. Лифшиц Рождение физики квантовых жидкостей	99
Я. Б. Зельдович, Р. А. Сюняев По физике — А. Пензиас и Р. Вильсон	101
В. П. Скулачев По химии — П. Митчелл	103
О. Л. Поляновский По медицине — Д. Натанс, Г. Смит, В. Арбер	105

НОВОСТИ НАУКИ 108

В КОНЦЕ НОМЕРА

И. Сайнер
Герб Грегора Менделя 126

Оптимизация и дифференциальные игры

Л. С. Понтрягин



Лев Семенович Понтрягин, академик, заведующий отделом Математического института им. В. А. Стеклова АН СССР, профессор Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова. В топологии открыл общий закон двойственности, получил ряд результатов в теории гомотопий (классы Понтрягина). В теории колебаний главные результаты относятся к асимптотике релаксационных колебаний. Создатель математической теории оптимальных процессов, имеет фундаментальные результаты по дифференциальным играм. Почетный член ряда международных научных обществ и зарубежных академий. Герой Социалистического Труда, лауреат Ленинской и Государственных премий.

Вопрос о том, чем следует заниматься, стоит для математиков, быть может, острее, чем для специалистов в других областях знания. Математика, возникшая как чисто прикладная наука, и в настоящее время имеет своей основной задачей изучение окружающего нас материального мира с целью использования его для нужд человечества. В то же время она имеет свою внутреннюю логику развития, следуя которой математики создают понятия и даже целые разделы, являющиеся продуктом чисто умственной деятельности, никак не связанные с окружающей нас материальной действительностью и не имеющие в настоящее время никаких приложений. Эти разделы зачастую обладают большой стройностью и некоторого рода красотой. Однако такого рода красоты не могут служить оправданием их существования. Математика — не музыка, красоты которой доступны большому количеству людей. Математические красоты могут быть поняты лишь немногими специалистами. Создавая такие красоты, математики практически работают только на себя.

Невозможно, однако, утверждать, что обладающие внутренней стройностью, но лишённые приложений разделы математики не имеют права на существование.

Они составляют внутреннюю ткань науки, иссечение которой могло бы привести к нарушению всего организма в целом. Кроме того, оказывается, что некоторые отделы математики, лишённые приложений в течение многих веков, позже находят эти приложения. Классическим примером служат кривые второго порядка, созданные в древности из внутренних потребностей науки и нашедшие лишь позже очень важное применение. С другой стороны, некоторые разделы математики, занимающиеся лишь внутренними проблемами, постепенно вырождаются и почти наверняка оказываются ни для чего ненужными. В этой обстановке вопрос о выборе тематики исследований становится для математиков весьма тревожным.

Я считаю, что если не все, то, во всяком случае, многие математики должны в своей работе обращаться к первоисточкам, т. е. к приложениям математики. Это необходимо как для того, чтобы оправдать свое существование, так и для того, чтобы влить новую свежую струю в научные исследования.

Исходя из этих соображений, а также находясь под некоторым давлением руководства Стекловского института¹, я и трое моих сотрудников — Е. Ф. Мищенко, Р. В. Гамкрелидзе, В. Г. Болтян-

ский — решили заняться поиском прикладных тем для своих исследований: в теории колебаний, точнее в математическом изучении электронных приборов, и в теории регулирования, которую теперь разумнее назвать более обще — теорией управления. Мы заранее исключили из своего рассмотрения математические задачи, уже сформулированные техниками, а основали свои поиски на ознакомлении с техническими проблемами, устанавливая контакты с многими специалистами в области техники. При этом мы не просто стремились найти приложения математики, но старались найти новые постановки математических задач, интересные с точки зрения самой математики.

Среди многих технических задач, с которыми мы ознакомились, была следующая: некий специалист в области авиации сказал: «Если один самолет преследует другой самолет, то пилот преследователя, конечно, умеет это делать, но интересно было бы иметь теорию, быть может, даже такую, которая позволяла бы осуществлять преследование при помощи автомата». Мы все понаслышке знаем теперь, что существуют самонаводящиеся ракеты и там, конечно, есть какая-то теория преследования. Но самонаводящаяся ракета, вероятно, обладает таким перевесом в скорости и маневренности над самолетом, что теория, на которой основано ее поведение, может быть очень грубой. Задача же о преследовании одного самолета другим, насколько я знаю, до сих пор не решена.

Мы рассмотрели упрощенные модели преследования, которые составляют предмет так называемой теории дифференциальных игр. Слово «игра» указывает на то обстоятельство, что будущее поведение каждого из самолетов неизвестно: оно зависит от воли пилотов. «Дифференциальной» эта игра называется потому, что закон движения самолета описывается дифференциальными уравнениями.

Хочу сразу обратить внимание на странность этой задачи, которая на первых порах казалась нам совершенно неприступной. В самом деле, самолет-преследователь очевидным образом не должен лететь в то место, где в настоящее время находится убегающий самолет, так как последний, конечно же, уйдет с того места, где он сейчас находится. В то же время

бессмысленно предполагать, что убегающий самолет движется по прямой: он может повернуть, причем неизвестно куда.

Для того чтобы применить математику к решению какой-либо технической задачи, прежде всего надо дать математическое описание последней. В данном случае мы начнем с математического описания движения самолета. При этом, как всегда это делают математики, мы будем отвлекаться от излишней конкретности, стремясь уловить лишь главные характерные черты технической задачи, подлежащей решению. Мы будем рассматривать самолет как точку, движущуюся в пространстве. Известно, что положение точки в пространстве определяется тремя координатами. Их мы обозначим через x_1, x_2, x_3 . Так как точка (самолет) движется, то она имеет и некоторую скорость-вектор. Компоненты этого вектора мы обозначим через x_4, x_5, x_6 . Величины x_1, x_2, \dots, x_6 определяют состояние движущейся точки в данный момент времени и называются ее фазовыми координатами. Для того чтобы отвлекаться от излишней конкретности, мы будем рассматривать объект, состояние которого в данный момент времени определяется не шестью, а произвольным числом фазовых координат. Их мы обозначим через

$$x_1, x_2, \dots, x_n.$$

Совокупность всех этих величин вместе принято обозначать одной буквой, так что мы полагаем в общем случае

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_n).$$

Здесь x — есть точка фазового пространства, или фазовый вектор нашего объекта. Произвольную фазовую координату объекта обозначают через x_i , где i может принимать любое значение: $i = 1, 2, \dots, n$. Так как состояние объекта меняется со временем, то величина x_i также меняется со временем, и скорость ее изменения обозначается обычно через \dot{x}_i . Это есть производная величины x_i по времени t . Физическая закономерность поведения объекта, как правило, заключается в том, что скорость \dot{x}_i изменения фазовой координаты x_i нашего объекта однозначно определяется фазовыми координатами объекта x_1, x_2, \dots, x_n , что математически записывается в виде формулы:

$$\dot{x}_i = f_i(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (1)$$

Это значит, что \dot{x}_i есть функция величин x_1, x_2, \dots, x_n , т. е. может быть вычислена, если

¹ Математический институт им. В. А. Стеклова АН СССР.

величины x_1, x_2, \dots, x_n известны. Здесь мы имеем p неизвестных величин x_1, x_2, \dots, x_n , которые меняются со временем, т. е. являются функциями времени $x_i = x_i(t)$, и p дифференциальных уравнений, так что задачу можно решать математически, т. е. получить закономерность изменения состояния объекта со временем, найти x как функцию времени: $x = x(t)$.

При помощи уравнений вида (1) могут быть описаны весьма разнообразные объекты. Объекты могут быть не только механическими, но и другого рода; например, химический процесс может быть описан уравнениями типа (1). В этом случае массы различных веществ, входящих в реакцию, являются фазовыми координатами x_1, x_2, \dots, x_n нашего объекта. Такими же уравнениями может быть описан и биологический процесс, например сосуществование на острове волков, зайцев и травы. Экономические закономерности также допускают описание при помощи системы уравнений типа (1).

Приведенное здесь описание движения самолета не содержит главного для нас элемента. В самолете сидит пилот, который по своей воле может менять закономерность его движения, приводя в действие рули управления. Так, пилот может менять тягу двигателя, положение хвостового руля, положение закрылков. Положение каждого из элементов управления определяется некоторым числом. Все эти числа мы обозначим через u_1, u_2, \dots, u_r , и их совокупность обозначим одной буквой, положив $u = (u_1, u_2, \dots, u_r)$. Здесь u есть вектор, компоненты которого определяют положение рулей. Таким образом, движение самолета описывается не уравнениями (1), а уравнениями

$$\dot{x}_i = f_i(x, u), \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (2)$$

где в правую часть входит вектор управления u . Вектор управления u и меняется со временем по воле пилота и потому является заданной функцией времени: $u = u(t)$. Таким образом, уравнения (2) в действительности имеют вид:

$$\dot{x}_i = f_i(x, u(t)), \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (3)$$

где $u(t)$ есть конкретно осуществляемое в течение времени управление объектом. Систему уравнений (3) уже можно решать.

Следует отметить одно важное обстоятельство. Величины u_1, u_2, \dots, u_r , определяющие положение рулей, не могут быть произвольными. Так, если u_1 есть величина тяги двигателя, то ясно, что она может меняться лишь в некоторых пределах от

0 до некоторой величины a , $0 \leq u_1 \leq a$. Точно так же хвостовой руль может поворачиваться лишь в определенных пределах, так что, если u_2 есть угол его поворота, то он удовлетворяет некоторым неравенствам $-b \leq u_2 \leq b$. Чтобы отвлечься от излишней конкретности, мы можем просто сказать, что вектор u не есть произвольный вектор r -мерного пространства, а принадлежит некоторому заданному множеству Ω этого пространства. Система дифференциальных уравнений (2) вместе с заданным множеством Ω дает математическое описание возможностей поведения управляемого объекта. Такой объект мы будем называть управляемым, поскольку поведение его зависит от того, какой функцией $u(t)$ времени t является управление u и объекта.

Для того чтобы начать решать задачу о преследовании одного самолета другим самолетом, мы должны были бы и второй самолет описать в виде управляемого объекта, а затем точно формулировать задачу преследования. Но, как я уже сказал раньше, сама игровая постановка задачи содержит в себе настолько большую странность, что мы предпочли вначале попытаться решить другую задачу, в которой элемент игры отсутствует. Мы предположили, что второй объект неподвижен, или, говоря в терминах самолета, речь стала идти о том, чтобы привести самолет из одного состояния в другое в кратчайшее время.

Математически эта задача формулируется так. В начальный момент времени задается некое исходное фазовое состояние объекта, которое мы обозначаем через x^0 . Кроме того, имеется какое-то другое фазовое состояние объекта x^1 . Если, управляя объектом каким-нибудь способом, мы можем перевести его из фазового состояния x^0 в фазовое состояние x^1 , то возникает задача о том, каково должно быть управление, которое переводит объект из фазового состояния x^0 в фазовое состояние x^1 в кратчайшее время. Это есть задача оптимизации на быстроедействие. Получаемое в результате решения этой задачи управление $u(t)$ называется оптимальным в смысле быстрогодействия, а само движение объекта оптимальным движением в смысле быстрогодействия. Если в процессе движения объекта меняется не только время, но и какая-либо другая величина, представляющая для нас особый интерес, например расходуется топливо, то можно поставить вопрос об оптимизации расхода топлива при переходе из состояния x^0 в состояние x^1 . Такая задача весьма важна, например, при рассмотрении перехода космического ко-

рабля с одной орбиты на другую, где минимальность расхода топлива играет огромную роль.

Сформулированную таким образом задачу оптимизации могло бы решать вариационное исчисление, если бы не было ограничения на управляющий вектор u , т. е. если бы вектор u был произвольным вектором. То обстоятельство, что вектор u принадлежит заданному множеству Ω , сразу выводит сформулированную задачу оптимизации из круга тех, которые способны решать классическое вариационное исчисление. Задачи, сформулированные в классическом вариационном исчислении, носят более общий характер и лишены той конкретности, которая возникла у нас благодаря рассмотрению технического объекта. Оказалось, что этот более конкретный характер вариационной задачи, связанный с тем, что мы рассматриваем управляемый объект, привел к новым возможностям решения самой задачи, дал возможность прийти к догадкам, к которым в общей вариационной задаче прийти было бы чрезвычайно трудно.

Формулирую теперь то решение, которое было получено нами для задачи на быстродействие. Вводятся вспомогательные величины $\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_n$ числом n , совокупность которых обозначается одной буквой

$$\psi = (\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_n),$$

где ψ есть вектор с n компонентами $\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_n$. Составляется вспомогательная величина

$$H = \psi_1 f_1(x, u) + \psi_2 f_2(x, u) + \dots + \psi_n f_n(x, u) = H(\psi, x, u). \quad (4)$$

Сразу видно, что величина H зависит от трех векторов ψ, x и u , что и выражено в правой части последнего равенства. Новая вспомогательная величина (4) была обозначена через H потому, что нужные для нас уравнения, получаемые из нее, очень похожи на уравнения Гамильтона, всем известные из механики. Они суть следующие:

$$\begin{aligned} \dot{x}_i &= \frac{\delta H(\psi, x, u)}{\delta \psi_i}, \\ \dot{\psi}_i &= - \frac{\delta H(\psi, x, u)}{\delta x_i}. \end{aligned} \quad (5)$$

Полученная таким образом система (5) состоит из $2n$ дифференциальных уравнений. В них входят неизвестные функции $x_1, x_2, \dots, x_n, \psi_1, \psi_2, \dots, \psi_n, u_1, u_2, \dots, u_n$ т. е.

число неизвестных функций равно $2n + r$. Таким образом, система эта неполна, решать ее невозможно.

Эта система дополняется одним условием: управляющий вектор u должен выбираться так, чтобы при любых фиксированных значениях ψ, x функция $H(\psi, x, u)$ достигала своего максимума при этом значении u . Дополненная этим условием система уравнений (5) уже является полной, и именно эта система соотношений должна решаться при отыскании оптимального по быстродействию решения задачи. Этот результат является доказанной математической теоремой, и он был назван принципом максимума². Задачи на оптимизацию какой-либо другой величины, а не времени, например расхода горючего, решаются очень похожим образом. Целью движения объекта мы считаем определенное его фазовое состояние x^1 , т. е. прибытие точки в определенное место с определенной скоростью. Принцип максимума годен, однако, и для решения других задач; например, целью может служить прибытие в определенное место с произвольной скоростью.

Если управляющий вектор u может принимать произвольные значения, а не связан условием принадлежности ко множеству Ω , то из условия максимальности функции $H(\psi, x, u)$ по переменному u следует, что все частные производные этой функции по переменным u_1, u_2, \dots, u_r равны нулю, т. е. должны быть выполнены r соотношений:

$$\frac{\delta H(\psi, x, u)}{\delta u_j} = 0, \quad \psi_i = 1, 2, \dots, r. \quad (6)$$

Этот результат вытекает из общих результатов классического вариационного исчисления, но в такой форме он никогда не был формулирован, так как в классическом вариационном исчислении вообще не рассматривались управляемые объекты. Следует отметить также, что и в случае произвольно меняющегося u соотношение (6) слабее, чем условие максимальности H по u .

Дадим теперь решение одной очень простой задачи оптимальности на быстродействие, которую можно получить при помощи принципа максимума, но невозможно

² В литературе он называется обычно принципом максимума Понтрягина (прим. ред.).

но получить методами классического вариационного исчисления.

Рассмотрим математический маятник, т. е. движение по прямой некоторой точки, которая притягивается к фиксированному положению 0 на этой прямой с силой, пропорциональной расстоянию до него. Прямую, по которой движется точка, примем за ось абсцисс, а положение 0 — за начало координат. Координату движущейся точки обозначим через x . Тогда уравнение движения этой точки запишется в виде

$$\ddot{x} + x = 0, \quad (7)$$

где \ddot{x} есть вторая производная координаты x по времени, т. е. ускорение движущейся точки. Одно уравнение (7) можно переписать в виде двух уравнений первого порядка

$$\begin{aligned} \dot{x} &= y, \\ \dot{y} &= -x. \end{aligned} \quad (8)$$

Пусть $x=x(t)$, $y=y(t)$ — произвольное решение системы (8). Для геометрического его изображения рассмотрим на фазовой плоскости переменных (x, y) точку $(x(t), y(t))$, движущуюся с течением времени t . Получаемая таким образом в результате движения точки по фазовой плоскости траектория называется фазовой траекторией. Для системы (8) она представляет собой окружность с центром в начале координат, по которой точка движется с постоянной угловой скоростью, равной одному радиану в секунду, причем движение происходит по часовой стрелке. Допустим теперь, что на нашу движущуюся точку x воздействует внешняя сила величины u , которая не может превосходить по модулю единицу. Тогда уравнение движения точки записывается в виде

$$\ddot{x} + x = u$$

или в виде системы уравнений:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= y, \\ \dot{y} &= -x + u. \end{aligned} \quad (9)$$

Система уравнений (9) описывает движение управляемого объекта, где u есть управляющий параметр.

Постараемся теперь привести точку, находящуюся в начальный момент времени в произвольном положении (x^0, y^0) , в состояние покоя, т. е. в начало координат фазовой плоскости, за минимальное время, используя для этого управляющий параметр u . Из принципа максимума непосред-

ственно следует, что при оптимальном управлении величина u может принимать только значение ± 1 . При $u = +1$ фазовой траекторией системы (9) является окружность с центром в точке $(1, 0)$, а при $u = -1$ фазовой траекторией системы (9) является окружность с центром в точке $(-1, 0)$. Зная, что при оптимальном значении $u = \pm 1$, мы должны теперь только указать, как меняется u между этими двумя значениями в процессе движения. Из принципа максимума легко вывести, что значение u зависит лишь от положения фазовой точки на фазовой плоскости; именно, вся фазовая плоскость разбивается на две части, в одной из которых u должно иметь значение $+1$, а в другой — значение -1 . Разбиение фазовой плоскости на две части осуществляется линией, которая состоит из полуокружностей с радиусом, равным единице, опирающихся как на диаметры на отрезки оси абсцисс, причем на положительной части абсциссы полуокружности обращены вниз, а на отрицательной части абсциссы полуокружности обращены вверх. Две полуокружности, примыкающие к началу координат, сами являются оптимальными траекториями, так что если начальная точка находится на одной из них, то движение в начало координат осуществляется по соответствующей полуокружности. Оказывается дальше, что если фазовая точка находится под линией раздела, то u должно иметь значение $+1$, а если над линией раздела, то значение u должно быть равно -1 . Легко вычертить траекторию оптимального движения точки, исходя из произвольного начального положения (x^0, y^0) . Начиная с какой-либо точки плоскости (x^0, y^0) , движение определяется уравнением (9) с определенным значением $u = \pm 1$, причем значение это переключается на противоположное, когда соответствующая траектория доходит до линии раздела переключения. В конце концов точка попадает на одну из полуокружностей линии раздела, примыкающих к началу координат, после чего точка движется по соответствующей полуокружности к началу координат.

В заключение я приведу один конкретный пример дифференциальной игры преследования.

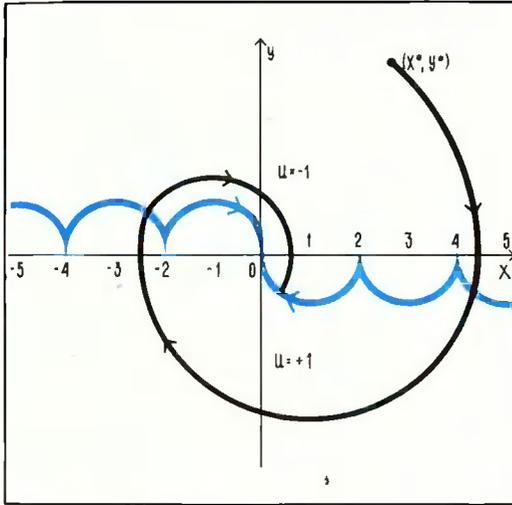
В пространстве R произвольной размерности n , где $n \geq 2$, рассмотрим две точки x и y , каждую из которых мы можем одновременно трактовать как вектор. Точку x будем считать преследующей точкой, а точку y — убегающей точкой. Процесс преследования считается законченным, когда x

совпадает с y . Движение этих точек описывается следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} \ddot{x} + \alpha \dot{x} &= u, \\ \ddot{y} + \beta \dot{y} &= v. \end{aligned} \quad (10)$$

Здесь u и v суть векторы пространства R . В нашей задаче они являются управляющими векторами. Их можно выбирать произвольными по направлению, но они ограничены по длине, именно для них выполнены условия:

$$|u| \leq \varrho, |v| \leq \sigma.$$



Изображение фазовой траектории (черная линия) на фазовой плоскости переменных (x, y) . Фазовая плоскость разбита на две части линией, которая состоит из полуокружностей с радиусом, равным единице. Над линией раздела управляющий параметр $u = -1$, под ней $u = +1$.

Числа $\alpha, \beta, \varrho, \sigma$ — положительные. Таким образом, уравнения (10) описывают движение точки x с линейным трением под действием внешней силы u , которая может быть выбрана произвольной по направлению, но не превосходит по величине числа ϱ . Аналогичное верно и для точки y .

Процесс преследования можно рассматривать с двух точек зрения. При первой мы отождествляем себя с преследователем. Наша задача заключается тогда в завершении преследования путем выбора надлежащего управления u , при этом в процессе преследования мы все время наблюдаем за поведением уходящего объекта. При второй точке зрения мы отождествляем себя с убегающим объектом, и наша

задача состоит в том, чтобы уйти от преследования, выбирая надлежащим образом управление v . При этом мы все время наблюдаем за преследующим нас объектом. Основной результат, имеющийся здесь, следующий:

1. Задача преследования всегда может быть решена положительно, т. е. преследование завершено, если выполнены два неравенства:

$$\frac{\varrho}{\alpha} > \frac{\sigma}{\beta}, \varrho > \sigma \quad (11)$$

2. Задача убегания имеет всегда положительное решение, если выполнено неравенство

$$\sigma > \varrho.$$

Оказывается, что при решении задачи преследования в случае, когда выполнены условия (11), мы всегда имеем наилучший способ поведения преследователя, т. е. имеется единственное оптимальное управление преследователя $u(t)$, отклонение от которого неизбежно увеличивает время преследования. При этом оптимальное управление преследователя $u(t)$ определяется постепенно с возрастанием времени t в зависимости от поведения убегающего объекта.

Принцип максимума является всеобъемлющим универсальным методом для решения задач оптимизации. Он нашел многочисленные применения в различных областях знания и оказал существенное влияние на развитие вариационного исчисления. В игровых задачах достигнуть результатов столь полного характера нам не удалось. Ими занимается сейчас большое количество математиков, среди которых следует отметить группу сотрудников Стекловского института и школу Н. Н. Красовского в Свердловске. Они достигли значительных результатов.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Понтрягин Л. С., Болтянский В. Г., Гамкрелидзе Р. В., Мищенко Е. Ф. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ. Изд. 2-е, М., 1969.

Красовский Н. Н. ТЕОРИЯ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ. М., 1968.

Проблема происхождения жизни

А. И. Опарин



Александр Иванович Опарин, академик, директор Института биохимии им. А. Н. Баха АН СССР, является основоположником современного учения о происхождении жизни. Ему принадлежит ряд монографий по проблеме происхождения жизни, одной из последних является книга: Материя — Жизнь — Интеллект. М., 1977, а также большое количество статей по различным вопросам биохимии.

А. И. Опарин — почетный президент Международного общества по изучению происхождения жизни, председатель Научного совета по эволюционной биохимии и проблеме происхождения жизни АН СССР, член многих зарубежных академий наук, почетный доктор различных иностранных университетов, Герой Социалистического Труда, лауреат Ленинской премии, лауреат премии Калинга (ЮНЕСКО).

Исполком Международного общества по изучению происхождения жизни (ИССОЛ) учредил золотую медаль имени А. И. Опарина за выдающиеся работы по проблеме происхождения жизни.

На протяжении многих тысячелетий человек стремился познать окружающий его мир и то место, которое он занимает в этом мире, на маленькой Земле или в большой Вселенной. Это стремление, отражая собой непреодолимую духовную жажду познания, вместе с тем является обязательным условием человеческого бытия. Человек живет не только материальными условиями своего существования, но создаваемым им миропониманием, которое всегда являлось и сейчас является основой для его практической деятельности как в труде, так и в общественных отношениях.

Долг любого ученого или деятеля культуры и состоит в том, чтобы помочь миллионам простых людей нашей планеты создать для себя мировоззрение, правильно отражающее окружающий нас мир.

Среди многих основных мировоззренческих проблем очень важное место принадлежит проблеме происхождения жизни, без правильного разрешения которой невозможно познать и самую сущность жизни.

Эта проблема привлекала к себе пылкий человеческий ум уже с незапамятных времен. Уже у древнейших известных нам общественных формаций, от которых мы отделены многими тысячелетиями, су-

ществовало стремление познать пути возникновения и начального развития живых существ.

Для иллюстрации этого можно привести изображение алебастровой вазы, найденной при раскопках в Уруке — одном из древнейших городов Шумера, в Южной Месопотамии, существовавшем уже в середине IV-го тысячелетия до н. э. (рис. 1). В самом низу, у основания вазы, можно видеть изображение волн — из них возникают растения, выше изображены животные, еще выше — люди и все это увенчивается изображением Иштар — богини жизни и плодородия.

Суждения о происхождении жизни можно найти также и в Вавилонских клинописях, египетских иероглифических надписях и в творениях индийских и китайских мудрецов.

В течение тысячелетий эти суждения основывались на всеобщем, категорическом убеждении в том, что многие живые существа могут внезапно самозародиться, непосредственно возникнуть из воды и всякого рода влажных и гниющих материалов. Это убеждение являлось результатом непосредственного, некритического восприятия окружающего мира, аналогично убеждению в том, что Солнце движется вокруг Земли. Самозарождение живых

существ представлялось древним народам самоочевидным фактом, безоговорочно принималось всеми. Однако его философское обоснование всегда трактовалось по-разному: либо как результат творческого акта духовного начала, либо как естественное явление, внутренне присущее самой материи. Таким образом, уже с древнейших времен проблема происхождения жизни являлась одним из важнейших плацдармов непримиримой идейной борьбы между материализмом и идеализмом.

Эта борьба находила свое яркое выражение уже у самых истоков нашей европейской культуры, у древнегреческих философов. Их наиболее ранние представители — милетцы, жившие в Малой Азии и, таким образом, воспринимавшие идеи месопотамских ирригаторов о непосредственном возникновении живых существ из ила и грязи оросительных каналов, подходили к вопросу о происхождении жизни со стихийно-материалистических позиций. Позднее идея самоформирования живых существ нашла свое яркое выражение и в учении великого Демокрита, который считал самозарождение вполне материальным процессом, происходившем без участия какого-либо мистического начала. Но исторически дело сложилось так, что последующее развитие идеи самозарождения, в основном, оказалось связанным не с материалистической «линией Демокрита», а с враждебной ей идеалистической «линией Платона».

Убеждение в том, что первичное возникновение живых существ является результатом воздействия духовной силы на безжизненную материю, господствовало как в начале нашей эры, так и в течение всего средневековья, отражая собой наивные представления людей того времени об окружающем их мире (рис. 2). Богословские авторитеты, безоговорочно принимавшие библейское сказание о сотворении мира и всего живого, видели в мнимом, внезапном самозарождении организмов проявление «божественного произвола» или, напротив, козней дьявола и подчиненных ему духов зла.

Только в эпоху Ренессанса вновь возрождается материалистическая трактовка явлений самозарождения, в фактическом существовании которого тогда еще никто не сомневался (Декарт).

Однако под влиянием все более расширяющегося познания живой природы вера в возможность внезапного самозарождения начинает все сильнее колебаться, хотя окончательно она была нацело

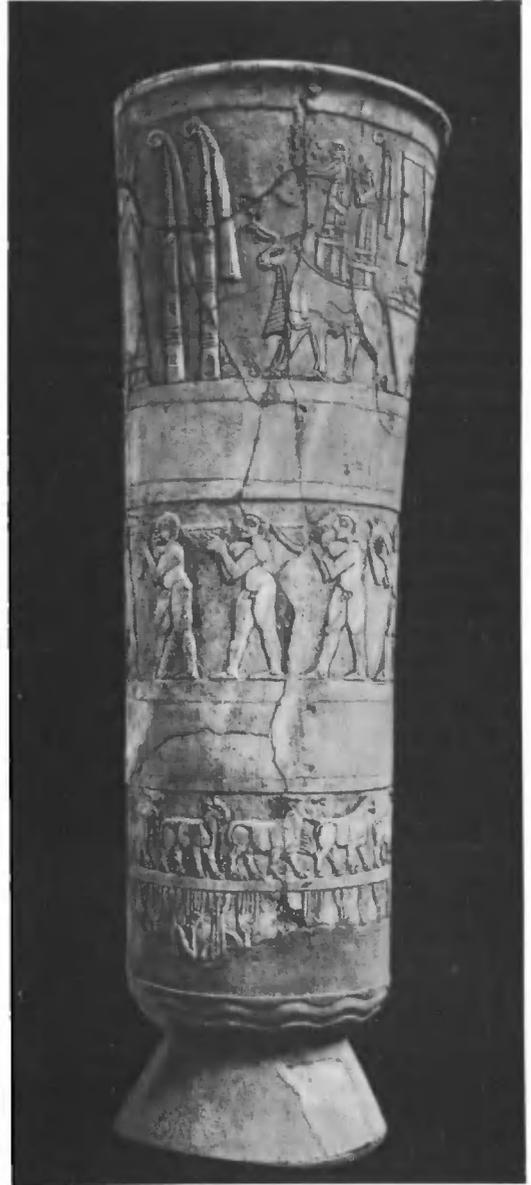


Рис. 1.
Урукская ваза с изображением возникновения жизни.



Рис. 2
Библейское изображение божественного происхождения жизни [Библия XVI в., Лион].

отвергнута наукой только в середине прошлого века благодаря классическим работам Пастера.

Тем не менее эти работы не решили проблемы происхождения жизни.

Связанный с ее философским обоснованием принципиальный спор между идеализмом и материализмом сохранил всю свою остроту и до наших дней, несмотря на то, что естествознанию двадцатого века удалось достигнуть невиданных ранее успехов в изучении живых организмов.

Но как бы глубоко и полно мы ни познали вещества, структуры и процессы, лежащие в основе организации современных живых тел, мы никогда, исходя только из одного этого, не сможем ответить на вопрос, почему эта организация является именно такой, какой она есть, в частности такой «целесообразной», т. е. организацией, при которой строение всех составляющих организм частей (молекул, органоидов, органов) столь совершенно приспособлено к выполняемым ими функциям, а весь организм как целое приспособлен к существованию в данных условиях внешней среды.

Этот вопрос, который может быть разрешен только в свете понимания путей происхождения жизни, и в наши дни явля-

ется одной из основных демаркационных линий, отделяющей идеалистические воззрения на природу жизни от ее материалистического понимания. Все религиозные учения причину целесообразности живого видят в творческой воле создателя, который породил жизнь согласно определенному плану и направил ее прогрессивное развитие к единой финальной цели, к конечному совершенству.

Такой точки зрения придерживаются сейчас не только теологи, но и представители других идеалистических учений (хोलлисты, финалисты, органицисты). Но при всем разнообразии этих учений общим для всех них является утверждение, которое может быть сформулировано следующим образом:

интеллект + материя → жизнь

Согласно этой формуле, причина совершенства и целесообразности организации жизни определяется не свойствами самой материи, а побуждением творящего жизнь интеллекта независимо от того, является ли этот интеллект богом, «мировым разумом» или представителем какой-то таинственной внеземной цивилизации, сознательно организовавшим когда-то жизнь на нашей планете.

Важно то, что и противопоставляющий себя идеализму механический материализм, который господствовал в естествознании в конце прошлого и в начале нашего века, также оказался неспособным рационально разрешить проблему происхождения жизни.

Стремясь познать живое существо как какой-то сложный механизм, машину, изучая отдельные входящие в организм вещества, структуры и совершающиеся в нем процессы, механический материализм очень много достиг в познании жизни. Но и он неизменно в полном бессилии останавливался перед решением проблемы происхождения жизни. Аналогия между организмом и машиной ничего в этом отношении не дала. Ведь машина не возникает сама собой в неорганическом мире. Она является плодом творческих усилий ее создателя, конструктора. Поэтому указанная аналогия неизбежно приводила даже материалистические настроенных ученых к сугубо идеалистическим выводам, к признанию того, что для возникновения жизни был необходим творящий жизнь интеллект (инженерный разум).

Нельзя признать удовлетворительными и современные попытки объяснить воз-

никновение жизни у нас на Земле какой-то «счастливой случайностью» или ее заносом из других миров, где она будто бы существует вечно, никогда не возникая, а лишь передаваясь от одного организма другому, как какое-то независимое от материи параллельное ей начало.

Существенным недостатком всех этих представлений является то, что они не послужили, да и не могут послужить основанием для рациональной исследовательской работы над научным решением проблемы происхождения жизни, а скорее лишь выражают стремление доказать ее полную неразрешимость объективными методами познания.

Выходом из этого идеалистического тупика является диалектико-материалистическое учение, утверждающее, что в мире нет ничего кроме постоянно движущейся и развивающейся материи и что жизнь является лишь особой формой этого движения, закономерно возникающей на определенном этапе эволюционного развития материи.

С этих позиций, в противовес указанной выше идеалистической формуле можно написать следующую:

материя → жизнь → интеллект.

Иными словами, жизнь всецело материальна по своей природе. Не она порождается интеллектом, а наоборот, сам интеллект возникает как результат прогрессивного развития материи.

Однако признание этого принципа требует раскрытия конкретных путей эволюции, приведших у нас на Земле к возникновению жизни, причем это раскрытие должно осуществляться на основе устанавливаемых естествознанием фактов.

Мы живем в мире, который непрерывно эволюционирует. Этот процесс эволюционного развития имеет поступательный характер и приводит к возникновению все новых, все более сложных, многообразных и богаче дифференцированных форм реальной действительности.

Вместе с тем он не может осуществляться одновременно и одинаково повсюду. В разных пунктах Вселенной, на разных объектах нашего звездного мира эволюционное развитие материи осуществлялось и осуществляется различными путями и в различных темпах. Жизнь является результатом далеко не всех многочисленных ветвей развития материи. Ее свойственны свои специфические качества и пути возникновения. Наша земная жизнь

является порождением лишь одной из многочисленных ветвей эволюции материи.

Специфическая особенность этой ветви состоит прежде всего в том, что в ее основе лежала прогрессивная эволюция все усложняющихся углеродистых соединений и формировавшихся из них многомолекулярных органических систем.

Пути этой эволюции мы и должны понять на основе того обширного фактического материала, которым располагает современное естествознание. Условно мы можем разделить этот путь на два основ-

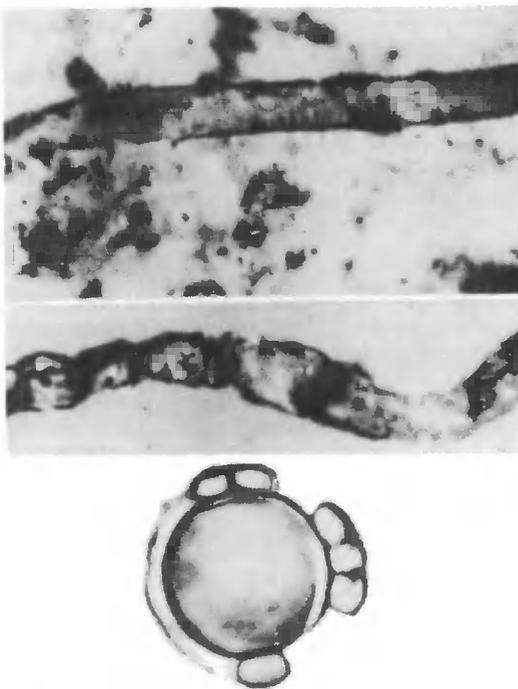


Рис. 3. Ископаемые, сохранившиеся в сланце Ганфлита [1,9 млрд лет].

ных этапа: 1) химический и 2) предбиологический.

Отдельные звенья первого из них мы можем обнаружить не только на нашей планете, но и на других объектах звездного мира.

Современные радиоастрономические данные позволяют нам установить наличие в межзвездном пространстве разнообразных углеродистых соединений, иной раз весьма сложных и многоатомных. Таким образом, мы сейчас уже имеем непосредственное доказательство возможности

абиогенного образования органических веществ. Однако механизм их синтеза и пути их эволюции при формировании различных космических объектов исследованы пока еще далеко не достаточно.

Очень многое в указанном отношении должно дать и уже дает изучение таких внеземных объектов, как планеты, Луна, кометы, и в особенности метеориты. Но нужно при этом иметь в виду, что формирование и последующая эволюция этих небесных тел существенно отличалась от эволюции Земли. Как сейчас стало очевидным, даже такие близкие ей по размерам и исходному материалу планеты, как Венера или Марс, эволюционировали иначе, чем Земля. Это тем более справедливо в отношении таких объектов, как Луна или метеориты. Здесь эволюция углеродистых соединений не привела к возникновению жизни, она остановилась на стадии химических превращений, что позволяет нам изучать эту стадию в первоначальном виде, не усложненную биологическими процессами.

В противоположность этому в земных условиях изучение химической эволюции органических веществ крайне затруднено мощными биологическими процессами биосферы. Они совершаются несравненно быстрее и энергичнее, чем исходные абиотические превращения органики, и, таким образом, сейчас они почти целиком заслоняют собою исходные формы химической эволюции углеродистых соединений. В связи с этим обнаруживаемые в земной коре органические вещества обычно принято считать исключительно биогенными, появившимися в результате распада живой материи.

Однако сейчас стало очевидным, что даже подвергшиеся глубокому распаду биологические продукты, даже полностью минерализовавшиеся органические вещества, могут в результате каталитических процессов, идущих на поверхности минеральных частиц земной коры, вновь синтезироваться уже чисто абиотическим путем (по примеру Фишер-Тропшевской реакции и аналогичного синтеза аминокислот из CO , H_2 и NH_3).

Как мы должны рассматривать эти вещества и самый процесс их образования? Конечно, их углеродные атомы уже побывали в живых существах и в этом отношении они биогенны, но процессы их вторичного синтеза носят абиотический характер и поэтому могут рассматриваться как процессы, аналогичные тем, которые происходили в земной коре еще в отсут-

ствие жизни. С этой точки зрения они представляют очень большой интерес для изучения эволюции органических веществ на пути к возникновению жизни.

К сожалению, исследование химической эволюции органических веществ в земной коре в природных условиях продвинулось сейчас еще очень недалеко. Здесь в основном изучается только распад биогенных органических веществ и делаются лишь весьма ограниченные попытки отыскать условия, в которых абиотические синтезы могут быть изучены вне зависимости от биологических процессов.

Однако за последние годы особое внимание ученых стали привлекать к себе древнейшие докембрийские отложения, возраст которых исчисляется тремя и более миллиардами лет. Полученные при их исследовании как палеонтологические (рис. 3), так и палеохимические данные оказались очень ценными для решения нашей проблемы.

Вместе с тем пути химической эволюции органических веществ сейчас изучаются главным образом на основании модельных опытов, вскрывающих термодинамические потенции этих веществ и возможную реализацию этих потенций в тех условиях, которые можно предполагать существовавшими на поверхности примитивной Земли, ее атмосфере или гидросфере.

В этом отношении уже получен громадный фактический материал, убедительно показывающий возможность абиотического синтеза органических веществ и их последующего накопления в различных локальных участках земной поверхности.

Эти обширные модельные опыты являются сейчас солидным основанием для полной уверенности в том, что любое органическое вещество — как мономерное, так и полимерное — способно было возникать абиотическим путем на той или иной «субвитальной территории» Земли, в тех или иных разнообразных внешних условиях. В частности, таким путем должны были синтезироваться и такие важные для жизни соединения, как аминокислоты, нуклеотиды и их полимеры.

Еще недавно казалось, что в этом отношении задача является, в основном, уже решенной. Однако сейчас остро встают вопросы о первичном возникновении более тонких особенностей внутримолекулярного строения биогенных органических веществ, особенностей, отсут-

ствующих у соединений, получаемых в модельных синтезах, в частности оптической изомерии и изотопной композиции углеродных атомов.

Исходные моменты, определившие эти особенности, скрыты, по-видимому, в еще плохо изученных нами физических условиях, существовавших когда-то на поверхности формирующейся Земли. Однако высокая чистота оптической асимметрии современной протоплазмы, скорее всего, возникла уже только на биологическом этапе эволюции.

В настоящее время перед исследователями проблемы происхождения жизни особенно настойчиво встает вопрос о путях перехода от химической эволюции к биологическим формам организации материи.

Еще недавно в научной литературе господствовало представление, согласно которому исходное образование живых систем осуществлялось в следующем порядке. Первоначально в водном растворе локальных участков Земли еще на молекулярном уровне возникали внутренние организованные и целесообразно приспособленные по своему внутримолекулярному строению к выполняемым ими в живом организме функциям частицы белковых веществ и нуклеиновых кислот. Самосборка их молекул будто бы и привела к формированию первичных организмов, наподобие того, как машина монтируется из заранее изготовленных деталей. Но в этом последнем случае «целесообразность» деталей, их приспособленность к работе целостной машины обуславливается тем, что они изготовляются по заранее составленному плану, чертежу машины.

Исследуя вопрос о возникновении жизни, мы не хотим исходить из такого рода плана творения. Но тогда мы должны ответить на вопрос, могли ли в первоначально водном растворе возникнуть молекулы белков или нуклеиновых кислот, обладавшие внутримолекулярным строением, хорошо приспособленным к осуществлению тех функций, которые они будут осуществлять в образовавшейся при их сборке целостной живой системе. Уже *a priori* это представляется невозможным.

Функциональная приспособленность частей организма (в том числе и биологически значимых молекул) могла возникнуть лишь в процессе эволюции, в результате действия естественного отбора, но не отдельных частей, а всей системы в целом.

На основании модельных экспериментов можно утверждать, что уже в примитивных абиотических условиях, например в условиях первичного термического

синтеза Фокса, могли образоваться высокомолекулярные протеиноиды, обладавшие известной внутримолекулярной структурой, которая обуславливала их некоторые биологически значимые функции, например каталитическую активность. В частности, некоторые из протеиноидов обладают, например, способностью катализировать реакцию декарбосилирования пировиноградной кислоты. Однако для самого протеиноида эта способность не имела никакого значения и, следовательно, не могла служить основанием для естест-

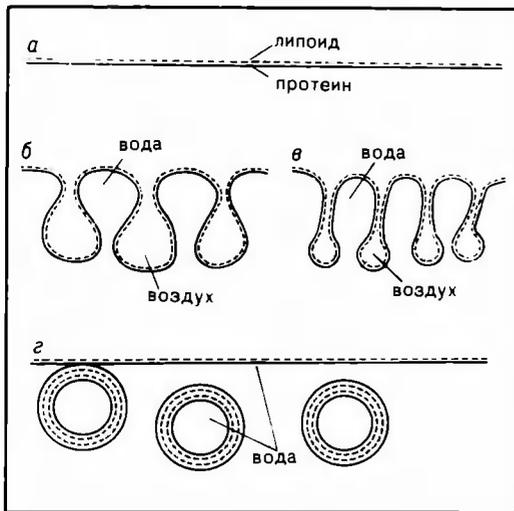


Рис. 4. Образование пузырьков Голдейкра [а — г — последовательные стадии].

венного отбора его молекул в простом водном растворе. Целесообразная приспособленность внутримолекулярного строения к выполнению определенных функций могла вывиться лишь в целостной, фазовообособленной системе в том случае, если катализируемая данным белком реакция являлась важным звеном в прогрессирувавшем обмене веществ системы, обуславливавшим ее динамическую устойчивость и возможно быстрое разрастание в данных условиях окружающей внешней среды.

Хочу пояснить сказанное на следующей аналогии. Согласно учению древнегреческого философа Эмпедокла, живые существа возникали следующим образом. Сперва образовывались отдельные органы: «руки без плеч», «глаза без лба» и т. д. Затем они срослись, и возник человек.

С современной дарвиновской точки зрения, абсурдность такого представления заключается в том, что не могли эволюционировать отдельные органы. Они могли возникнуть и прогрессивно развиваться только в целостном организме. Для самого глаза функция «видеть» не имеет никакого смысла, и поэтому глаз не может формироваться естественным отбором вне организма.

Это может происходить только в целостном живом существе.

Аналогично этому и для отдельно

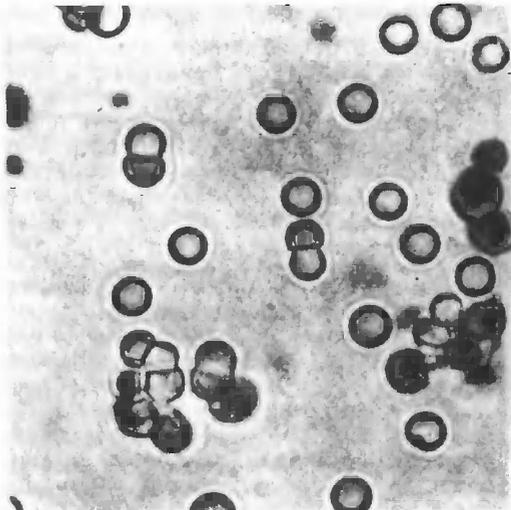


Рис. 5. Микросферы Фокса.

взятой белковой молекулы присущая ей каталитическая активность не может служить основанием для ее естественного отбора. Эта активность приобретает смысл только в целостной системе тогда, когда она обуславливает функцию обмена, способствующую более быстрому росту системы и ее динамической устойчивости в данных условиях существования.

Не может иметь биологического значения и естественный отбор нуклеиновых кислот просто в водном растворе их молекул, вне той функции, связанной с направленным синтезом белков, которому они несут в живом организме. В простом водном растворе те или иные изменения внутримолекулярного строения, даже вызывавшие ускорение образования полинуклеотида, могли определить только его значительное локальное накопление, образова-

ние в данном месте органических залежей, но не организмов.

В свете сказанного, давнишний спор о том, что сперва возникло — белки или нуклеиновые кислоты, — теряет всякий смысл. Первоначально на молекулярном уровне могли возникать лишь белково-нуклеиноподобные полимеры, лишенные какой-либо биологической «целесообразности» своего внутримолекулярного строения. Только при сочетании этих полимеров в многомoleкулярные фазовообособленные системы они, взаимодействуя между

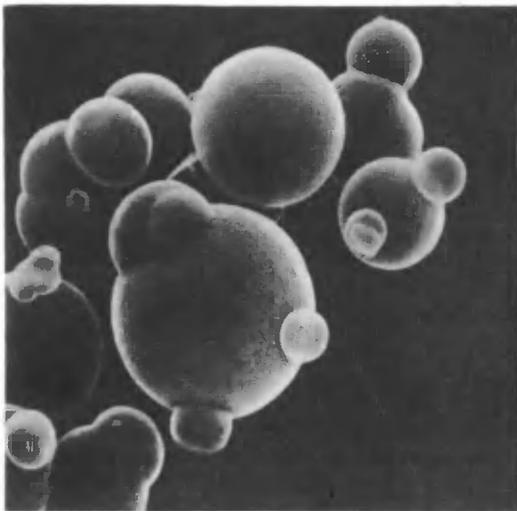


Рис. 6.
Маригранулы Эгами.

собой, взаимосогласовывали свое внутримолекулярное строение и биологические функции в результате естественного отбора, но не отдельных молекул, а целостных открытых систем.

Итак, естественному отбору, определившему собой всю предбиологическую, а затем и биологическую стадию эволюции, подвергались не те или иные способные к репликации полинуклеотиды и даже не возникавшие под их влиянием белки — ферменты, а целостные фазовообособленные системы (пробионты), а затем и первичные живые существа. Таким образом, не части определили собой организацию целого, а целое в своем развитии создало «целесообразность» строения частей.

Выделение многомoleкулярных фазовообособленных систем из однородного раствора органических веществ и сейчас

чрезвычайно широко распространено в природе, и мы с ним постоянно встречаемся в лабораторных условиях при работе с высокомолекулярными соединениями. Мы не только теоретически можем себе представить пути возникновения таких систем, но и экспериментально получить в лабораторных условиях разнообразные системы, многие из которых могли бы послужить нам моделями возникавших когда-то на земной поверхности образований.

Среди многих уже исследуемых в настоящее время такого рода моделей (пу-

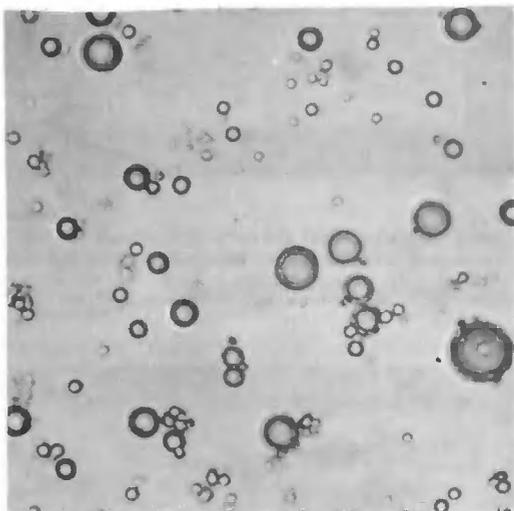


Рис. 7.
Коацерватные капли, состоящие из протамина и полифосфата.

зырьки Голдекра, микросферы Фокса, маригранулы Эгами и т. д. (рис. 4, рис. 5, рис. 6), для своих опытов я выбрал коацерватные капли Бунгенберг-де-Йонга, так как они очень легко приобретают свойства открытых систем. Они возникают при простом смешивании разнообразных полимеров, как естественных, так и искусственно полученных. При этом смешивании происходит неспецифическая самосборка полимерных молекул в многомoleкулярные фазовообособленные образования, отделенные от окружающей среды резкой границей раздела, но способных поглощать вещества и энергию внешнего раствора по типу открытых систем (рис. 7).

В наших опытах многие из этих веществ (в частности, макроэргические соединения), будучи поглощенными каплями, претерпевают в них различные превра-

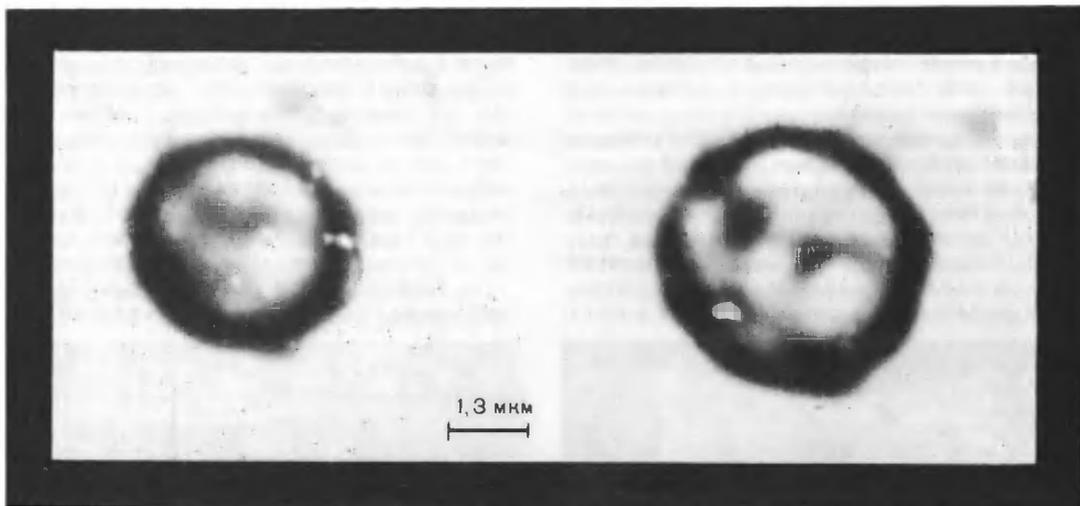
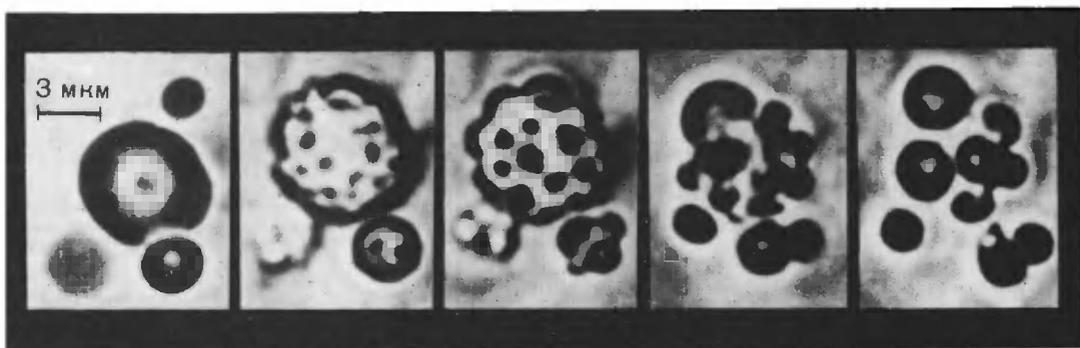


Рис. 8.
Рост коацерватной капли в результате ферментативного синтеза в ней полиадениловой кислоты [слева — 15 мин., справа — 2 ч. после начала синтеза, объем капли увеличился в 2 раза].

Рис. 9.
Последовательные стадии дробления коацерватной капли.



щения, в частности полимеризацию. Возникающие при этом полимеры входят в состав самих капель. За их счет капли заметно растут, а также дробятся на дочерние образования (рис. 8 и рис. 9). Очень существенно то, что скорость этих процессов (роста и дробления) в основном зависит от состава и внутреннего строения каждой индивидуальной капли. В результате этого разные капли, находящиеся в одном и том же растворе, растут с различной скоростью (рис. 10), а иногда, напротив, даже растворяются и исчезают.

Таким образом, нам удалось экспериментально продемонстрировать зачатки естественного отбора, той закономерности, которая в дальнейшем легла в основу всей

последующей эволюции такого рода систем на пути к возникновению жизни.

В недавно опубликованной очень обстоятельной книге австрийского профессора Э. Брода — «Эволюция биоэнергетических процессов», автор на основании громадного фактического материала по сравнительной биохимии прокариотов и эукариотов рисует последовательный ход эволюции обмена веществ и структурной организации в начальные периоды существования жизни. При этом он указывает, что исходные для биологической эволюции образования (он называет их зобионтами) должны были с самого своего возникновения ассимилировать вещества окружающего раствора, осуществлять метаболизм,

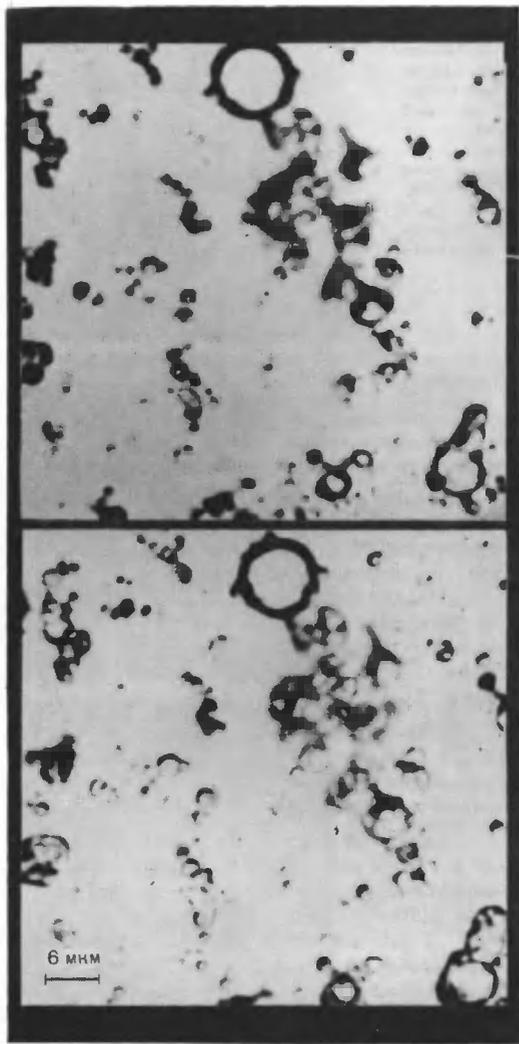


Рис. 10.
Дифференциация коацерватных капель по скорости роста.

расти и затем делиться, при этом наиболее совершенные из них постепенно получали преобладание для выживания в данной среде обитания.

«Этот тип отбора,— пишет далее Брода,— можно рассматривать как примитивный ранний вариант дарвиновской борьбы за существование».

Можно видеть, что наши коацерватные модели до известной степени уже удовлетворяют требованиям, поставлен-

ным Брода к исходной организации зобионтов.

Мне представляется, что дальнейшая работа в указанном отношении должна быть направлена, с одной стороны, к последовательному усложнению и совершенствованию коацерватных моделей, а с другой — к сравнительному изучению обмена веществ и организации современных наиболее примитивных форм жизни с целью заполнения того еще очень большого разрыва, который имеет место сейчас между искусственными моделями и наиболее примитивными живыми существами.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Опарин А. И. ВОЗНИКНОВЕНИЕ ЖИЗНИ НА ЗЕМЛЕ. М., 1957.

Опарин А. И. ЖИЗНЬ, ЕЕ ПРИРОДА, ПРОИСХОЖДЕНИЕ И РАЗВИТИЕ. М., 1968.

Бернал Дж. ВОЗНИКНОВЕНИЕ ЖИЗНИ. М., 1969.

Кальвин М. ХИМИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ. М. 1971.

Кеньон Д. и Стейнман Г. БИОХИМИЧЕСКОЕ ПРЕДОПРЕДЕЛЕНИЕ. М., 1972.

Руттен М. ПРОИСХОЖДЕНИЕ ЖИЗНИ. М., 1973.

Фокс С., Доде К. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ЭВОЛЮЦИЯ И ВОЗНИКНОВЕНИЕ ЖИЗНИ. М., 1975.

ОСНОВЫ КОСМИЧЕСКОЙ БИОЛОГИИ И МЕДИЦИНЫ, т. 1. М., 1975.

Опарин А. И. МАТЕРИЯ — ЖИЗНЬ — ИНТЕЛЛЕКТ. М., 1977.

Брода Е. ЭВОЛЮЦИЯ БИОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ. М., 1977.

Газогидраты — новые источники углеводородов

А. А. Трофимук, Н. В. Черский, В. П. Царев

Нефть и газ играют в настоящее время и, по всем оценкам, будут играть в ближайшие десятилетия решающую роль в топливно-энергетическом балансе человечества. Между тем запасы известных месторождений этих полезных ископаемых к этому времени будут уже в значительной мере истощены. Пополнить их можно за счет открытия месторождений нефти и газа в неосвоенных районах нашей планеты: в Мировом океане, на ледовых материках (Гренландии и Антарктиде), — а также за счет использования новых источников углеводородов — газовых гидратов. Так называют твердые соединения природного газа. Возможность существования газогидратных залежей в земной коре была доказана сравнительно недавно — в 1960-х годах. Проведенные в последние годы авторами этих строк расчеты показали, что благоприятные условия для образования гидратов природных газов существуют более чем на 27% суши, в основном в областях распространения мерзлых пород, и на 90% площади Мирового океана, что обусловлено благоприятным для их образования сочетанием температур и давлений.

Газовые гидраты — вещества, внешне похожие на лед, были открыты еще в начале XIX в.

В дальнейшем было установлено, что газовые гидраты представляют собой нестехиометрические (переменного состава), клатратные (с клеточной структурой) соединения газов с водой. Их состав описывается формулами $M \cdot 6H_2O$ и $M \cdot 17H_2O$, где M — молекулы гидратообразователей, веществ с температурой кипения ниже $+60^\circ C$, не вступающих в химические реакции с водой. Как и у льда, каркас решетки гидратов построен молекулами воды. Однако размеры полостей в каркасе значительно больше, чем у льда, и равны 4,8—6,9 Å. В результате заполнения полостей

ажурного каркаса льдоподобной решетки молекулами гидратообразователей и образуются газовые гидраты.

И по физическим свойствам, и внешне гидраты похожи на лед, но могут существовать в области как положительных, так и отрицательных температур.

Гидраты имеют в десятки раз меньше равновесные давления паров по сравнению с другими конденсированными фазами, например сжиженным газом (табл. 1).

Гидраты могут образовываться при температурах выше критических для гидратообразователей, т. е. в тех условиях, когда сжижение газа невозможно.

Упругость паров воды над гидратами в 1,5—2 раза меньше, чем надо льдом. Теплота образования и разложения составляет 100—120 ккал/кг.

В одном объеме гидрата может содержаться до 200 объемов газа. Следовательно, гидраты имеют высокие концентрации газа при низких равновесных давлениях.

Большинство данных о строении и условиях образования газогидратов были получены в 30-х гг., когда выпадение гидратов стало частой помехой для нормальной работы газопроводов, скважин и некоторых заводских установок. В это время усилия исследователей были направлены на предупреждение образования и разработку способов разрушения гидратных пробок в трубопроводах. Начиная с 60-х гг. в Нидерландах, США, ФРГ разворачиваются исследования структуры и термодинамики газовых гидратов.

Примерно в то же время советские специалисты высказали предположение, что при определенных термодинамических условиях (температуре до 295 К, давлении до 250 атм) в земной коре могут образо-



Андрей Алексеевич Трофимук, академик, первый заместитель председателя Сибирского отделения АН СССР, директор Института геологии и геофизики Сибирского отделения АН СССР. Основные труды связаны с поисками и разработкой нефтяных и газовых месторождений Волго-Уральской области, Сибири и Дальнего Востока. Разработал метод диагностики нефтяносных толщ, объемно-генетический метод оценки прогнозных запасов нефти и газа, обосновал методику поисков месторождений нефти и газа применительно к условиям Сибири и Дальнего Востока. Автор более 160 научных работ. Лауреат Государственных премий СССР (1946, 1950), Герой Социалистического Труда. Монографии (с соавторами): Миграция рассеянных битумоидов. Новосибирск, 1971; Геология нефти и газа Западной Сибири. М., 1975 и др.



Николай Васильевич Черский, член-корреспондент АН СССР, председатель Президиума Якутского филиала СО АН СССР, директор Института физико-технических проблем Севера, заведующий отделом газовых гидратов этого Института, специалист в области механики горных пород и природных флюидов, а также геологии нефти и газа. Автор многочисленных работ по бурению, разработке нефтяных и газовых месторождений, формированию ресурсов нефти и газа.



Владимир Петрович Царев, доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией того же института, специалист в области геологии нефти и газа. Автор работ по физической химии и геологии газовых гидратов, формированию залежей нефти и газа и оценке перспектив нефтегазоносности северных и восточных районов СССР. Монография: Особенности формирования, методы поиска и разработки скоплений углеводородов в условиях вечной мерзлоты. Якутск, 1976.

ываться залежи природных газов в твердом газогидратном состоянии¹.

Располагая примерными промышленно-геофизическими характеристиками пород, заполненных гидратами, группа сибирских геологов провела анализ геофизических материалов в районах, где, по предварительным предположениям, могли бы существовать газогидратные залежи. В результате было выявлено около 30 таких площадей. Оказалось, что при закачке в газогидратную залежь метилового спирта, который обеспечивает разложение гид-

ратов и получение газа в свободном состоянии, продуктивность месторождения возрастает более чем на порядок².

Было доказано также, что газогидратные залежи (природные образования гидратов с концентрациями газа более 10 м³ на 1 м³ породы) могут образовываться из скоплений обычного газа, оказавшегося в зоне гидратообразования (ЗГО) в результате похолодания климата и понижения пластовых температур, а также

¹Основные черты геологического строения и перспективы нефтегазоносности Восточной Якутии. Якутск, 1961.

²Макогон Ю. Ф., Требин Ф. А., Трофимук А. А., Царев В. П., Черский Н. В. Обнаруженные залежи природного газа в твердом (гидратном) состоянии. — Доклады АН СССР, 1971, т. 196, № 1.

Таблица 1
Давление газа над конденсированными средами

Газ	Температура, °С	Давление паров газа, атм	
		над гидратами	над жидким газом
CH ₄	-82	1,5	45,6
C ₃ H ₈	0	1,7	4,68
CO ₂	0	12,3	34,4
CO ₂	-50	0,057	6,75
N ₂	-147	1,9	33,75

при аккумуляции рассеянных углеводородов.

На материках площадь ЗГО сравнительно невелика и примерно соответствует областям развития мерзлых пород. Максимальные мощности ЗГО составляют здесь 1800—2000 м, а наиболее часто встречаются ЗГО с мощностью 700—1000 м. Механизм образования газогидратной залежи на материке показан на одной из наших схем. Она составлена по данным, полученным на сравнительно хорошо изученном Мессояхском месторождении (север Красноярского края).

Процессы формирования ЗГО и газогидратных залежей тесно связаны с древними и современными ледниковыми покровами. Хотелось бы коротко рассказать о существенном их влиянии на формирование крупных зон нефтегазонакопления вообще и газогидратных залежей в частности³.

Известно, что протяженность и толщина древних ледниковых покровов не уступала размерам современных покровных ледников Гренландии и Антарктиды. Образование 3—4-километровой толщи льда вызывало увеличение геостатических нагрузок в подстилающих толщах пород на 270—360 кг/см². А это приводило к отжатию из тонкодисперсных (малопроницаемых) пород флюидов (вод, нефтей и газов) в горизонты с хорошими коллекторными свойствами. В этих горизонтах под воздействием дополнительной нагрузки уменьшался объем порового пространства и происходило отжатие и перемещение флюидов из зон, перекрытых льдом, к краевым участкам ледников.

В результате перемещения ледникового покрова на участках, перекрытых льдом, происходило частичное разрушение залежей нефти и газа вследствие интенсивного их «промыывания» при движении вод и перемещение углеводородов в направлении движения ледника. В краевой зоне ледяного щита принесенные углеводороды пополняли существующие залежи и образовывали новые месторождения нефти и газа.

В течение одного цикла (наступления и отступления ледника) могло переместиться до 10% углеводородов, находившихся в залежах. В пределах Европы и Северной Америки только в течение четвертичного периода (последние 1—2 млн. лет) число таких циклов было не менее 5—8. Следовательно, покровные оледенения оказали существенное влияние на перераспределение запасов углеводородов. В результате их воздействий произошло перемещение нефти и газа из зон, перекрытых льдом, к краевым участкам ледников. Поэтому повышенными ресурсами (при прочих равных условиях) углеводородов должны обладать участки, которые соответствуют краевым зонам древних ледниковых щитов, а также современных — в Гренландии и Антарктиде.

Формирование оледенений в истории Земли периодически происходит на протяжении более чем 800 млн лет. Известно два глобальных оледенения в пермском и карбоновом периодах (200—300 млн лет назад) и одно в четвертичное время. О масштабах распространения оледенений и ЗГО в прошлом и в настоящее время можно судить по данным, приведенным в таблице 2. Одновременно с распространением оледенений происходило увеличение площадей и мощностей ЗГО. В период наибольшего похолодания в четвертичное время ЗГО были распространены примерно на половине площади суши. О возможных масштабах влияния оледенений на перераспределение запасов нефти и газа можно составить представление, рассмотрев таблицу 3. В пределах Северной Америки, Европы и Западной Сибири подавляющая часть запасов углеводородов сосредоточена в зонах четвертичных оледенений.

Рассмотрение соотношений положений фронтов четвертичных и более древних покровных ледников в пределах Северной и Южной Америки, Европы, Северной Азии, Австралии показывает, что к пограничным областям оледенений приурочены крупные зоны нефтегазонакопления.

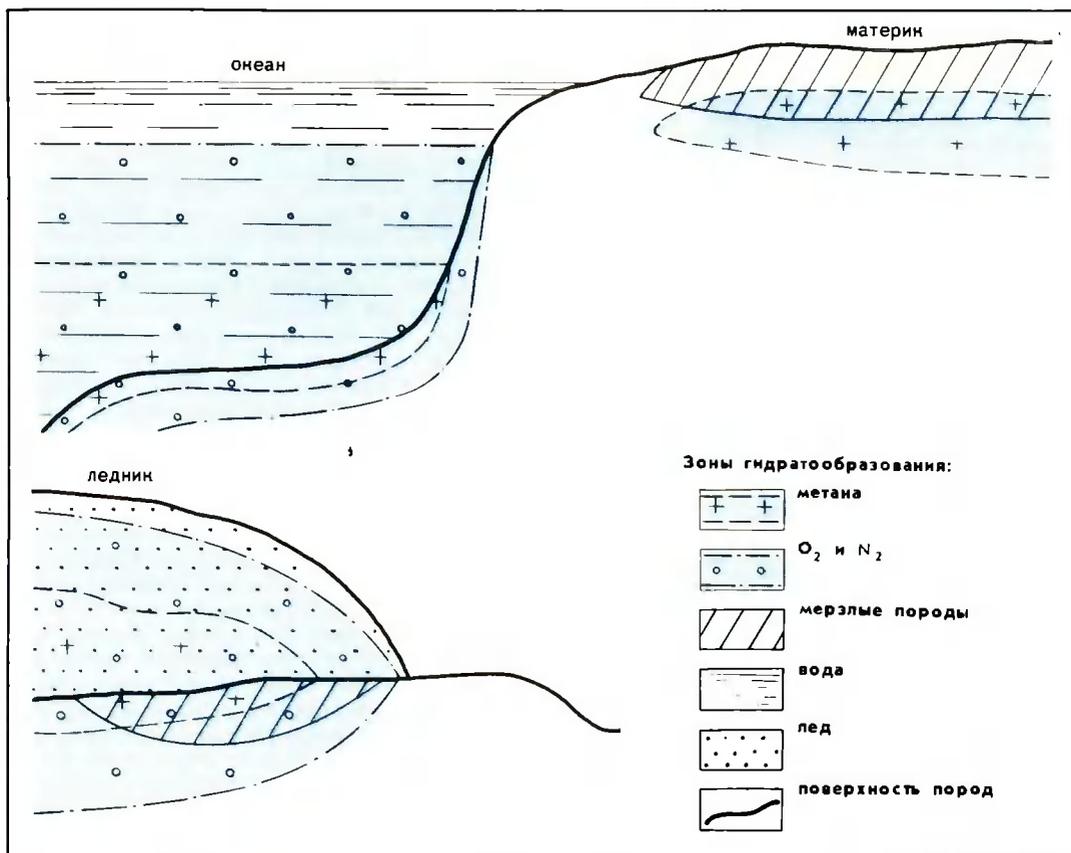
³Трофимук А. А., Черский Н. В., Царев В. П., Соловьев А. А. Влияние оледенений на распределение углеводородов в земной коре.— «Доклады АН СССР», 1974, т. 218, № 2.

Учитывая влияние оледенений на формирование зон нефтегазоаккумуляции, можно сделать приближенные оценки перспектив нефтегазоносности Антарктиды — материка, где влияние покровного оледенения должно было проявиться наиболее ярко, так как в течение длительного времени начиная с кайнозоя и вплоть до настоящего времени здесь существует мощный ледник и параллельно с ним зоны гидратообразования.

Результаты глубоководного бурения «Гломара Челленджера» в этом районе

ральной части материка в районе Южного полюса и, возможно, в процессе развития достиг Антарктического материкового шельфа. В период максимального развития ледники перекрывали весь шельф. Во время сокращения покрова шельфы полностью освобождались от льда. Таким образом, перемещение льда происходило в основном в пределах шельфа. При максимальном сокращении покрова обнажались только сравнительно небольшие участки материка.

Выделяется две стадии формирова-



Распространение зон гидратообразования на Земле: в океане; на материках в зонах развития мерзлых пород; на участках суши, покрытых ледником.

дают основание считать, что ледниковый щит возник около 20—25 млн лет назад, а максимальную площадь имел 5 млн и 14 тыс. лет назад. Гляциологи полагают, что лед начал растекаться из купола, первоначально сформировавшегося в цент-

ния ледникового покрова. На первой — лед двигался из центральных частей материка к шельфу, а на второй — перемещался только край покрова в пределах шельфа.

На первой стадии развития оледенения поток подземных флюидов, в том числе и углеводородов, был направлен из центральных частей материка в сторону побережья к шельфу и материковому склону. Поэтому перспективы открытия залежей углеводородов увеличиваются при

Таблица 2

Масштабы распространения ЗГО и ледниковых покровов на Земле (средняя мощность ЗГО на материках 700 м, в Мировом океане—300 м)

Время	Покровные ледники			Зоны гидратообразования (ЗГО)				
	Площадь распространения, км ²	Площадь распространения, %	Объем льда, км ³	на материках (Северное полушарие)			В Мировом океане	
				Площадь, км ²	Площадь, %	Объем пород в ЗГО, км ³	Площадь, км ²	Объем пород, км ³
200—300 млн лет назад	70 · 10 ⁶	—	175 · 10 ⁶	—	—	—	—	—
1—2 млн лет назад	45 · 10 ⁶	30	60 · 10 ⁶	75 · 10 ⁶	50	52 · 10 ⁶	~333 · 10 ⁶	~100 · 10 ⁶
Современный период	15 · 10 ⁶	9	24 · 10 ⁶	40 · 10 ⁶	27	28 · 10 ⁶	~335 · 10 ⁶	100 · 10 ⁶

Таблица 3

Доля от мировых запасов нефти и газа в зонах влияния четвертичных оледенений Северного полушария

Регион	Границы распространения		Доля запасов в зонах развития оледенений, %	
	покровных оледенений	ЗГО	нефти	газа
Северная Америка	38—46°	35°	95	40
Западная Европа	49°	50°	95	90
Восточная Европа		47°	—	40
Западная Сибирь	59°	56°	80	98
Всего по полушарию	50°	45°	60*(8**)	60

*Без СССР.

**Без СССР и месторождения битумов и тяжелой нефти Атабаска.

переходе от центральных зон к краевым, шельфу, материковому склону и подножью. Кроме того, в пределах материковой части, очевидно, сохранились газогидратные залежи, которые значительно более устойчивы к разрушению, чем обычные газовые.

В течение второй, наиболее длительной стадии развития ледникового покрова, направление движения вод, нефти и газа при воздействии толщи льда не изменилось. Флюиды перемещались так же, как и на первой стадии, к краевым участкам материка, шельфу, а также к материковому склону и подножью. Это еще более увеличивает перспективы открытия залежей нефти и газа в этих зонах.

Следует подчеркнуть, что на материковом склоне и подножье в горных породах, начиная с поверхности дна и до глубин 250—300 м, существуют очень благоприятные условия для образования гидратов. Здесь же выходят на поверхность толщи горных пород, развитых на материке, а следовательно пластовые воды, содержащие большие количества растворенных и свободных газов, перетекают в океан. Попадая в ЗГО, эти газы превращаются в гидраты и образуют газогидратные залежи. Под толщами горных пород, заполненных газовыми гидратами и непроницаемыми для свободного газа, могут образовываться и существовать скопления свободного газа. При проведении глубоководного бурения в прибрежных водах Антарктиды были обнаружены газовые скопления на небольшой глубине от поверхности дна. Возможно, они образовались с помощью описанного механизма.

Открытие газогидратных залежей и выделение зон гидратообразования в толще осадочного чехла материков невольно привлекало внимание исследователей к природным слоям Мирового океана, имеющим еще более благоприятную термодинамическую обстановку для формирования крупных скоплений газогидратов.

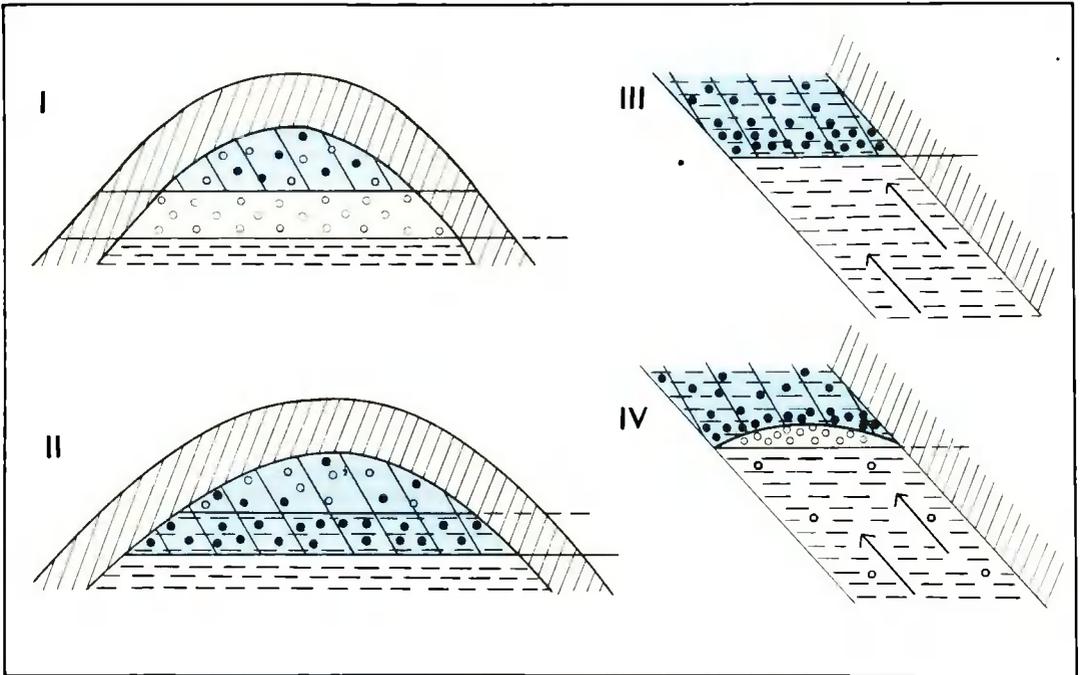
Первое обоснование возможности накопления углеводородных газов в виде гидратов в осадках дна Мирового океана было сделано советскими специалистами еще в 60-х гг., а затем было доказано детальными расчетами и результатами бурения океанического дна⁴.

⁴Трофимук А. А., Черский Н. В., Царев В. П. Особенности накопления природных газов в зонах гидратообразования Мирового океана.— «Доклады АН СССР», 1973, т. 212, № 4.

Расчеты показывают, что углеводородные газы могут образовывать гидраты в зонах шельфа (при глубинах моря 250—600 м) только в полярных областях. В прибрежной полосе полярных морей, где отступление суши происходило после формирования многолетнемерзлых пород, возможно существование газогаидратных залежей и на меньших глубинах. В пределах материкового склона и в периокеанических частях Мирового океана мощность ЗГО может достигать 470 м и более. Максимальные мощности в породах дна ЗГО имеет

глубоководных океанических впадинах. К срединноокеаническим хребтам мощность ЗГО значительно уменьшается из-за увеличения значений геотермического градиента и повышения температур осадков.

Органическое вещество, достигающее морского дна, разлагается под действием микробиологических процессов. Образующиеся при этом газы CH_4 , CO_2 , N_2 , H_2 не рассеиваются в результате всплытия, а превращаются в гидраты, которые механически связываются с осадками. Та-



Процессы превращения обычной газовой залежи (I, II) в газогаидратную и формирование газогаидратных залежей из рассеянных углеводородов (III, IV).

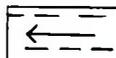
Первоначально зона гидратообразования находится выше уровня контакта газа с водой, и в гидраты из-за недостатка воды превращается только часть газа (I). Если зона гидратообразования опускается ниже контакта воды и газа, количество газа, превращаемого в газогаидраты, увеличивается (II). Если подошва ЗГО сечет пласт, по которому движется пластовая вода, содержащая свободный или растворенный газ, начинается заполнение породы гидратами (III). При высоких степенях заполнения пласта гидратами, он становится непроницаемым для воды и газа и под ним может образоваться обычная газовая залежь (IV). Наиболее изученное Мессоякское газогаидратное месторождение построено по типу I: верхняя продуктивная пачка заполнена гидратами и свободным газом, а нижняя — свободным газом.



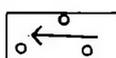
толща, экранирующая залежь



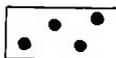
зоны гидратообразования



вода и направление ее движения



свободный газ и направление его движения



гидраты

кой процесс в морских осадках протекает в течение десятков миллионов лет. Это привело к накоплению огромных количеств газов в осадках дна Мирового океана.

Гидраты могут служить как бы броней, предохраняющей от рассеивания те порции газа, которые образуются при биохимических процессах, происходящих в толще океанического осадка.

На поверхности дна Мирового океана формируется покров, представленный осадками, сцементированными гидратами; мощность его изменяется от нескольких метров на мелководье до нескольких сотен в глубоководных частях океана. Концентрация газов в осадках такого покрова определяется скоростями осадконакопления, величиной органической продукции моря и типом структурной зоны, где происходит переработка органического вещества после его захоронения. В случае полного заполнения пор осадка гидратами при пористости 0,2 в 1 м³ породы может содержаться 30—36 м³ газа.

Наибольшая степень заполнения пород гидратами будет наблюдаться у нижней границы ЗГО. Здесь накапливаются те порции газа, которые перешли в свободную фазу при разложении гидратов в процессе погружения осадка за пределы нижней границы ЗГО, а затем снова в результате всплывания оказались в зоне гидратообразования. Таким образом, по мере накопления осадков и погружения части их за пределы ЗГО концентрация газа в виде гидратов в ЗГО будет расти за счет миграции газа из нижележащих участков.

Крупные зоны накопления углеводородов в ЗГО и подстилающих ее породах могут быть приурочены к участкам разгрузки гидрогеологических комплексов осадочного чехла.

Таким образом, вся поверхность дна в Мировом океане, за исключением шельфа ниже 61° с. ш. и ю. ш., — зона накопления природных газов в твердой фазе. Следовательно, зоны гидратообразования распространены на большей части поверхности земного шара.

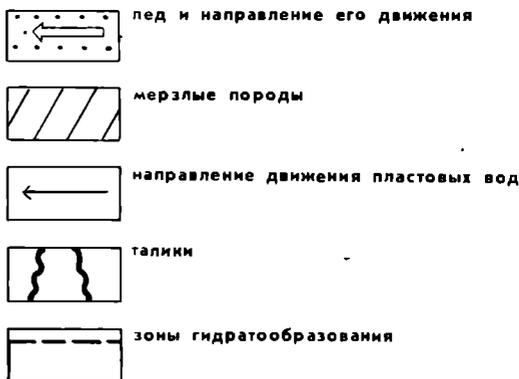
Большой интерес представляют приближенные оценки ресурсов газа в зонах гидратообразования. В таблицах 4 и 5 приведены сведения о распространении зон гидратообразования в Мировом океане.

При расчете площади аккумуляции биохимических газов в ЗГО различных структурных зон Мирового океана мы исходили из следующих предположений. ЗГО в пределах шельфа (31,1·10⁶ км²) занимают 10% его площади, и накопление

газовых гидратов происходит на 1/3 части этой области. В пределах материкового склона и подножья (площадь 60,4·10⁶ км²) ЗГО распространены на 100% площади, а газонакопление протекает на ее 60%. В пределах ложа Мирового океана котловины внутренних морей, глубоководные желоба и океанические котловины — области наиболее благоприятные для газонакопления — занимают примерно 189·10⁶ км². Площадь, на которой происходит накопление гидратов газов, принята здесь равной 30%.

Влияние перемещения ледникового щита Антарктиды на динамику флюидов и мерзлых пород. Первоначально [I] в процессе формирования покровного ледника флюиды под действием нагрузки щита и сжатия пород отжимались к побережью. Зоной питания являлась вся область, перекрытая ледником. Мерзлые породы были распространены на всей площади, перекрытой льдом.

Через 200—300 тыс. лет почти на половине площади материка под ледником произошло нагревание и таяние мерзлых пород и началось таяние льда в основании щита [II]. В основании ледника под давлением 200—400 атм в горные породы стали фильтроваться талые воды. При этом зоной питания стала большая часть территории Антарктиды. На схеме [II] показан момент (около 14 тыс. лет назад), когда ледяной щит имел максимальные размеры и занимал значительную часть шельфа. При инфильтрации талых вод в пределах центральной части материка происходило разрушение залежей нефти и газа, причем на глубине до 2—3 км от поверхности ложа, очевидно, сохранились только газогидратные залежи. Инфильтрация вод и движение ледяного покрова являлись движущей силой перемещения флюидов к окраинам материка. Следовательно, движение вод, нефти и газа на первой и второй стадии развития покрова происходило в направлении шельфа, материкового склона и подножья.



Учитывая количество органического материала, достигающего дна, мы произвели расчеты плотности запасов метана, захороненного в придонных осадках мощностью до 300 м. Полученные результаты показывают, что концентрация CH_4 в осадках морского дна может быть сопоставима с содержанием газов в обычных залежах материков и даже превышать их на несколько порядков.

При расчетах (табл. 6) плотность запасов газа нами принята равной 1170—1384 млн $\text{м}^3/\text{км}^2$. Коэффициент извлече-

ния газа из газогидратных залежей морских осадков взят равным 0,7. Для морских отложений эта величина, очевидно, несколько занижена, так как газовые гидраты с плотностью меньше единицы можно легко отделить от слабосцементированного минерального скелета осадков при его разрушении. Улавливание гидратов в морской воде, например колоколами, технически легко осуществимо.

Таким образом, извлекаемые запасы газа из зон гидратообразования Мирового океана, по приближенным расчетам, со-

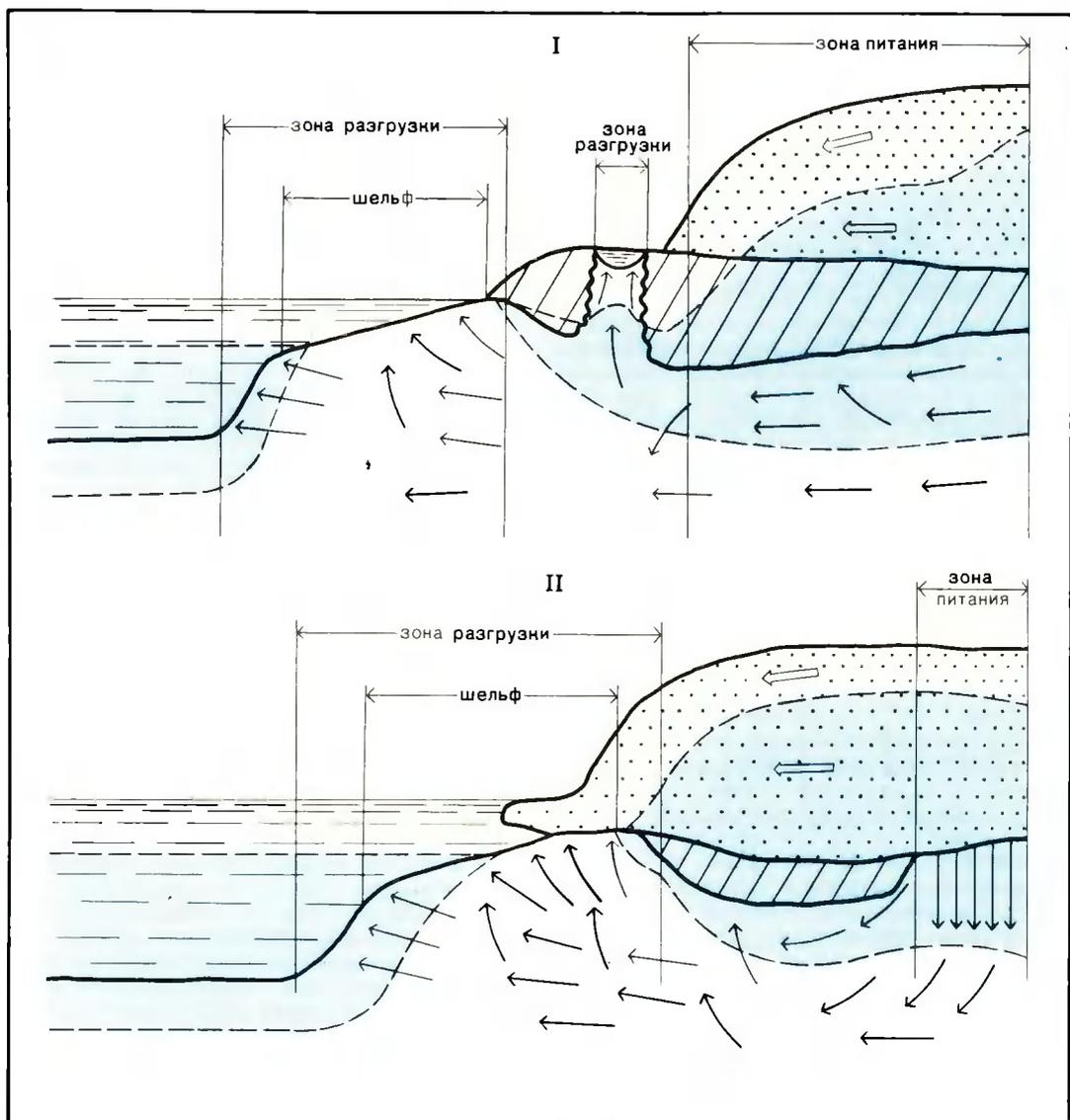


Таблица 4
Распространение ЗГО в морских бассейнах

Типы температурной зональности	Распространение	Глубина залегания верхней границы ЗГО для газов, м		
		CH ₄ +CO ₂	H ₂	N ₂
Полярный	до 76° с. ш.	250	10	1600
	до 61° ю. ш.			
Умеренный	76° с. ш.—	350	30	1600
	46° с. ш.			
	61° ю. ш.— 46° ю. ш.			
Субтропический	46° с. ш.—	600	70	2100
	25° с. ш.			
	46° ю. ш.— 25° ю. ш.			
Тропический	25° с. ш.—	650	100	2300
	25° ю. ш.			

Таблица 6
Ресурсы горючих ископаемых Земли

Полезные ископаемые	Извлекаемые запасы в млрд т угольного эквивалента	Предельные геологические запасы в млрд т угольного эквивалента
Природный газ (обычные залежи)	280	330
Нефть (обычные залежи)	415	1180
Нефть (битуминозные песчаники)	—	39 500
Газ (газогидратные залежи материков)	53	530
Газ (газогидратные залежи Мирового океана)	11300	161000
Энергия всплывающего газа	500	—

Таблица 5
Глубина залегания ЗГО в осадках морского дна

Глубина залегания от поверхности дна, м	Температура на поверхности дна в различных поясах, °С			Средний геотермический градиент в породах дна, °С/км	Давление на поверхности дна, атм	Глубина залегания нижней границы ЗГО от поверхности дна в различных поясах, м		
	тропический, субтропический	умеренный	полярный			тропический, субтропический	умеренный	полярный
200	16	5	0	50	20,5	0	0	0
400	10	4	0	50	41,5	0	15	90
600	8	3	0	50	61,5	0	110	150
1000	4	2	0	70	102,5	135	170	200
1500	4	1	0	70	153,7	185	225	245
2000	3	1	0	70	205	240	270	290
3000	2	1	0	70	307,5	285	300	310
4000	2	1	0	70	410,0	310	325	340
6000	0	0	0	60	615,0	470	470	470

ставляют около $85 \cdot 10^3$ трилл. м³. Полученные нами величины примерно совпадают с результатами, приведенными в работах американских ученых⁵. По их данным, на суше и Мировом океане ежегодно

генерируется около 2 трилл. м³ CH₄. Если принять среднее время существования ЗГО за 80 млн лет, то ресурсы метана в Мировом океане, по величине равные полученным в результате наших расчетов, сформируются при аккумуляции в ЗГО менее 0,1% от всего количества CH₄.

Таким образом, вклад извлекаемых ресурсов газа, сосредоточенного в зонах гидратообразования материков и Мирового океана, в энергетический потенциал го-

⁵Черский Н. В., Царев В. П. Оценка ресурсов и некоторые вопросы поисков и извлечения природных газов из осадков дна Мирового океана.— «Геология и геофизика», 1977, № 5.

рючих ископаемых Земли может быть очень значительным.

Проблема добычи газа из газогидратных залежей представляется нам достаточно сложной, но разрешимой.

Анализ материалов разработки Мессояхского газогидратного месторождения показывает, что при современном уровне развития техники рентабельное извлечение газа возможно, если поровое пространство продуктивного горизонта содержит не более 10% гидратов, а 90% заполнено свободным газом. При большей степени заполнения породы гидратами эксплуатация газогидратных залежей связана со значительными техническими осложнениями, вызванными необходимостью закачки очень больших количеств веществ, разрушающих газосырые гидраты, в участки продуктивного пласта, удаленные на десятки метров от скважины, или применением искусственного подогрева. Выполнение этой операции связано с затратой больших количеств энергии. При малых степенях заполнения пласта газовыми гидратами разработку газогидратной залежи можно вести, обрабатывая только небольшую (радиусом до 1 м) зону пласта, прилегающую к скважине. Разрушение гидратов на участках, удаленных от скважины, будет производиться за счет падения пластового давления по мере отбора газа.

При рассмотрении возможностей извлечения газа из морских осадков следует иметь в виду, что при современном уровне развития техники организация его добычи из газогидратных залежей Мирового океана возможна в случае решения проблемы транспорта газа от места добычи к потребителю. При использовании газа на месте разработки эта задача отпадает.

Транспортировка газа из акваторий возможна в сжиженном состоянии. Для реализации этого варианта необходимо сложное технологическое оборудование, установки сжижения, суда для перевозки сжиженного газа. Недавно в США предложен более простой вариант транспортировки газа — перевозка гидратов в подводных контейнерах.

Извлечение газов из морских осадков сопряжено с высокими капитальными затратами на строительство большого количества судов, необходимых для разработки газогидратных залежей. Приближенные оценки показывают, что одно судно водоизмещением 7000—8000 т может добывать около 360 млн м³ газа в год и одновременно конкреций около 1 млн т в год. Затраты на разработку и изготовле-

ние такой системы превышают 150—200 млн долл. Достаточно высокими являются и эксплуатационные расходы.

При всем этом следует иметь в виду, что добычу газа можно организовать как сопутствующий технологический процесс. Основной операцией будет являться извлечение других полезных ископаемых, содержащихся в осадках морского дна. Поэтому добыча газа может осуществляться практически без дополнительных затрат на суда, приспособленных для подъема полезных ископаемых.

По сравнению с обычными газовыми месторождениями материков затраты на поиски и разведку морских газогидратных залежей, т. е. на подготовку запасов к разработке, будут значительно ниже. Это обусловлено, во-первых, тем, что можно использовать прямые методы поиска и разведки газогидратных залежей в связи с их неглубоким залеганием от поверхности дна (десятки и первые сотни метров) и большой концентрацией газов в осадках, а также высокой эффективностью применения сейсмо-акустических и других геофизических методов для региональных поисков и разведки газогидратных залежей на локальных участках.

Следует также учесть, что при разработке морских газогидратных залежей может быть использована энергия всплывающего газа для подъема минеральных полезных ископаемых на поверхность моря. Ее величина приближенно равна $3,9 \cdot 10^{15}$ ккал, или около $0,5 \cdot 10^9$ т угля эквивалента.

Таким образом, в областях развития оледенений и в зонах гидратообразования Мирового океана могут быть сосредоточены значительные ресурсы углеводородного топлива и химического сырья. Для их поисков и освоения необходима разработка новых технических систем. Часть этих ресурсов может быть использована и при современном уровне развития техники.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Бык С. Ш., Фомина В. И. Газовые гидраты. М., 1970.
Макогон Ю. Ф. Гидраты природных газов. М., 1974.

Поиски и оценка ресурсов газа в газогидратных залежах. Якутск, 1977.



Международная программа ЮНЕСКО «Человек и биосфера»

Проблема охраны окружающей среды в наше время стала исключительно актуальной. Воздействие человека на природу планеты приобрело глобальный характер и продолжает возрастать, причем масштабы и темпы преобразований намного опережают развитие и уровень природоведческих знаний. Чтобы сократить этот разрыв, ученые многих стран форсируют фундаментальные исследования. Координировать их призвана специальная Международная программа ЮНЕСКО «Человек и биосфера» — МАБ (от англ.: the Man and the Biosphere). Основная задача программы — осуществление в разных районах мира комплексных многолетних исследований воздействия человека на естественные процессы в биосфере, а также изучение влияния изменений этих процессов на самого человека.

Программа «Человек и биосфера» использует опыт таких ранее осуществившихся ЮНЕСКО международных программ, как «Программа изучения аридных земель», «Международная биологическая программа», но по своим задачам она отличается от них. Межправительственная по своей структуре, программа МАБ направлена на решение конкретных проблем управления естественными ресурсами в странах, участвующих в ней. К решению упомянутых проблем привлекаются ученые самых различных специальностей, т. е. программа имеет и междисциплинарный характер.

Официально программа МАБ была принята в 1970 г. на XVI сессии Генеральной конференции ЮНЕСКО. Руководство и наблюдение за программой осуществляет Международный координационный совет (МКС), в состав которого в настоящее время входят представители 30 государств. МКС создает специальные рабочие группы и группы экспертов, которые координируют исследования и определяют их основные направления. В период между сессиями МКС руководство программой МАБ осуществляют Бюро и Секретариат МКС.

Общие принципы организации этой программы были выработаны в ноябре 1971 г. на Первой сессии МКС МАБ, на

которой было предложено для совместных исследований 13 научных проектов:

1. Экологические последствия усиления влияния деятельности человека на тропические и субтропические экосистемы.

2. Экологическое влияние различных видов землепользования и практики хозяйствования на лесной ландшафт умеренной зоны и Средиземноморья.

3. Воздействие деятельности человека и способов землепользования на пастбища: саванна и травянистые ландшафты (от умеренных до засушливых районов).

4. Влияние деятельности человека на динамику экосистем засушливых и полузасушливых зон с уделением особого внимания последствиям ирригации.

5. Экологическое влияние деятельности человека на ресурсы озер, болот, рек, дельт, эстуариев и прибрежных районов.

6. Влияние деятельности человека на горные и тундровые экосистемы.

7. Экология и рациональное использование островных экосистем.

8. Сохранение естественных районов и содержащегося в них генетического материала.

9. Экологическая оценка борьбы с сельскохозяйственными вредителями и использования удобрений в земных и водных экосистемах.

10. Влияние основных видов инженерно-технических работ на человека и окружающую его среду.

11. Экологические аспекты городских систем с уделением особого внимания использованию энергии.

12. Взаимодействие между преобразованиями окружающей среды и структурой приспособляемости, демографии и генетики народонаселения.

13. Понимание состояния окружающей среды.

14. Исследование загрязнения окружающей среды и его воздействия на биосферу (этот проект был дополнительно внесен по инициативе советских ученых на 18-й сессии Генеральной конференции ЮНЕСКО в 1974 г.).



Символ, изображенный в сочетании с принятым сокращением программы «Человек и биосфера» (МАБ), являлся эмблемой жизни в Древнем Египте.

К настоящему времени уже в 87 странах, изъявивших желание участвовать в программе, созданы национальные комитеты, которые организуют исследования по этим научным проектам. Значительная часть проектов МАБ посвящена изучению воздействия людей на основные типы природных сообществ: леса тропиков, субтропиков и умеренной зоны, тундры, саванны, степи и пустыни, острова и горы, водоемы и прибрежные районы. Исследуются также пути сохранения различных природных районов и генофонда животных и растений, влияние на окружающую среду пестицидов, гербицидов и минеральных удобрений, причины снижения эффективности химической борьбы с сельскохозяйственными вредителями и ряд других проблем. Предстоит определить предельно допустимые уровни концентрации различных загрязнителей, изучить взаимодействие между ними, пути их превращения и круговорота в различных экосистемах. Важным итогом всех перечисленных проектов будет составление научно обоснованных прогнозов изменений биосферы и разработка рекомендаций по разумной хозяйственной деятельности человека, позволяющей сочетать материальное и духовное благополучие людей с нормальным функционированием биосферы.

Большое внимание в программе МАБ уделяется подготовке специалистов, призванных решать задачи охраны биосферы. Без знания существующих здесь проблем в настоящее время, по-видимому, невозможно говорить о полноценной деятельности в области естественных наук, техники, медицины, народного хозяйства. Между тем большинство работающих сейчас специалистов в период своей учебы не получили систематического экологического образования. Соответствующие курсы лишь начинают включаться в программы физических, химических, технических высших учебных заведений, изучаться в средней школе. Поэтому именно здесь становится особенно важной роль научно-популярной литературы как средства ликвидации пробелов в образовании и повышения «экологической культуры» общества.

Организаторы журнала «Природа» считали тему защиты и бережного отношения к живой и неживой природе нашей родины, разумного использования ее богатств одним из основных элементов своей программы¹. Можно считать, что «Природа» — одно из немногих учреждений в нашей стране, да, по-видимому, и во всем мире, которое систематически работает в этом направлении вот уже 67 лет.

В 1917 году в «Природе» был создан специальный отдел «Охрана природы». В этот же период журнал активно разрабатывает вопросы рационального использования естественных производительных ресурсов страны. Недавно в нашем журнале подробно рассказывалось, как освещались на его страницах проблемы охраны животного и растительного мира Земли². Только в минувшем году этой теме были посвящены специальный выпуск журнала (№ 8), более 30 больших статей и около сотни заметок.

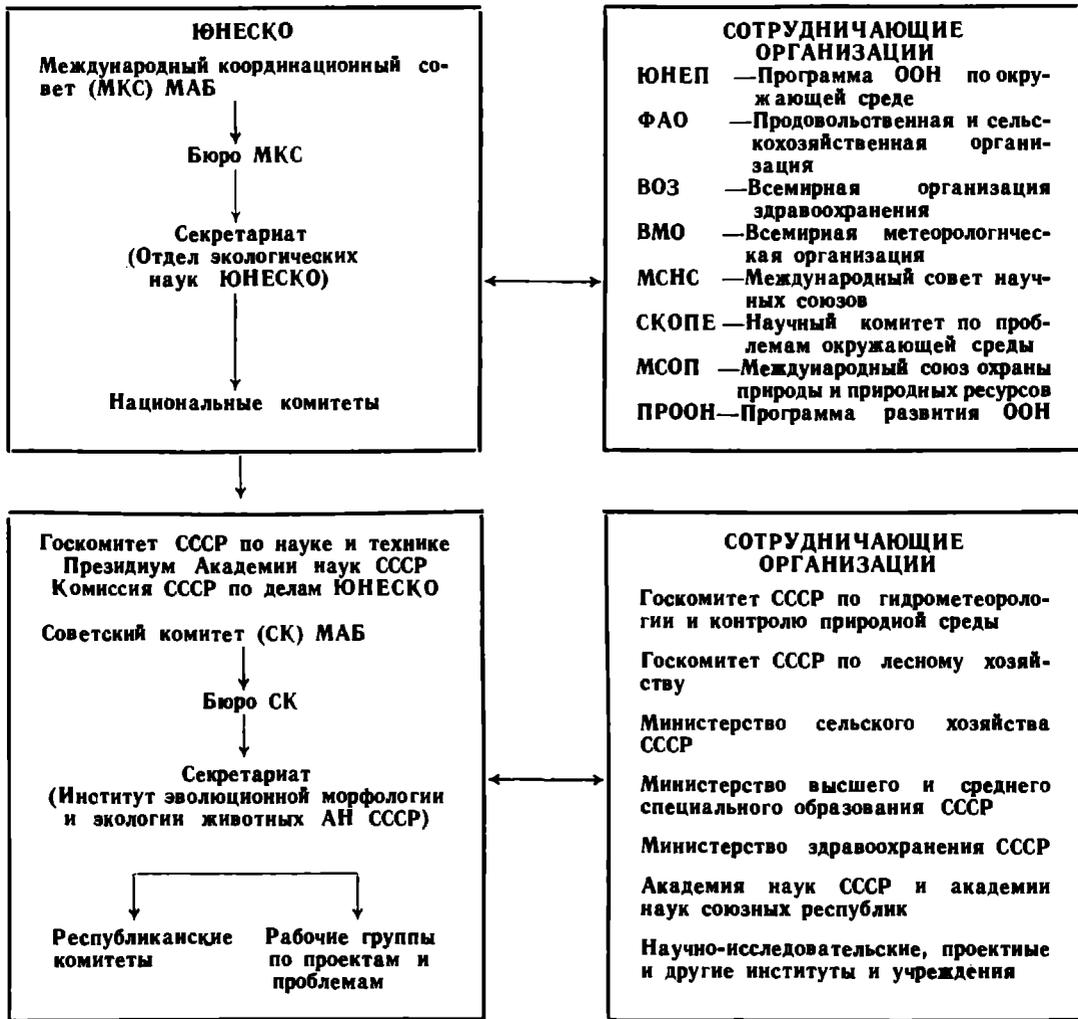
Таким образом, связь «Природы» и программы МАБ является органичной. С нынешнего, 1979 года, она получает и организационное оформление в виде непосредственного участия «Природы» в работе программы, в реализации ее проекта «Понимание состояния окружающей среды». В рамках этой работы на наших страницах будут более систематически и целенаправленно публиковаться материалы о наиболее интересных научных исследованиях, проведенных как в ходе осуществления собственно программы МАБ, так и не связанных с ней формально, но улучшающих наше понимание тех сложных процессов, которые объединяет ее символическое название. Все такие публикации будут снабжаться условным знаком программы «Человек и биосфера».

За прошедшие годы Международный координационный совет провел 5 сессий и на последней из них (Вена, 23.X—1.XI.77) было отмечено, что организационный подготовительный период закончен, и программа МАБ вступила в оперативную фазу. Таким образом, в настоящее время четко сформулирован круг задач, которые необходимо решать, и заложен прочный фундамент, на котором предстоит развить эту междисциплинар-

¹См.: «Природа», № 2, с. 3, 1978.

²Шитикова Л. М., «Природа» № 8, с. 69, 1978.

**Структура и организация руководящих органов программы МАБ
на международном и национальном уровнях**



ную долгосрочную программу. Наступил новый этап, а именно этап активного осуществления исследований и сбора фактических данных, необходимых для обобщения³.

Советские ученые принимали активное участие в подготовке Программы МАБ, и в СССР много делается для развертывания исследований по всем ее

14 международным проектам. В 1975 г. постановлением Государственного комитета Совета Министров СССР по науке и технике, Президиума АН СССР и Министерства иностранных дел СССР создан Советский комитет по программе ЮНЕСКО «Человек и биосфера». Секретариат комитета работает при Институте эволюционной морфологии и экологии животных им. А. Н. Северцова АН СССР. Комитет поддерживает контакты с ЮНЕСКО и другими международными и национальными организациями, занимающимися вопросами изучения и охраны биосферы и рационального использова-

³На первом и втором этапах Программа МАБ пользуется широкой поддержкой и осуществляет сотрудничество с различными правительственными и неправительственными организациями (ЮНЕП, ФАО, ВОЗ, МСОП, МСНС и др.).

ния ее ресурсов, и на основе их опыта координирует исследования в СССР.

Всего в СССР создано и активно работает 21 рабочая группа, в каждой из которых от 10 до 20 ведущих специалистов. Рабочие группы осуществляют планирование и контроль за выполнением исследований в рамках своего проекта или проблемы. Наибольшее число специалистов (свыше 500 из 170 институтов, заповедников и других учреждений) принимает участие в проекте МАБ № 8 «Сохранение естественных районов и содержащегося в них генетического материала», в котором с учетом преимущества программы МАБ и Международной биологической программы сформировано два подпроекта: 8а — «Создание биосферных заповедников» и 8б — «Изучение вида и его продуктивности в ареале».

В марте 1977 г. в Москве состоялось I Совещание представителей национальных комитетов МАБ социалистических стран, на котором Советскому комитету поручена общая координация исследований по всей программе МАБ в странах социалистического содружества. Разработкой типовых программ исследований, уточнением методик, проведением встреч экспертов должны заниматься выделенные в разных социалистических странах головные научные центры по отдельным проектам и наиболее важным проблемам. Второе подобное совещание, которое подведет итоги проделанной работы, будет проведено в Варшаве в апреле 1979 г.

Советский комитет МАБ принимает активное участие в развитии многостороннего и двустороннего сотрудничества по проектам, непосредственно связанным с задачами программы МАБ, не только с социалистическими, но и с некоторыми капиталистическими странами. Так, в мае 1976 г. в СССР проведен Советско-американский симпозиум по биосферным заповедникам с участием наблюдателей ЮНЕСКО и Международного союза охраны природы и природных ресурсов. Труды симпозиума уже вышли на русском языке⁴. В мае 1977 г. в Москве проведено заседание Советско-английской рабочей группы по вопросам координации исследований в области охраны природных районов, экологических систем и отдельных видов фауны и флоры.

Проблемы защиты и сохранения биосферы находятся сейчас в центре внимания всей мировой общественности. В процессе их обсуждения, конечно, неизбежны многие противоречия как в оценке значения тех или иных явлений, так и предлагаемых методов решения, но несомненно одно: загрязнение среды — не только потенциальная угроза будущим поколениям; во многих странах — это уже социальное бедствие сегодняшнего дня, и если этот процесс не будет остановлен, под угрозой окажется все живое на земном шаре. Последовательно борясь за углубление позитивных сдвигов в международной обстановке, нашедших свое отражение в Заключительном акте Совещания по безопасности и сотрудничеству в Европе, состоявшегося в Хельсинки, страны социализма неоднократно выступали с призывом объединить и активизировать усилия в области охраны и восстановления природы. В частности, предложение о проведении общеевропейских конгрессов или межгосударственных совещаний по вопросам сотрудничества в области охраны окружающей среды, развития транспорта и энергетики, выдвинутое Л. И. Брежневым в речи на VII съезде ПОРП⁵, находит все большую поддержку со стороны различных государств. В условиях мирного сосуществования и сотрудничества, постоянно наращивая уровень знаний в естественных и гуманитарных науках, осматрительно и активно внедряя достижения научно-технического прогресса, человечество сможет не только приостановить загрязнение биосферы, но и во много раз увеличить использование ее природных ресурсов без их подрыва и добиться в дальнейшем значительного роста потенциала и улучшения современного состояния биосферы. Для решения этой ответственной задачи советские ученые приложат все свои силы и знания, и можно надеяться, что уже в ходе выполнения Международной научной программы «Человек и биосфера» будут получены ответы на многие стоящие сейчас перед нами вопросы.

В. М. Неронов,
кандидат географических наук
ответственный секретарь
Советского комитета МАБ

В. А. Гончаров,
заместитель главного редактора
журнала «Природа»

⁴Биосферные заповедники.— Труды I Советско-американского симпозиума— СССР, 5—17 мая 1976 г. Л., 1977.

⁵Брежнев Л. И. Ленинским курсом. Речи и статьи, т. 5, М., 1976.



Репетекский заповедник — первый пустынный биосферный заповедник в СССР

В. Е. Соколов, П. Д. Гунин



Владимир Евгеньевич Соколов, академик, директор Института эволюционной морфологии и экологии животных им. А. Н. Северцова, зоолог. Председатель Советского комитета по программе ЮНЕСКО «Человек и биосфера» (МАБ). В «Природе» опубликовал статью в соавторстве с А. В. Яблоковым «Перспективы охраны животного мира СССР» (1977, № 9).



Петр Дмитриевич Гунин, кандидат географических наук, старший научный сотрудник группы по проблеме «Человек и биосфера» того же института, специалист в области биогеоценологии аридных областей. Автор монографии: Экологические режимы пустынных биогеоценозов. М., 1978.

Создание мировой сети биосферных заповедников, проводящееся по инициативе ЮНЕСКО в рамках новой межправительственной программы «Человек и биосфера», предусматривает сохранение видового разнообразия животных и растительных организмов в естественных экосистемах, проведение комплексных биогеоценологических исследований и работ по экологическому мониторингу (контролю), выяснение характера и степени влияния различных типов хозяйственного воздействия на экосистемы (лесоразработка, освоение земель, пастбищное животноводство, рекреационное использование и др.).

Детализируя перечень главных задач, стоящих перед биосферными заповед-

никами, следует выделить основные черты, объединяющие и отличающие их от обычных заповедников. Сеть биосферных заповедников создается для изучения, контроля и прогноза состояния биосферы и должна быть составной частью глобальной системы экологического мониторинга. Биосферные заповедники создаются и существуют в целях сохранения разнообразия и комплексов биотических сообществ растений и животных в естественных экосистемах, а также защиты генетического разнообразия видов, от которого зависит их дальнейшая эволюция. При выборе территорий для биосферных заповедников принято руководствоваться, в первую очередь,



Белый саксаул наиболее приспособлен к условиям песчаных пустынь.

Фото В. Ф. Семенова.

принципом типичности и репрезентативности экосистем.

Концепцией фонового мониторинга предусматривается фиксирование «нулевой» точки антропогенных изменений в естественных экосистемах и организация последующих регулярных наблюдений за такими изменениями. При одновременной постановке исследований по программе фонового экологического мониторинга и комплексных исследований по изучению

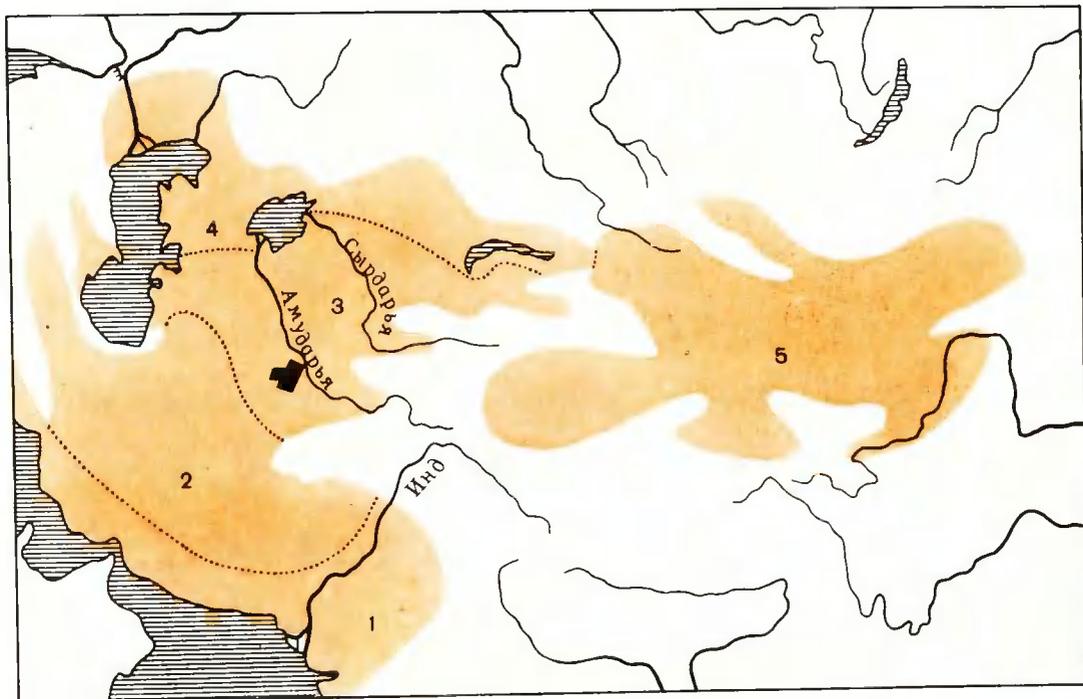
структурно-функциональной организации экосистем в биосферных заповедниках станет возможным не только определение содержания важнейших химических веществ и основных загрязнителей в экосистемах, но и выявление реакции отдельных организмов и в целом экосистем на изменения состояния окружающей среды.

Для проведения перечисленных исследований в СССР на базе существующих государственных заповедников созданы биосферные заповедники Березинский, Кавказский, Сары-Челекский, Сихотэ-Алинский, Приокско-Террасный в комплексе с экспериментальной станцией Института агрохимии и почвоведения АН СССР,

Репетекский в комплексе с песчано-пустынной станцией Института пустынь АН Туркменской ССР и Централно-Черноземный в комплексе с экспериментальной станцией Института географии АН СССР. Создание их одобрено Бюро Международного координационного совета программы ЮНЕСКО «Человек и биосфера» (17—22 апреля 1978 г.) и рекомендовано Генеральной конференцией ЮНЕСКО для включения их в международную сеть биосферных заповедников.

их использования, человек не очень сильно изменил характер и облик пустынных сообществ. Однако в XX в. в связи с интенсивным освоением и использованием пустынных территорий экосистемы пустынь попадают под ощутимое влияние человека.

Для проведения природо-охранительных мероприятий в песчаной пустыне необходимо руководствоваться ландшафтно-климатической концепцией о природе пустынь, объясняющей специфические



Место Репетекского биосферного заповедника (показано значком) в системе пустынных биогеографических провинций (цвет), границы провинций даны пунктиром [по А. Г. Воронову, В. В. Кучеруку, 1977].

Биогеографические провинции

- 1 — Месопотамско-синдская
- 2 — Иранская
- 3 — Туранская
- 4 — Прикаспийско-бетпадалинская
- 5 — Гобийская

СПЕЦИФИКА ОХРАНЫ, ИСПОЛЬЗОВАНИЯ И ИЗУЧЕНИЯ ПУСТЫННЫХ ЭКОСИСТЕМ

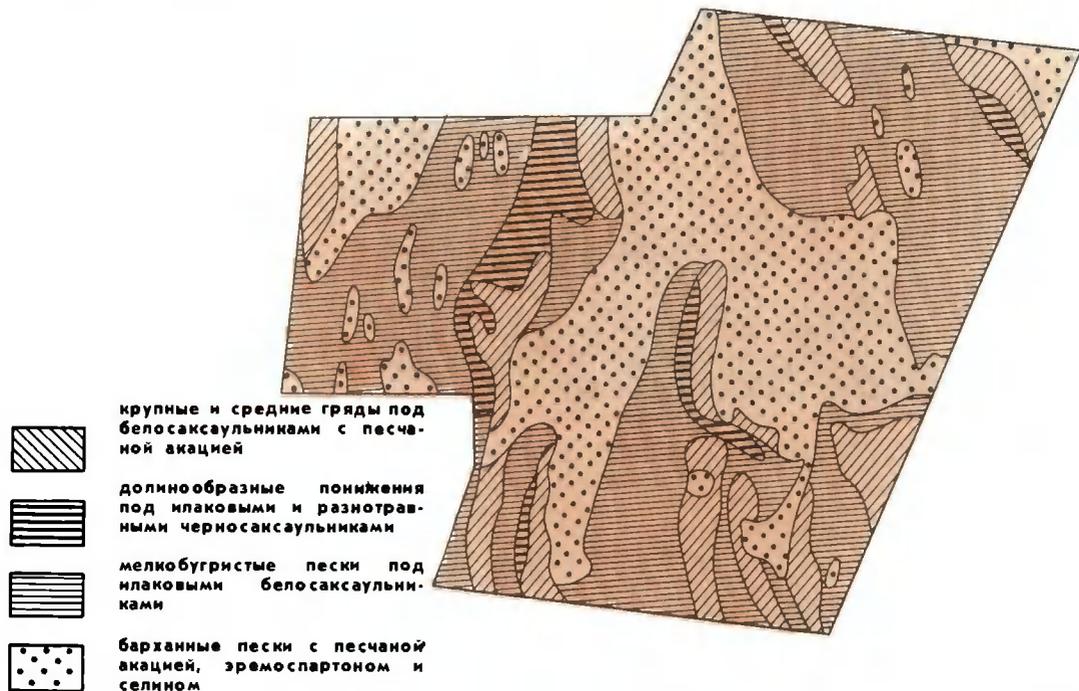
Пустыни в СССР занимают обширную территорию (около 200 млн га) и составляют 14—15% всей площади страны. Несмотря на многовековую историю

черты в организации их экосистем. Обилие солнечной энергии, высокие значения радиации и температуры воздуха, недостаток влаги и преобладание на значительных площадях песчаных грунтов обуславливают развитие разреженных кустарниковых сообществ, главным образом илаковых белосаксаульников. Резкие колебания климатических факторов определяют значительные сезонные и многолетние флуктуации жизненных процессов, что в итоге сказывается на колебаниях урожайности кормовых культур. Это, в свою очередь, осложняет прогнозирование в использовании пастбищ и определение предельных норм нагрузок на них. Слабое развитие биологического круговорота, связанное со значительной бедностью легко-

го по механическому составу песчаного субстрата и с жарким климатом, определяет формирование экосистем с мало-мощными почвами, подверженными быстрому истощению и разрушению.

Таким образом, экосистемы песчаных пустынь относятся к категории особо чувствительных ландшафтов. «Пленка» жизни в них тонка, легко уязвима и обладает пониженной способностью к регенерации. Нарушенный покров не восстанавливается в течение многих, иногда де-

виём хозяйственного освоения, которое может сделать невозможной регулярную эксплуатацию природных ресурсов, а в ряде районов создает реальную опасность интенсификации процессов опустынивания. Все это обуславливает выделение вопросов использования, охраны и воспроизводства ресурсов пустынь, как особо чувствительных к внешним воздействиям экосистем, в самостоятельную многоплановую проблему. Такая постановка вопроса находится в соответствии с планом действий,



Ландшафтная карта-схема Репетекского заповедника (по П. Д. Гунину, В. Я. Дарымову, 1972).

сятков, лет; биологическая продуктивность резко снижается, территории теряют ценность как пастбища и превращаются в голые барханные пески. Слабое внимание к охране природы пустынь кроется в довольно широко распространенном мнении, будто пустыни представляют собой как бы «ошибку природы», которую человек должен исправить. Такое упрощенное представление о взаимоотношениях человека и пустыни наносило и наносит непоправимый вред освоению и преобразованию пустынь. Вымирание отдельных видов растений и животных, разрушение природных экосистем является побочным следст-

принятым на Конференции ООН по проблемам опустынивания (29 августа — 9 сентября 1977 г., Найроби), в одном из пунктов которого говорится, что пустынные биосферные заповедники «могли бы служить базисными станциями для мониторинга опустынивания и подготовки соответствующих специалистов»¹.

Репетекский заповедник, организованный в 1928 г., получил статус биосферного заповедника в свой полувековой юбилей. За прошедшие годы сотрудники заповедника создали хорошую научную базу

¹«План действий по борьбе с опустыниванием». — Материалы Конференции ООН по проблемам опустынивания. Найроби, 1977.



Дорема песчаная.

Фото А. В. Гражданкина.

Заразиха — растение-паразит.

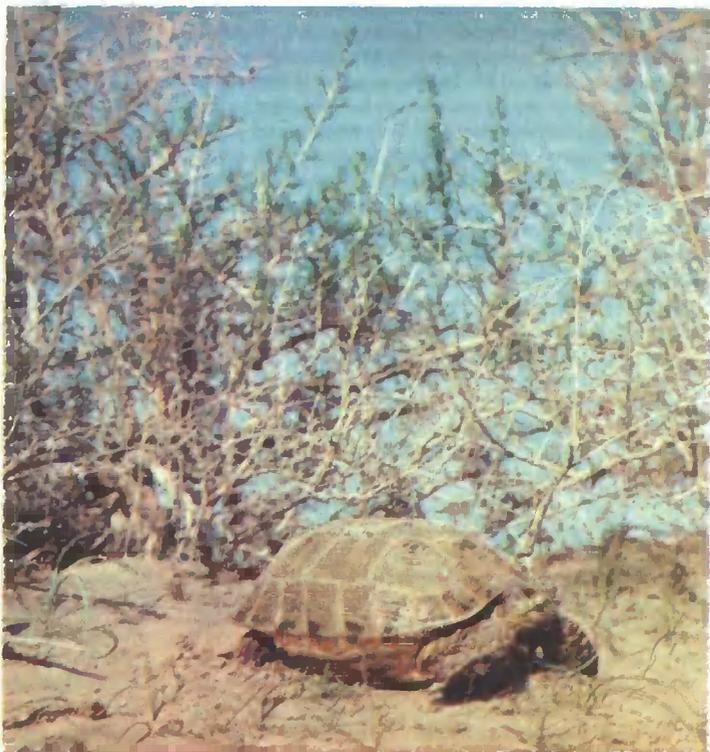
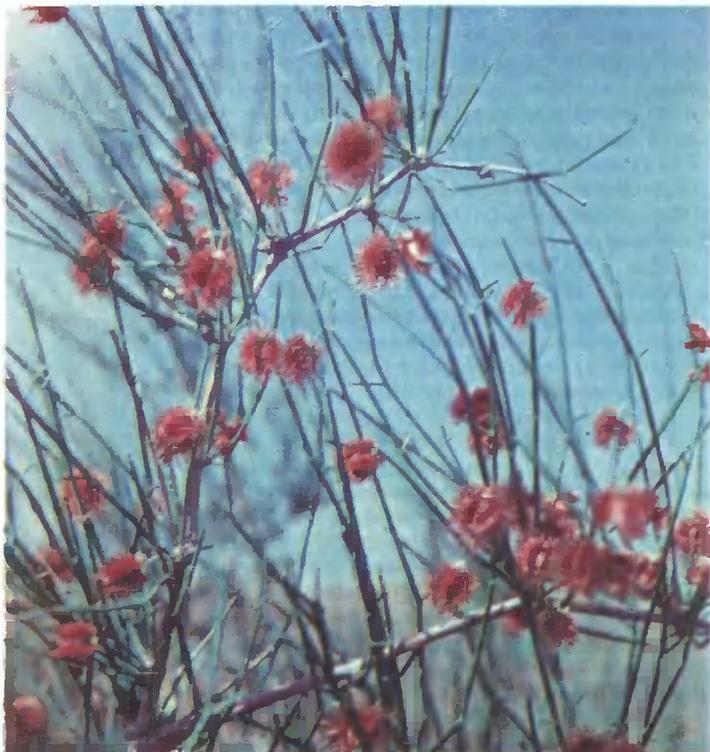
Фото П. Д. Гумина.

Плоды кандымов — наиболее распространенных растений песчаной пустыни.

Фото В. А. Огнева.

Среднеазиатская черепаха активна только весной, в остальное время находится в спячке.

Фото А. В. Гражданкина.



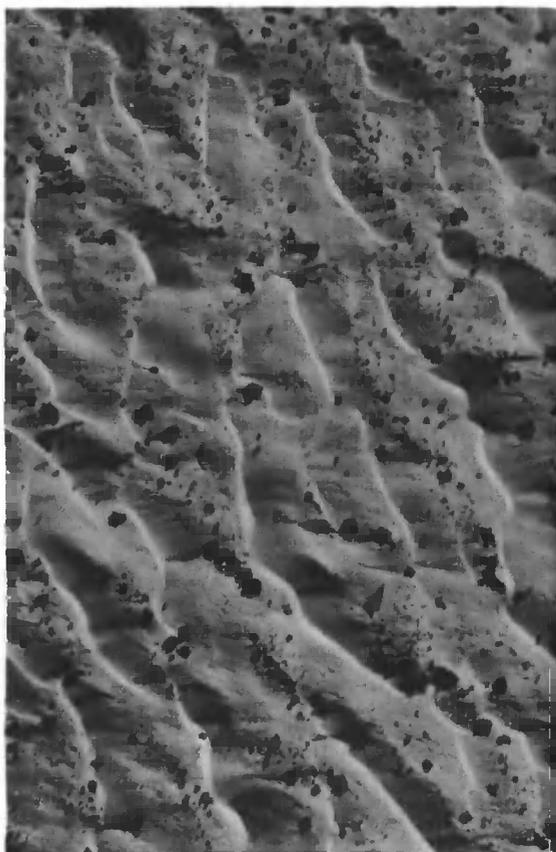
и совместно с Репетекской песчано-пустынной станцией Института пустынь АН Туркменской ССР накопили большой опыт по организации комплексных исследований. В течение 1965—1974 гг. Репетекский заповедник и песчано-пустынная станция проводили исследования по Международной биологической программе (МБП)².

Репетекский заповедник является первым пустынным биосферным заповедником в СССР и пока единственным для пустынь всего умеренного пояса Азии. Он находится в Туранской биогеографической провинции, занимающей довольно обширную территорию равнин Средней Азии и южного Казахстана.

ПРИРОДНЫЕ УСЛОВИЯ

В заповеднике на небольшой площади (34,6 тыс. га) представлены все основные типы экосистем песчаной пустыни, характерные для Каракумов. Здесь встречаются крупные гряды, долинообразные понижения с черносаксаульниками, бугристые и ячеистые пески с белосаксаульниками, барханные пески различной расчлененности с разреженной псаммофильной (песколюбивой) древесно-кустарниковой растительностью и т. д. Хотя названные экосистемы и встречаются на всей остальной территории Каракумов, однако такое сочетание разнообразных экосистем на небольшой площади делает ландшафт заповедника если не уникальным, то весьма узкорегиональным. Основным признаком, отличающим его от прочих песчано-пустынных ландшафтов, можно считать наличие крупных гряд, долинообразных понижений и бугристых песков. Характер сочетания этих экосистем определяет типичное для песчаных пустынь построение пространственной структуры ландшафта и различную функциональную роль, которую играют данные экосистемы в ландшафте крупногрядовых песков Восточных Каракумов.

Очень интересным и своеобразным типом экосистем являются черносаксаульники, образующие небольшие участки

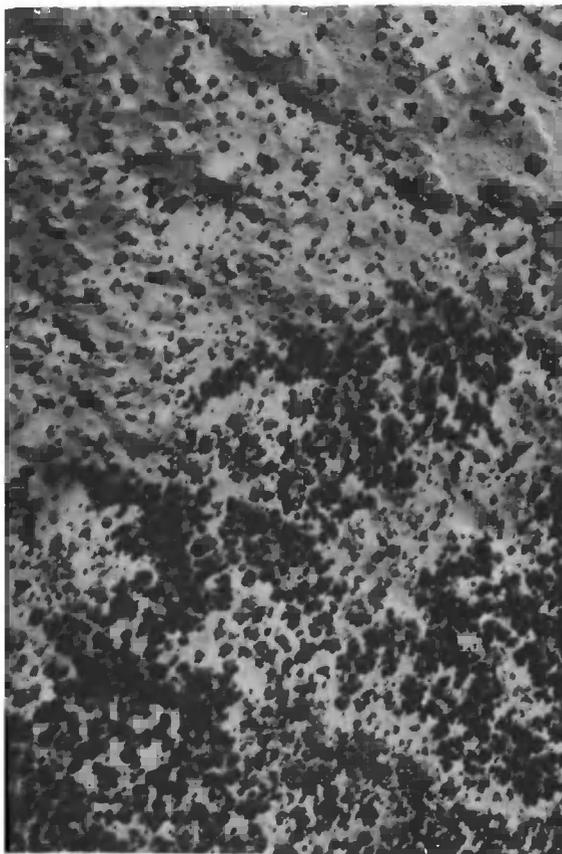


Барханные пески, или, как часто говорят, голые пески, постепенно зарастающие растительностью в условиях заповедника.

«пустынного леса». Произрастая в благоприятных условиях — долинообразных понижениях с пресными и слабоминерализованными грунтовыми водами, черный саксаул достигает высоты 4—5 м (иногда 8—10 м) и образует довольно густые заросли. В настоящее время такие саксаульники уже редки в Каракумах и поэтому представляют собой ценнейший памятник природы.

Наиболее распространены в заповеднике экосистемы бугристых и барханных песков. Бугристые пески чаще всего хорошо задернованы осокой, здесь растет белый саксаул. В отличие от черного он почти никогда не образует густых зарослей. В сообществах белосаксаульников встречаются различные виды кустарников: хвойник шишконосный — единственный здесь представитель голосемянных; кан-

²Продуктивность пустынных сообществ. Ресурсы биосферы. (Итоги советских исследований по Международной биологической программе.) Вып. 1. Л., 1975. Каракумы, стационар Репетек.— Продуктивность растительности аридной зоны Азии. (Итоги советских исследований по Международной биологической программе, 1965—1974 гг.) Л., 1977.



Долинообразные понижения с «густым черносауловым лесом». В настоящее время такие сообщества очень редки и требуют особых мер охраны.

дымы, а также солянки (черкез, чогон). Являясь типичным сообществом для Каракумов вообще, данный тип экосистем ценен как пастбищные угодья и поэтому является необходимым объектом комплексного изучения в биосферном заповеднике.

В экосистемах барханных песков встречается много видов — эндемиков как травянистых (селины — перистый и Карелина), так и древесных (песчаная акация, эremosпартон, кандымы и др.), которые приспособились к существованию в условиях песков и поэтому называются псаммофитами. Эти виды являются незаменимыми объектами для изучения адаптации растений к крайним условиям существования. Для флоры заповедника характерно большое количество эндемичных видов (37%).

В заповеднике зарегистрировано 125 видов цветковых и 9 видов низших

растений, что составляет почти половину от общего числа видов растений Каракумов. Кроме того, здесь произрастает 59 видов растений, занесенных из других районов, и около 20 видов интродуцированных лиственных древесно-кустарниковых пород. Аборигенные растения принадлежат к различным жизненным формам: 3 вида древесных, 17 — кустарниковых, 35 — многолетних и 79 — однолетних травянистых видов растений.

Богата эндемиками фауна Репетекского заповедника, особенно насекомыми. Количество видов насекомых и паукообразных превышает 1000, пресмыкающиеся представлены 23 видами, птицы — 196 и млекопитающие — 29 видами. В заповеднике хорошо изучены позвоночные, а в последнее время получены точные сведения о видовом составе некоторых групп насекомых. Среди пресмыкающихся заповедника эндемичны сцинковый и гребнепалый гекконы, ушастая круглоголовка, сетчатая, линейчатая ящурка, песчаный удавчик, а среди птиц эндемиком является саульская сойка.

На территории Репетекского заповедника охраняются некоторые редкие виды, включенные в «Международную Красную Книгу» (серый варан, джейран), и ряд видов, внесенных в «Красную Книгу СССР».

Животные Репетекского заповедника типичны для ландшафтов песчаных пустынь Средней Азии и отличаются высокой степенью адаптации к аридным условиям существования. Трофические связи между животными в песчано-пустынных биогеоценозах весьма напряжены и подчас однозначны — многие виды являются в своем питании очень специализированными (стенофаги). Это объясняется сравнительно бедным видовым составом животных и отсюда — малой свободой выбора и замены в трофической цепи.

В сезонной и суточной ритмике животных четко прослеживается их глубокая адаптация к экстремальным условиям. Животные с дневным образом жизни бывают активны лишь в ранние утренние и отчасти в предвечерние часы. Многие виды: большинство чернотелок, некоторые жужелицы, бабочки-совки, пластинчатые жуки, фаланги, скорпионы, тарантулы, гекконы, песчаный удавчик, жозодои, домовый сыч, барханный кот, землеройка-путорак — ведут ночной образ жизни. Наибольшая активность животных наблюдается ранней весной — с конца марта до



Серый варан — самая крупная ящерица в СССР.
Фото П. Д. Гунина.



Серый сорокопут.

Фото А. В. Гражданкина.

начала мая. Особенно ярко весенний пик активности проявляется у фитофагов.

Одной из самых типичных черт растительности песчано-пустынных ландшафтов является ее мозаичность, связанная с четкой обособленностью отдельно стоящих деревьев и кустарников. Это связано не только с непосредственным воздействием отдельных особей на окружающую среду в данный конкретный период наблюдений, но и с созданием под их кронами новых, нехарактерных для песков почвенных условий. Средообразующая роль деревьев и кустарников настолько велика, что различия в увлажнении, засолении, микроклимате в непосредственной близости от них и на открытых участках могут превосходить межландшафтные различия. Все это, естественно, обуславливает наибольшее скопление различных животных организмов на участках под кронами деревьев и кустарников.

АНТРОПОГЕННОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ

Территории песчаных пустынь используются в основном под пастбища, поэтому при изучении антропогенного воздействия на ландшафты песчаной пустыни, в первую очередь следует определить влияние выпаса на смену растительного покрова. Проблему деградации пастбищ можно рассматривать в двух аспектах: при неумеренном использовании и при

недостаточном использовании. Деградация пастбищ при неумеренном использовании происходит в связи с интенсификацией животноводства, вырубкой древесно-кустарникового покрова и чрезмерным использованием современных видов транспорта. Во всех случаях происходит разреживание растительного покрова и разрушение дернины, что в конечном итоге приводит к образованию барханных песков с низкопродуктивными сообществами. Запрещение выпаса и низкая численность копытных (джейранов) приводит также к быстрому снижению продуктивности и обеднению видового состава и, в конечном итоге, к деградации экосистем песчаных пустынь. Деградация пастбищ при недостаточном использовании связана с уплотнением и образованием на поверхности тонкой пылеватой корочки, благоприятствующей постепенному расселению пустынного мха. Мох, вегетируя в зимне-весеннее время, поглощает основную часть выпадающих осадков. Это, в свою очередь, приводит к постепенному иссушению песков и отмиранию не только травянистого, но и кустарникового покрова, уменьшая хозяйственную продукцию пастбищ.

Таким образом, для каждого природно-территориального комплекса необходима разработка системы мероприятий, направленных на их рациональное использование.



Пустынная славка.

Фото А. В. Гражданкина.

Важным условием разработки мероприятий по рациональному использованию песчаных пустынь является проведение исследований при различных режимах: в экосистемах, находящихся в заповеднике, при полном запрещении всякого хозяйственного воздействия; в экосистемах, расположенных в буферной зоне, где на экспериментальных участках воздействие регламентировано и строго учитывается; в экосистемах, находящихся в типовых условиях, но расположенных в зоне интенсивного хозяйственного воздействия. Результаты исследований, проведенных сотрудниками Института пустынь АН Туркменской ССР под руководством Н. Т. Нечаевой, убедительно показали, что только в таком случае возможно получение достоверных сведений о процессах эволюции экосистем Каракумов³.

Значительные, более чем пятидесятилетние наблюдения в Репетекском заповеднике за изменениями пустынных экосистем и накопленные фундаментальные данные об их структурно-функциональной организации, несомненно, представляют



Из ночных видов пресмыкающихся наиболее распространен в барханных песках сцинковый геккон.

Фото А. В. Гражданкина.

интерес для организации работ по глобальному фоновому мониторингу на территории пустынь, широко распространенных, помимо Евразии, в Африке, Австралии, Северной и Южной Америке. Ценность таких данных, собранных по стандартным методикам, была особенно подчеркнута во время Советско-американского симпозиума по биосферным заповедникам (СССР, май, 1976 г.) и заседаний Советско-английской рабочей группы по охране природных районов, экосистем и отдельных видов фауны и флоры (СССР, май 1977 г.), программой которых было предусмотрено посещение Репетекского заповедника. Очевидно, накопленный в Репетекском заповеднике опыт постановки комплексных экологических исследований может быть также с успехом использован в проекте ЮНЕП — ЮНЕСКО по расширению сети биосферных заповедников в пустынях и в опытно-показательном проекте ЮНЕП по аридным землям, и, в первую очередь, для подготовки на его базе специалистов из развивающихся стран.

С другой стороны, успех Глобальной системы мониторинга окружающей среды, создаваемой ЮНЕП на основе мировой сети биосферных заповедников, во многом зависит от регулярного обмена информацией с разных «точек» наблюдения в пределах пустынного и соседних с ним биомов. Выбор параметров и организация такого обмена — задача ближайшего будущего.

³Нечаева Н. Т. Биогеоценологические исследования на стационарах в пустынях как звено в системе биосферного мониторинга. — Биосферные заповедники. Труды I Советско-американского симпозиума. СССР, 5—17 мая, 1976 г., Л., 1977.

Электронные и адсорбционные явления на поверхности металлических монокристаллов

Ю. Г. Птушинский, А. Г. Наумовец, О. А. Панченко

В словаре синонимов русского языка к слову «поверхностный» приравниваются такие слова, как «неглубокий», «неосновательный», «несерьезный». Обобщая житейский опыт, язык как бы предупреждает нас, что по-настоящему важно и серьезно лишь то, что происходит «в глубине». Хотя физика твердого тела никогда не была солидарна с такой точкой зрения, она до недавних пор также сосредоточивала почти все свои усилия на изучении явлений в глубине (в объеме) твердых тел. Это может показаться странным, поскольку поверхность — наиболее доступная для изучения «часть тела». Однако именно в силу своей доступности она чрезвычайно подвержена загрязнению. Даже при давлении 10^{-6} мм рт. ст. уже примерно за 1 с на первоначально очищенную поверхность осаждается плотный мономолекулярный слой газов, который может серьезно изменить свойства поверхности.

Таким образом, развитие физики поверхности долгое время тормозилось плохим состоянием вакуумной техники. Только к началу 60-х годов были разработаны и вошли в лабораторную практику методы получения давлений 10^{-10} — 10^{-11} мм рт. ст., при которых поверхность, будучи очищенной тем или иным способом, остается свободной от примесей в течение десятков минут или нескольких часов. (Современные методы позволяют обнаруживать примеси на поверхности даже в том случае, если на 10 млн атомов подложки приходится один адсорбированный атом примеси.) К этому же времени исследователи получили в свое распоряжение достаточно крупные и совершенные монокристаллы различных материалов, что дало возможность экспериментировать с поверхностями известной атомной структуры. Были разработаны разнообразные методы исследования поверхности, и теперь можно получать довольно точную информацию о том, какие атомы или молекулы и в каком

количестве находятся на поверхности, какова их энергетическая структура, каким образом они расположены и т. д. Если к этому добавить, что сегодня многие отрасли техники требуют четкого понимания механизмов различных поверхностных явлений, то станет понятным интенсивное развитие физики поверхности в последние годы.

ПРЕДЕЛЬНО ТОНКИЕ ПЛЕНКИ

Здесь мы рассмотрим в основном предельно тонкие адсорбированные пленки. В них адсорбированные атомы или молекулы образуют не сплошной монослой, а располагаются на некотором расстоянии друг от друга. Такие пленки называют субмонослойными.

Интерес к их изучению объясняется, прежде всего, тем, что именно при субмонослойных покрытиях адсорбированное вещество и подложка наиболее сильно влияют на свойства друг друга. Например, адсорбированный атом может частично передать свои электроны подложке и превратиться в положительный ион; при адсорбции связи в молекуле способны ослабиться так, что она может даже диссоциировать и т. д. Эти явления широко используются в катализе, электронике и других областях техники.

Помимо сказанного, субмонослойные и монослойные пленки представляют собой некоторую модель двумерной материи, а физиков весьма интересует вопрос о влиянии размерности системы на ее свойства. Короче говоря, есть все основания утверждать, что вещество в субмонослойной пленке находится в особом состоянии.

Прежде чем перейти к рассмотрению данных об атомной структуре адсорбированных пленок, познакомимся с основными представлениями о взаимодействии частиц на поверхности.

Энергия адсорбированной частицы



Юрий Григорьевич Птушинский (в центре), доктор физико-математических наук, член-корреспондент АН УССР, заместитель директора Института физики АН УССР. Основные научные интересы связаны с физикой поверхности металлов: строением и электронными свойствами адсорбированных слоев, начальной стадией коррозионного процесса в среде агрессивных газов.

Олег Антонович Панченко (справа), кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник того же института. Область научных

интересов — физика поверхности металлов, в частности рассеяние поверхностью электронов проводимости и связанные с этим размерные эффекты.

Антон Григорьевич Наумовец (слева), доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией электронных свойств поверхности того же института. Исследует атомную структуру адсорбированных пленок, фазовые переходы на поверхностях, влияние адсорбированных пленок на электронные свойства поверхностей.

определяется ее взаимодействием с подложкой (взаимодействие АП) и с остальными адсорбированными частицами (взаимодействие АА). Строго говоря, такое деление условно, поскольку эти составляющие не являются независимыми. Пусть на поверхности имеется одиночный адсорбированный атом. В этом случае, естественно, осуществляется лишь взаимодействие АП. Оно может быть обусловлено слабыми силами Ван-дер-Ваальса, и тогда адсорбция называется физической, либо более прочными химическими силами, включающими в себя в той или иной пропорции ковалентную, ионную или «металлическую» компоненты связи (хемосорбция).

Энергия связи адсорбированного атома с подложкой неодинакова в различ-

ных точках поверхности. Например, если решающее значение имеет число соседей у адсорбированного атома, то связь АП в положении, где адсорбированный атом находится в углублении между атомами подложки, будет сильнее, чем в положении, при котором он расположен строго над атомом подложки. Таким образом, поверхность характеризуется некоторым потенциальным рельефом. Приведенная картина, однако, справедлива лишь для атома-одиночки.

Если на поверхности окажутся два атома, распределение потенциала вдоль поверхности существенно изменится за счет взаимодействия АА. Его природа также разнообразна. В любом случае, независимо от химических свойств атомов,

между ними действуют силы Ван-дер-Ваальса, соответствующие притяжению и уменьшающиеся с расстоянием как r^{-6} . Однако это взаимодействие очень слабо и часто перекрывается более мощным.

Например, атомы инертных газов в приповерхностном электрическом поле обычно поляризуются, и образующиеся диполи, ориентированные параллельно друг другу, расталкиваются. Аналогичная ситуация возникает, когда на поверхность осаждаются молекулы, уже имеющие дипольный момент, либо когда связь атома с подложкой является полярной, и, следовательно, он обладает некоторым электрическим зарядом. Энергия диполь-дипольного отталкивания уменьшается с расстоянием как r^{-3} , поэтому такие силы имеют достаточно большой радиус действия.

При сближении адсорбированных частиц на такое расстояние, при котором начинается перекрытие их электронных оболочек, включаются еще более мощные силы. Они являются короткодействующими и в зависимости от строения оболочек приводят либо к «слипанию» атомов, либо, наоборот, стремятся их развести возможно дальше друг от друга.

Перечисленные виды взаимодействия типа АА осуществляются через вакуум и не требуют никаких «посредников». Кроме того, адсорбируемые атомы взаимодействуют и через подложку (так называемое косвенное взаимодействие). Это связано с тем, что каждый адсорбированный атом возмущает находящийся вокруг него электронный газ подложки. Другой адсорбированный атом, располагающийся на некотором удалении, «обнаруживает», что подложка уже не та, и энергия его связи становится несколько иной. Это и означает существование между адсорбированными атомами взаимодействия через подложку. Оказывается, что возмущение электронной плотности в подложке, вносимое адсорбированным атомом, распространяется на большие — по атомным масштабам — расстояния.

В результате интерференции электронных волн, рассеянных на адсорбированном атоме, на поверхности подложки вокруг него чередуются области, где электронная плотность повышена и понижена по сравнению с нормальной. Поэтому энергия взаимодействия через подложку является знакопеременной функцией расстояния, причем рассматриваемое взаимодействие в общем случае анизотропно.

Итак, картина взаимодействия адсорбированных частиц весьма сложна, осо-

бенно если учесть, что различные типы сил действуют одновременно.

Рассмотрим теперь, как все это проявляется в структуре адсорбированных пленок.

ДВУМЕРНАЯ КРИСТАЛЛОГРАФИЯ

Нанесем на поверхность с известной атомной структурой некоторое количество адсорбируемого вещества. Спрашивается, как адсорбированные атомы (или молекулы) расположатся на подложке? Ответ на этот вопрос зависит от нескольких факторов — температуры подложки, взаимодействия адсорбированных атомов друг с другом и с подложкой, количества адсорбируемого вещества на поверхности.

Если температура подложки в процессе напыления пленки будет очень низкой, каждый адсорбированный атом останется на том месте, в которое он первоначально попадает из газовой фазы. Пленка при этом получается аморфной.

Начнем подогревать подложку. Каждый атом теперь в некоторые моменты будет приобретать энергию, достаточную для переброса его из одной потенциальной ямы на поверхности в другую. Иными словами, адсорбированные частицы становятся подвижными и мигрируют по поверхности, выбирая наиболее выгодные места, определяемые минимумом свободной энергии. При этом атомы располагаются друг относительно друга в определенном порядке, образуя двумерный кристалл (напомним, что мы рассматриваем субмонослойную пленку).

Дальнейшее повышение температуры подложки приведет к тому, что двумерный кристалл сначала расплавится, а затем подвижность атомов станет столь большой, что пленка перейдет в состояние двумерного газа.

Итак, пленка может находиться в различных агрегатных состояниях. Среди них наибольший интерес вызывает двумерное кристаллическое состояние. Изучая структуру таких упорядоченных пленок, а также закономерности перехода из упорядоченной фазы в неупорядоченную при повышении температуры, можно получить много важных сведений о взаимодействии частиц на поверхности.

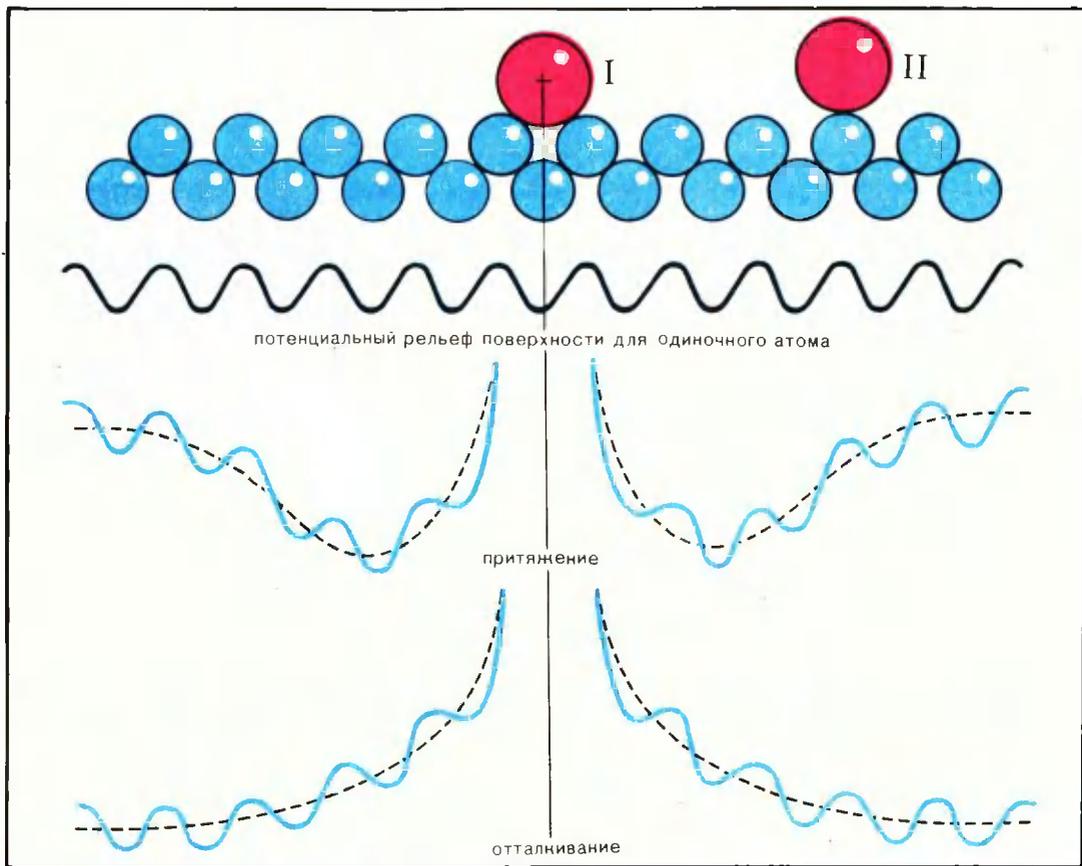
При исследовании структуры адсорбированных пленок чаще всего используется метод дифракции медленных электронов. Предложенный полвека назад К. Дэвиссоном и Л. Джермером (США), этот метод в течение нескольких последующих де-

сятилетий практически был предан забвению и начал широко применяться в исследованиях лишь в 60-е годы.

В опыте изучаемая поверхность облучается пучком электронов с энергией 10—100 эВ. Электроны, упруго рассеянные кристаллом, создают на экране видимую дифракционную картину, по которой можно восстановить расположение атомов на поверхности. Причина чувствительности этого метода именно к структуре поверхности состоит в том, что электроны указанной энергии чрезвычайно быстро теряют

ее при движении в твердом теле. Поэтому вероятность того, что электрон углубится сколько-нибудь заметно в кристалл, испытает там рассеяние и без потери энергии снова выйдет в вакуум, очень мала. Таким образом, дифракционная картина формируется лишь на нескольких ближайших к поверхности атомных слоях.

К настоящему времени разработаны способы расшифровки электронограмм, позволяющие с высокой степенью достоверности определять положение атомов на поверхности. Накоплен огромный экспе-



Взаимодействие адсорбированных атомов на поверхности. Энергия адсорбированного атома на подложке в положении I ниже, чем в положении II; периодический потенциальный рельеф поверхности при наличии на поверхности двух адсорбированных атомов искажается по-разному в зависимости от того, притягиваются или отталкиваются атомы.

риментальный материал о структуре чистых поверхностей и адсорбированных пленок.

Установлено, что структура субмонослойной пленки может быть как согласованной, так и не согласованной со структурой подложки.

В первом случае расстояния между адсорбированными атомами кратны расстояниям между атомами подложки (по этой причине такие двумерные решетки

называют еще **соразмерными** с решеткой подложки). Все адсорбированные атомы располагаются в минимумах потенциального рельефа подложки, хотя и не обязательно, чтобы **каждый** минимум был занят (это уже зависит от взаимодействия АА).

Если энергия взаимодействия АА значительно больше, чем амплитуда потенциального рельефа подложки, адсорбированные атомы «игнорируют» этот рельеф и строят свою собственную решетку, период которой не имеет ничего общего с перио-

нии и не согласованы в другом или что эти периоды не кратны, а относятся, скажем, как 2:5 или 3:4 (такие решетки называют **нониусными**).

Рассмотрим теперь, как изменяется структура пленки при увеличении количества адсорбируемого вещества на поверхности. Характер этих изменений существенно зависит от того, какие силы действуют между адсорбированными атомами — притяжения или отталкивания.

Если атомы притягиваются друг к другу, ситуация относительно проста. При

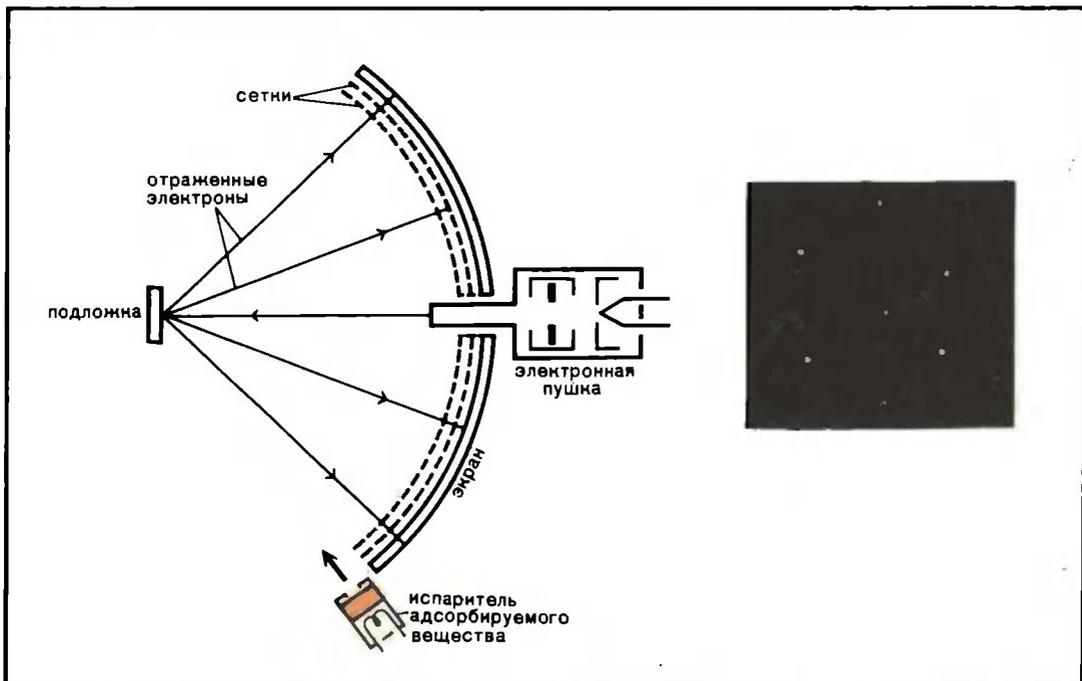


Схема опыта при исследовании структуры поверхностей методом дифракции медленных электронов. Электроны, отразившись от кристалла, движутся между кристаллом и первой сеткой, которая служит для создания эквивалентного пространства у кристалла [потенциалы кристалла и первой сетки одинаковы]. На вторую сетку подается такой потенциал относительно кристалла, что она пропускает к экрану только электроны, не потерявшие энергии при отражении от кристалла. Справа сверху — электронограмма грани [110] кристалла вольфрама.

дом решетки подложки. Такие двумерные решетки называют несогласованными (несоразмерными) с решеткой подложки.

Это, конечно, предельные случаи. Бывает, например, что периоды пленки и подложки согласованы в одном направле-

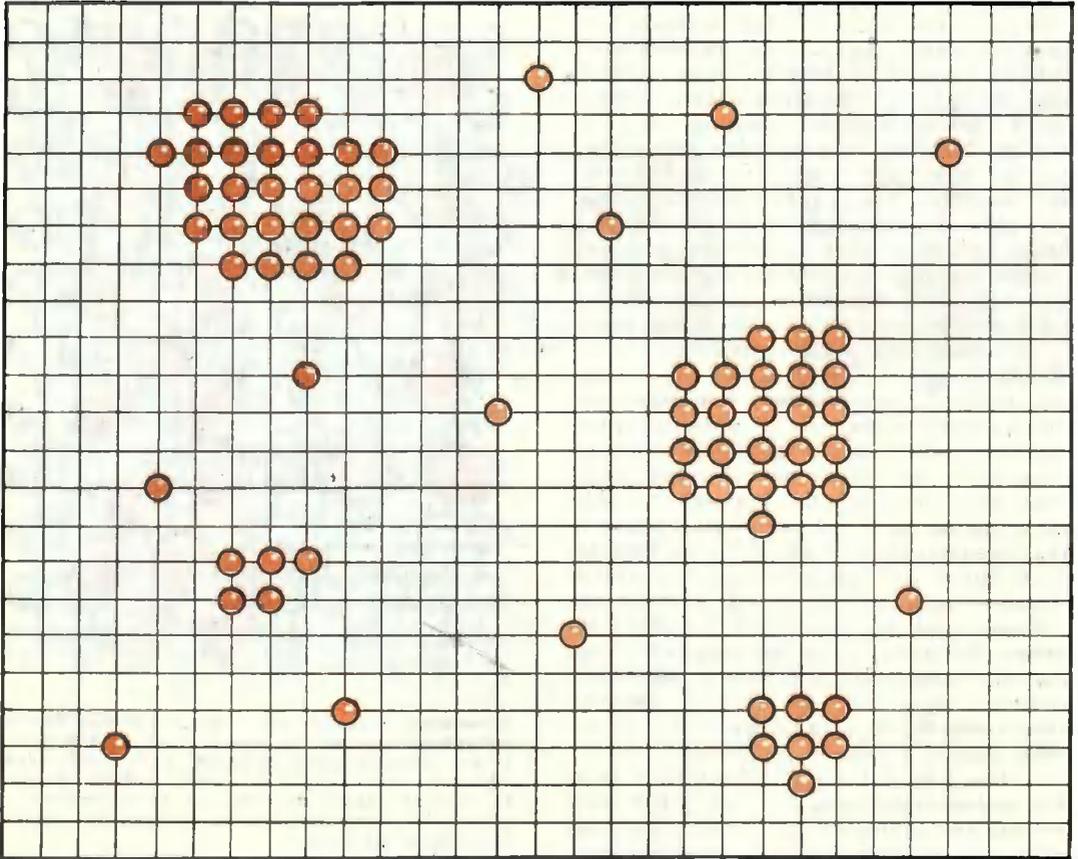
нанесении на поверхность небольшого количества вещества оно будет находиться в состоянии двумерного газа. Когда температура не слишком высока, такой газ обычно называют решеточным, поскольку, хотя атомы расположены в беспорядке друг относительно друга, каждый из них большую часть времени проводит в потенциальных ямах на поверхности. По мере увеличения количества адсорбируемого вещества давление двумерного газа возрастает. Когда оно достигнет некоторого критического значения, атомы начинают объединяться в плотные двумерные островки, которые в зависимости от температуры представляют собой двумерные капли или кристаллики. (Здесь мы предполагаем, что взаимодействие адсорбируе-

мого вещества с подложкой достаточно сильно, так как иначе будут расти трехмерные образования адсорбируемого вещества.) Иными словами, начинается процесс двумерной конденсации. Этот процесс вполне аналогичен тому, что наблюдается в трехмерном случае: если, например, наполнять парами воды замкнутый объем, то при определенном давлении начинается выпадение росы или рост кристалликов льда.

Локально, в пределах двумерного островка, структура пленки соответствует

плотной монослойной упаковке; она может быть согласованной или не согласованной со структурой подложки, что зависит от соотношения энергий взаимодействия АП и АА. Островки находятся в равновесии с двумерным газом. По мере добавления адсорбируемого вещества они разрастаются, пока плотный монослой не покроет сплошь всю поверхность.

Именно такие явления происходят, например, в адсорбированных пленках меди и золота на грани (110) кристалла вольфрама.



Конденсация в адсорбированной пленке. Двумерные кристаллы сосуществуют с двумерным решеточным газом адсорбированных атомов. В виде сетки условно показана совокупность адсорбционных центров (минимумов потенциального рельефа) подложки. По мере увеличения количества адсорбируемого вещества давление двумерного газа возрастает. Когда оно достигнет некоторого критического значения, атомы начинают объединяться в плотные двумерные островки, которые в зависимости от температуры представляют собой двумерные капли или кристаллики.

Картина изменений структуры пленок при отталкивании между адсорбированными атомами значительно интереснее. В качестве примера рассмотрим двумерные решетки, образуемые атомами бария на грани (110) кристалла молибдена. Адсорбированные атомы бария заряжены положительно, отталкиваются друг от друга и потому при малой плотности адсорбированной пленки образуют решетку с большими межатомными расстояниями.

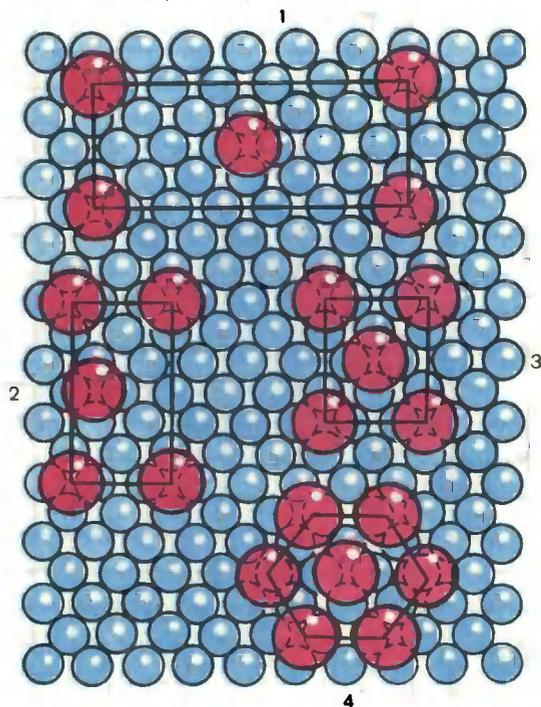
Периоды такой решетки кратны периодам решетки подложки, т. е. пленка согласована с подложкой.

Когда количество бария на поверхности растет, последовательно образуются все более плотные согласованные решетки. Наконец, образуется максимально плотная согласованная решетка, в которой если какие-то потенциальные ямки и остаются незанятыми, то места вокруг них слишком мало, чтобы в них мог поместиться атом. Остаются две возможности: либо начнется заполнение второго монослоя, либо ранее осажденные на поверхности атомы несколько сдвинутся из своих прежних положений и дадут место вновь прибывшему атому в первом монослое. Опыт показывает, что первая возможность часто оказывается энергетически невыгодной. Поскольку связь во втором слое во многих случаях довольно слаба, предпочтительнее некоторая перестройка первого слоя. Это дает возможность еще некоторому числу адсорбированных атомов вступить в непосредственный контакт с подложкой.

Однако в пленке бария на этой стадии взаимодействие АА уже очень велико, и образуется несогласованная с подложкой решетка: у подложки элементарная ячейка (наименьший периодически повторяющийся элемент структуры) представляет собой центрированный прямоугольник, тогда как у пленки ячейка гексагональная, причем ее размер плавно уменьшается по мере увеличения количества адсорбируемого вещества на поверхности. Поскольку адсорбированные атомы отталкиваются друг от друга, энергия адсорбции уменьшается при уплотнении пленки. Наконец, наступает момент, когда энергетически выгоднее начать застройку второго монослоя, поскольку энергия связи здесь будет уже больше, чем в слишком плотном первом монослое.

Мы рассмотрели сравнительно простые случаи. На опыте нередко встречаются и более сложные ситуации, особенно когда проявляется анизотропное взаимодействие адсорбированных атомов через подложку. В качестве примера можно привести решетки, образуемые атомами стронция на грани (112) вольфрама¹. Эта грань построена из параллельных друг другу рядов атомов вольфрама, разделен-

ных «бороздками». При малых плотностях пленки адсорбируемого вещества атомы располагаются в виде цепочек, протянувшихся поперек бороздок и расположенных на расстоянии $\sim 20\text{Å}$ друг от друга. Эту решетку при дальнейшем напылении адсорбируемого вещества сменяет более плотная структура с элементарной ячейкой в виде центрированного прямоугольника, а при еще большем уплотнении слоя структурная согласованность пленки и подложки в одном направлении (вдоль бороздок) нарушается.



Двумерные решетки, образуемые атомами бария, адсорбированными на грани [110] молибдена. 1—3 — согласованные решетки, последовательно образующиеся при уплотнении пленки бария; 4 — гексагональная решетка, не согласованная с подложкой, формируется на последней стадии заполнения монослоя.

Изучение фазовых переходов в субмонослойных пленках представляет большой интерес. Даже для самых простых по составу систем получаются довольно сложные фазовые диаграммы. Разнообразие наблюдаемых двумерных фаз часто бывает просто поразительным. Например, адсорбируемое вещество, которое в массивном состоянии имеет всего одну-две кристаллические модификации, может образовывать до десятка различных двумер-

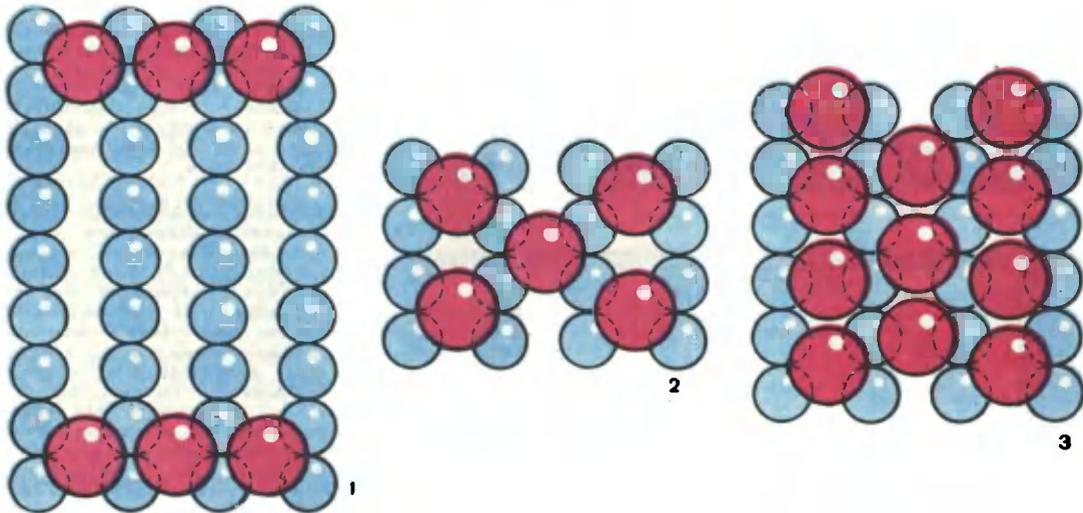
¹Медведев В. К., Якивчук А. И. Структура и электронно-адсорбционные свойства пленок стронция на грани (112) монокристалла вольфрама. — Укр. Физ. журнал», 1975, т. 20, с. 1900.

ных решеток только на одной грани какого-либо кристалла.

Нет сомнения, что исследования в области двумерной кристаллографии принесут еще много интересных открытий.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРОНОВ ПРОВОДИМОСТИ МЕТАЛЛА С ПОВЕРХНОСТЬЮ

В методе дифракции медленных электронов, как и в ряде других методов исследования поверхности, в качестве зон-



Двумерные решетки, образуемые атомами стронция, адсорбированными на поверхности с резко анизотропным потенциальным рельефом [грань (112) вольфрама]. 1 — решетка, образованная линейными цепочками адсорбированных атомов, удаленных друг от друга на 7 периодов решетки подложки; 2 — более плотная структура с элементарной ячейкой в виде централизованного прямоугольника; 3 — еще более плотная структура, период которой не согласован с периодом подложки в направлении вдоль бороздок. Такие же решетки образуют адсорбированные атомы лантана.

да используется пучок электронов, падающий на поверхность извне. К сожалению, нередко такой пучок сам разрушает исследуемый объект. Так, обстрел поверхности металла электронами с энергией, превышающей несколько десятков электронвольт, может привести к десорбции адсорбированных атомов, диссоциации молекул или к нарушению структуры адсорбированной пленки.

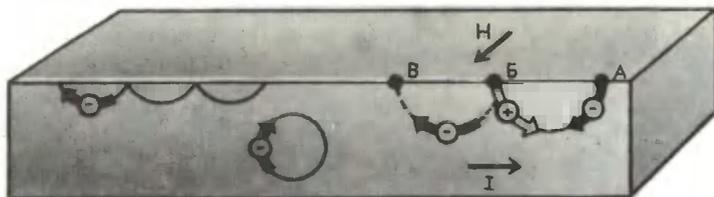
В этой связи кажется весьма заман-

чивым использовать для исследования поверхности электроны проводимости, которые могли бы служить гораздо более «нежным» зондом. Необходимо только найти такое свойство металла, которое в определяющей степени зависело бы от характера взаимодействия электронов проводимости с поверхностью. Таким свойством может служить, например, электропроводность, если обеспечить условия, при которых средняя длина свободного пробега электрона сравнима с толщиной образца. Для этого можно изготовить об-

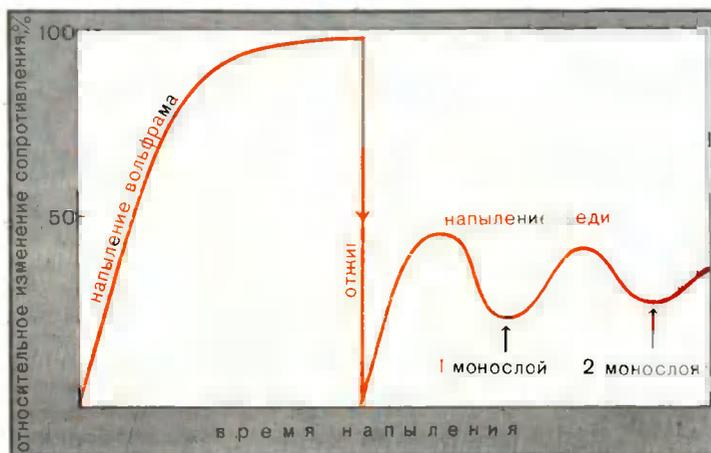
разец в виде достаточно тонкой пластины из очень чистого и совершенного монокристалла и охладить его до низкой температуры. Например, в хороших монокристаллах вольфрама при температуре жидкого гелия (4,2 К) средняя длина свободного пробега электрона достигает миллиметра, и электропроводность пластины толщиной в несколько десятых миллиметра очень сильно зависит от характера рассеяния электронов поверхностью. При зеркальном отражении электронов вклад этого рассеяния в сопротивление пластины равен нулю, а при диффузном отражении сопротивление в основном определяется рассеянием на поверхности.

Еще большую чувствительность электропроводности к рассеянию электронов поверхностью можно вызвать, если поместить охлажденную жидким гелием пластину в сильное магнитное поле, ориентированное параллельно поверхности. В таких условиях поведение электронов в глубине пластины и у ее поверхности принципиально различно. «Глубинные» элект-

роны, двигаясь по орбитам малого радиуса, за время свободного движения (до столкновения) успевают очень мало сместиться в направлении тока, так что их подвижность оказывается подавленной. «Приповерхностные» же электроны многократно отражаются от поверхности и, как бы скользя вдоль нее, сохраняют высокую подвижность. Подвижность электронов будет наивысшей при их зеркальном отражении от поверхности, а с увеличением доли диффузно рассеянных электронов она будет уменьшаться.



Траектории электронов в объеме и у поверхности металлической пластины в присутствии магнитного поля. [В точке В произошла трансформация электрона в дырку.] I — направление тока, H — направление магнитного поля.



Изменение сопротивления вольфрамовой пластины при напылении на поверхность атомов вольфрама и меди. Непосредственно после напыления атомов вольфрама на охлажденный кристалл этот слой является неупорядоченным и вдвое увеличивает сопротивление пластины. Однако достаточно отжечь пластину до температуры, едва превышающей комнатную, как поверхностный слой атомов упорядочивается и сопротивление пластины возвращается к исходному значению. Известно, что моноатомный слой меди на грани [110] вольфрама повторяет структуру исходной поверхности. Соответственно этому при напылении атомов меди в количествах, достаточных для образования монослоя, наблюдаются глубокие минимумы сопротивления.

Таким образом, удельное сопротивление пластины оказывается неоднородным по глубине: малым у поверхности и большим в объеме. Происходящая из-за этого концентрация тока в приповерхностных слоях металлической пластины получила название статического скин-эффекта. Поскольку влияние объема при этом ослабляется, то чувствительность метода дополнительно возрастает.

Характер отражения электронов от поверхности зависит от состояния последней. Если поверхность металлического монокристалла в точности повторяет строение одной из основных внутренних атомных плоскостей, отражение электронов может быть зеркальным. Нарушение периодич-

ности расположения атомов на поверхности должно приводить к усилению диффузного рассеяния электронов.

Рассмотрим несколько характерных результатов, полученных в экспериментах с монокристаллическими пластинами вольфрама.

С помощью метода дифракции медленных электронов установлено, что тщательно приготовленная в вакууме поверхность монокристаллической вольфрамовой пластины, параллельная грани (110), по

своему атомному строению идентична внутренним атомным плоскостям (110).

Эксперименты со статическим скин-эффектом в такой пластине показали, что подобная поверхность рассеивает электроны проводимости с высокой степенью зеркальности: до 80% падающих на поверхность электронов проводимости отражаются от нее зеркально². Отличие коэффициента зеркальности (отношение числа электронов, отразившихся зеркально, к

² Панченко О. А., Луцишин П. П., Птушинский Ю. Г. Статический скин-эффект на атомно чистых поверхностях вольфрама и молибдена.— «ЖЭТФ», 1974, т. 66, с. 2191.

полному числу падающих электронов) от 100% можно объяснить недостаточным совершенством поверхности кристалла, т. е. наличием на ней некоторого количества дефектов кристаллической структуры.

Чувствительность рассеяния электронов проводимости к структуре поверхности хорошо иллюстрируют опыты, в которых на упорядоченную чистую грань (110) вольфрама напылялся моноатомный слой вольфрама. Непосредственно после напыления на охлажденный кристалл этот слой является неупорядоченным и вдвое увеличивает сопротивление пластины. Однако достаточно отжечь пластину до температуры, едва превышающей комнатную, как поверхностный слой атомов упорядочивается и сопротивление пластины возвращается к исходному значению. Чувствительность наблюдаемого эффекта к состоянию поверхности удивительна: ведь исследуемая вольфрамовая пластина содержит сотни тысяч атомных слоев, а добавление лишь одного слоя в неупорядоченном состоянии увеличивает ее сопротивление на 100%³.

Весьма показательны также опыты, в которых на поверхность вольфрамовой пластины напылялись атомы меди. Из опытов по дифракции медленных электронов известно, что моноатомный слой меди на грани (110) вольфрама повторяет структуру исходной поверхности. Соответственно этому в экспериментах со статическим скин-эффектом при напылении атомов меди в количествах, достаточных для образования монослоя, наблюдаются глубокие минимумы сопротивления⁴.

Несколько неожиданными оказались результаты исследования статического скин-эффекта в пластине, поверхность которой параллельна кубической грани (100). В отличие от предыдущего случая эта поверхность даже в атомарно-чистом состоянии ведет себя по отношению к рассеянию электронов проводимости как диффузная. Это кажущееся противоречие в поведении электронов на поверхностях разной кристаллографической ориентации можно объяснить особенностями электронного строения вольфрама.

В переносе электрического тока в вольфраме участвуют как электроны, так и

дырки, и анализ показывает, что при их столкновении с поверхностью (100) (но не (110)!) может происходить весьма своеобразный процесс взаимного превращения электронов в дырки и наоборот. Если такой процесс имеет место, то при соблюдении двух основных признаков зеркальности отражения (сохранения энергии частицы и составляющей ее скорости вдоль поверхности) носитель тока не будет уже так свободно скользить вдоль поверхности. Испытывая всякий раз перезарядку, он будет перемещаться то вперед, то назад. В результате зеркальная поверхность станет эффективно диффузной⁵.

Таким образом, электроны проводимости металла действительно очень чутко отзываются на изменение состояния его поверхности. Это дает в руки исследователей новый весьма чувствительный метод диагностики поверхности и адсорбированных пленок.

³Панченко О. А., Харламов А. А., Птушинский Ю. Г. Влияние электронно-дырочных перебросов на статический скин-эффект в кристаллах вольфрама.— «ЖЭТФ», 1974, т. 67, с. 780.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Большов Л. А., Напартович А. П., Наумовец А. Г., Федорус А. Г. СУБМОНОСЛОЙНЫЕ ПЛЕНКИ НА ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛОВ.— «УФН», 1977, т. 122, с. 125

НОВОЕ В ИССЛЕДОВАНИИ ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДОГО ТЕЛА. Сб., вып. I, II. М., 1977.

³Харламов А. А., Панченко О. А., Яковкин И. Н. Взаимодействие электронов проводимости с гранью (110) монокристалла вольфрама.— «ЖЭТФ», 1976, т. 71, с. 760.

⁴Там же.

Камни на значках

Профессор В. В. Ляхович
Москва

Значки — чуть ли не самый распространенный объект коллекционирования. Обычно их собирают по сюжетам, таким, например, как «города», «спорт», «космос» и т. п. Гораздо реже коллекци-

онеры обращают внимание на материал, из которого сделаны значки. А между тем они и с этой точки зрения очень интересны. Чаще всего встречаются значки, сделанные из металла и стекла. Иногда для изготовления значков используется фарфор, дерево и т. п. Особенно привлекательны, с моей точки зрения, значки, украшенные кусочками мине-

ралов или сделанные из отполированных пластинок горных пород.

Значки с камнем выпускаются не так уж часто, главным образом в память о событиях, съездах, юбилеях. Но за несколько лет нам с сыном удалось собрать довольно обширную коллекцию. Небольшая часть ее представлена на фотографиях.



В первом ряду: сувенирные значки «Свердловск», выполненные из разного рода яшм. Во втором: сувенирный значок «Ленинград», обсидиан; значок, выпущенный в честь успешного завершения XIV рейса научно-исследовательского судна «Дмитрий Менделеев» [базальт, использованный для значка, поднят с глубины 4600 м в Тихом океане]. В третьем ряду: значок к 25-летию Латвийской ССР, янтарь; «День рыбака», янтарь.

Значки с камнем.

В первом и втором ряду сверху — серия «Цветные камни». Слева направо: лазурит; родонит; нефрит; агат; аметист, яшма и амазонит; яшма; халцедон; яшма. В третьем ряду: значок Криворожского горного техникума, джеспилит; три значка с выращенными кристаллами цитрина, аметиста, кварца. В четвертом ряду: значок, посвященный XIII Всесоюзному чемпионату по боксу, родонит; сувенирный значок из рубинового стекла; сувенирный значок «30 лет Гражданской авиации СССР», амазонит. В пятом ряду: эмблема чехословацкого объединения «Геоиндустрия», пироп; значок, выпущенный в честь 20-летия 120-й Комплексной геологической экспедиции, малахит; сувенирный значок «Свердловск» из лазурита.



Спектр чармония и взаимодействие кварков

М. Б. Волошин



Михаил Борисович Волошин, кандидат физико-математических наук, младший научный сотрудник Института теоретической и экспериментальной физики. Работает в области квантовой теории поля и физики элементарных частиц. Основные научные интересы относятся к физике тяжелых кварков и калибровочным теориям слабого, электромагнитного и сильного взаимодействий.

Открытие J/Ψ -мезона в ноябре 1974 г., принесшее С. Тингу и Б. Рихтеру Нобелевскую премию по физике 1976 г.¹, вызвало цепную реакцию блестящих экспериментальных результатов и теоретических идей. Исследования, продолжающиеся в течение четырех лет, подтвердили гипотезу, выдвинутую практически сразу же после открытия, что этот мезон является лишь одним из состояний связанной системы, состоящей из очарованного кварка c и очарованного антикварка \bar{c} , названной чармонием, по аналогии с позитронием — связанной системой, состоящей из электрона и позитрона.

Отличие чармония от ранее известных частиц — адронов, участвующих в сильных взаимодействиях, заключается в том, что из-за большой массы c -кварков скорости их движения в чармонии нерелятивистские, т. е. существенно меньшие скорости света. Это обстоятельство делает

чармоний уникальной «лабораторией» для изучения сильного взаимодействия кварков, так как, благодаря нерелятивистскому характеру движения c -кварков, их взаимодействие в чармонии можно описывать потенциалом и рассчитывать характеристики различных мезонов — уровней системы в потенциале — с помощью нерелятивистской квантовой механики.

В этой статье рассказывается о теоретической схеме, описывающей сильное взаимодействие кварков, и о том, как изучение свойств уровней чармония позволяет исследовать эту схему.

КВАРКИ

Чтобы пояснить, почему чармоний должен быть «более нерелятивистской» кварковой системой, чем адроны, известные до открытия J/Ψ -мезона, и почему важно изучать его свойства, следует вернуться к тем теоретическим представлениям о сильном взаимодействии кварков, которые сложились до открытия чармония и были к тому времени уже достаточно глубоко разработаны.

Идея о том, что адроны — мезоны и барионы — не являются элементарными точечными объектами, а «из чего-то состоят», впервые была высказана Э. Ферми и Ч. Янгом в 1949 г. Открытие странных

¹ О ранних исследованиях J/Ψ -мезона и родственных ему частиц, а также о схеме с очарованным кварком см.: Окунь Л. Б. Новые мезоны. — «Природа», 1976, № 8, с. 28. О нобелевских лауреатах С. Тинге и Б. Рихтере см.: Кобзарев И. Ю. Лауреаты Нобелевской премии по физике — С. Тинг, Б. Рихтер. — «Природа», 1977, № 1, с. 133.

частиц привело к созданию в начале 60-х годов М. Гелл-Манном и Д. Цвейгом кварковой модели, согласно которой адроны состоят из точечных объектов — кварков. Для описания известных в то время нескольких десятков адронов Гелл-Манну и Цвейгу понадобилось всего три кварка — u , d и s . Спин каждого из них равен $1/2$, а электрические заряды (в единицах заряда протона) — дробные: $Q_u = +2/3$, $Q_d = Q_s = -1/3$. Мезоны (π -мезоны, K -мезоны и т. д.) в кварковой модели состоят из кварка и антикварка, а барионы (p и, в частности, наиболее важные для нас протон и нейтрон) — из трех кварков. Комбинируя по этому нехитрому правилу три основных кирпичика — кварка, оказалось возможным сконструировать все известные (до 1974 г.) адроны. Более того, такое конструирование не давало лишних объектов — все частицы, построенные по этим правилам, рано или поздно обнаруживались на опыте.

Однако, несмотря на столь впечатляющий успех кварковой модели в классификации адронов и в объяснении отдельных их характеристик (отношений масс, магнитных моментов и т. п.), состояние самой модели не могло принести полного удовлетворения. Чувство неудовлетворенности вызывали два вопроса: во-первых, откуда взялись правила комбинирования кварков и почему они именно такие, и, во-вторых, какие силы удерживают кварки вместе внутри адронов.

Полные и обоснованные ответы на эти вопросы отсутствуют и по сей день; однако в понимании того, как эти ответы должны выглядеть, решающим оказалось понятие цвета. Это понятие было введено сразу несколькими физиками в 1964—1965 гг. для разрешения противоречия между спином и статистикой кварков, возникшего при конструировании барионов. Согласно гипотезе цвета, кварк каждого сорта (u , d и s) существует в трех разновидностях, которые были названы цветами (например, красный u -кварк, желтый u -кварк и синий u -кварк). В этой схеме три кварка в барионе всегда имеют три разных цвета. Например, так называемый Ω^- -гиперон состоит из красного, желтого и синего s -кварков. Именно такая цветовая структура устраняет противоречие между спином и статистикой, так как в противном случае пришлось бы иметь по крайней мере два (а в Ω^- -гипероне — три) тождественных фермиона (кварка) в одном и том же квантовом состоянии, что, как известно, запрещено принципом Пау-

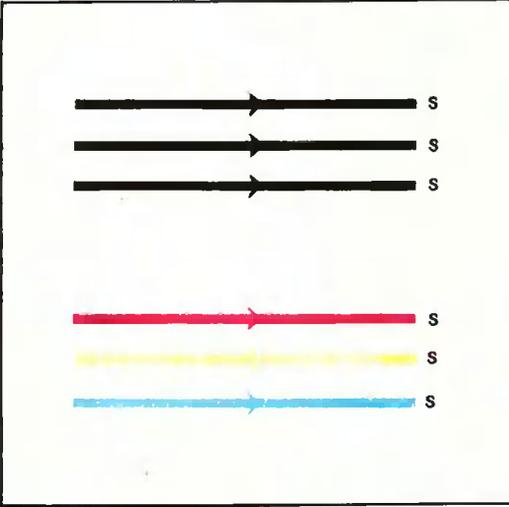
ли. Продолжая цветовую терминологию, можно сказать, что барионы — бесцветные (белые), так как в них в равных пропорциях представлены три основных цвета. Разумеется, не следует придавать буквального смысла цветам кварков — это всего лишь своего рода «ярлыки», с помощью которых удобно различать три разновидности кварков одного сорта. (Можно было бы приписать кваркам не цвета, а просто номера, например u_1 , u_2 , u_3 .) Однако цветовая терминология в общих чертах правильно и, что немаловажно, образно передает смысл формальной математики модели.

На языке цвета антикварки имеют цвета, дополнительные к основным, и поэтому мезоны, состоящие из кварков и антикварков, также являются белыми. Таким образом, правила конструирования адронов с помощью цвета можно переформулировать как требование, чтобы физические (т.е. наблюдаемые на опыте) адроны были белыми. Этому требованию не удовлетворяют никакие комбинации кварков и антикварков, кроме основных: «кварк — антикварк» и «три кварка разных цветов», а также многократных повторений этих основных комбинаций. В частности, не удовлетворяют этому требованию и сами кварки.

Были предприняты многочисленные попытки обнаружить на опыте цветные частицы. Особенно интенсивно искались свободные кварки. Их искали в космических лучах и на ускорителях, в водороде и в тяжелых элементах, в скальных породах и в морской воде. Время от времени появлялись сообщения об обнаружении свободных кварков, однако при более детальном анализе эти результаты не подтверждались. Так или иначе, до настоящего времени свободных кварков не найдено, и большинство теоретиков не без оснований считают, что и дальнейшие поиски в этом направлении не принесут успеха.

Отрицательный результат поисков кварков особенно интересен в связи с тем, что отказаться от кварковой модели уже невозможно, потому что кварки **внутри адронов** наблюдаются в опыте. Речь идет об экспериментах по так называемому глубоко неупругому рассеянию электронов и нейтрино высоких энергий на нуклонах (протонах и нейтронах), начало которым было положено в конце 60-х годов опытами с электронами на Станфордском линейном электронном ускорителе. Эти опыты позволяют в настоящее время исследовать внутреннюю структуру нукло-

нов на расстояниях примерно до 10^{-15} см (своего рода электронный и нейтринный микроскопы с разрешением порядка 10^{-15} см). В результате этих экспериментов было обнаружено, что на таких расстояниях электроны и нейтрино рассеиваются на точечных объектах, находящихся внутри нуклона. Квантовые числа этих объектов (спин, электрический заряд), названных первоначально Р. Фейнманом партонами, оказались в точности такими же, какие должны быть у кварков Гелл-Манна и Цвейга. Это означает, что наблюдаемые



Кварковая структура Ω^- -гиперона в модели бесцветных кварков (вверху) и в модели цветных кварков (внизу). В первой модели три бесцветных s -кварка находятся в Ω^- -гипероне в одном и том же квантовом состоянии, что запрещено принципом Паули. В модели цветных кварков три s -кварка, образующие Ω^- -гиперон, всегда имеют разные цвета и поэтому не являются тождественными. В этом случае они могут находиться в одном и том же квантовом состоянии, не нарушая принципа Паули. Так как Ω^- -гиперон состоит из кварков трех основных цветов, можно сказать, что эффективно он белый.

в опытах по глубоко неупругому рассеянию партоны и есть кварки.

ГЛЮОНЫ И НЕВЫЛЕТАНИЕ КВАРКОВ

Описанную выше ситуацию можно резюмировать следующим образом: кварки внутри адронов существуют, а в свободном состоянии их нет. Это утверждение выражает суть гипотезы невылета-ния кварков, или, в более общем варианте,

гипотезы невылетаия цветных состояний. Надежду на динамическое описание столь странного, на первый взгляд, поведения кварков вселяет в теоретиков квантовая хромодинамика — теория сильного взаимодействия цветных кварков.

Квантовая хромодинамика строится по образу и подобию электродинамики и, с другой стороны, полностью основывается на понятии цвета. Аналогом цвета в электродинамике является электрический заряд. Действительно, все микро- и макро-объекты можно классифицировать по величине их электрического заряда; хромодинамические объекты классифицируются по их цвету. Однако в электродинамике, кроме задачи «бухгалтерского учета», заряд выполняет также еще одну важную функцию — он определяет электромагнитное взаимодействие заряженных тел. В квантовой электродинамике это взаимодействие происходит за счет обмена квантами поля — фотонами. Точно так же в квантовой хромодинамике взаимодействие между кварками происходит за счет обмена квантами хромодинамического поля — глюонами. (Слово «глюон» происходит от английского «glue» — клей; глюоны «склеивают» кварки в адронах.) В электродинамике фотоны излучаются и поглощаются электрическим зарядом, в хромодинамике глюоны излучаются и поглощаются цветовым зарядом — цветом.

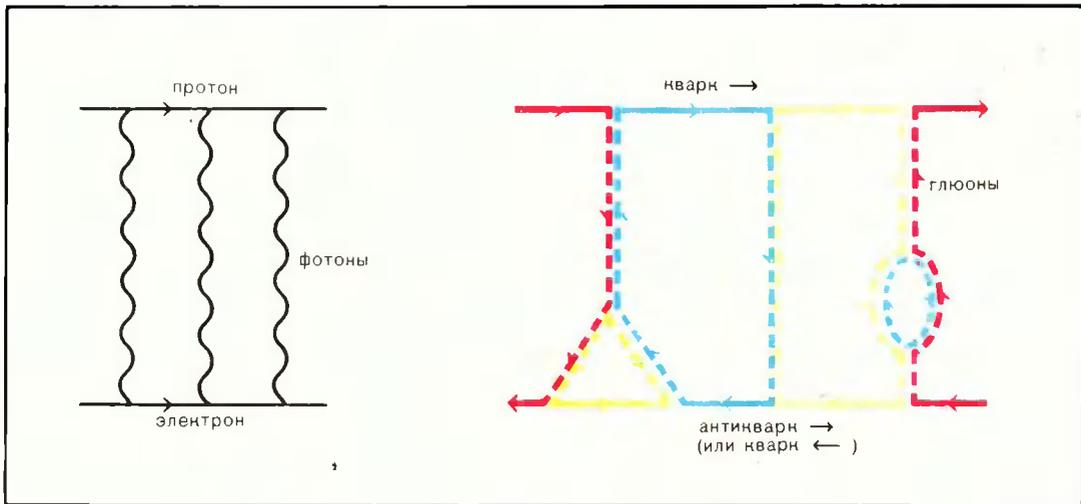
В отличие от электродинамики, где фотон существует только в одной разновидности и сам заряда не несет, в хромодинамике глюоны существуют в восьми цветовых разновидностях и «заряжены» цветом. (Здесь наглядно описать «раскраску» уже не так просто, как для кварков.) В общетеоретическом плане хромодинамика относится к классу так называемых калибровочных теорий, к которым принадлежат также электродинамика и теория гравитации. Общим свойством калибровочных теорий является то, что любой объект, обладающий соответствующим зарядом, излучает и поглощает кванты поля. В электродинамике электрический заряд излучает фотоны вне зависимости от того, каким объектом он переносится, в теории гравитации роль гравитационного заряда выполняют энергия (масса) и импульс, которые взаимодействуют с квантами поля — гравитонами — даже в том случае, если эти энергия и импульс переносятся самими гравитонами. Так же и в хромодинамике — глюоны взаимодействуют универсально со «всеми цветным» и в том числе с глюонами. В этом пункте хромо-

динамика похожа на гравитацию и отличается от электродинамики, в которой фотоны друг с другом не взаимодействуют.

Математически это различие выражается в том, что уравнения Максвелла для электромагнитного поля линейны, а уравнения глюонного поля существенно нелинейны. Нелинейность полевых уравнений и обуславливает те свойства квантовой хромодинамики, которые питают надежды теоретиков на то, что эта теория позволит описать как поведение кварков

внутри адронов, так и невозможность расщепления адронов на составляющие их кварки.

Важнейшее из этих свойств было открыто в 1973 г. Г. Политцером из Гарварда и, независимо, Д. Гроссом и Ф. Вильчеком из Принстона. Это свойство получило название асимптотической свободы и заключается в том, что если два цветных объекта взаимодействуют посредством обмена глюонами на малых расстояниях, то их взаимодействие становится тем слабее, чем меньше расстояние между ними.

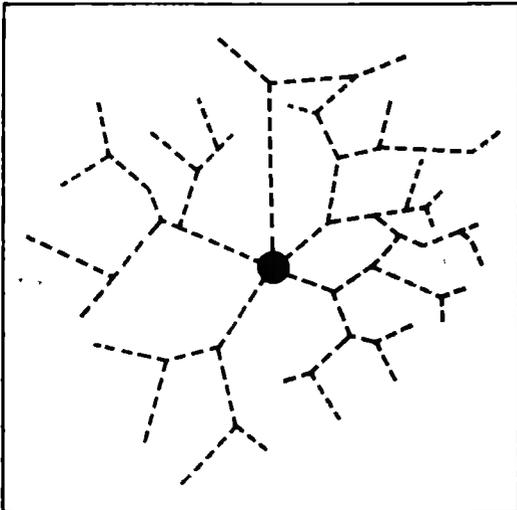


Взаимодействие в электродинамике и в хромодинамике. Протон и электрон в атоме водорода (слева) взаимодействуют посредством обмена фотонами. Цветные кварк и антикварк взаимодействуют, обмениваясь цветными глюонами (справа). В отличие от фотонов глюоны могут «ветвиться», т. е. испускать и поглощать новые глюоны. Возможно, это свойство глюонного поля и приводит к неслетанию кварков. Горизонтально слева направо идет ось времени; согласно правилам квантовой теории, антикварк, идущий вперед по времени, можно заменить кварком, идущим вспять по времени (прием Фейнмана), и использовать для «раскраски» не дополнительные цвета, отвечающие антикваркам, а три основных цвета кварка. С помощью этого приема можно описать и раскраску глюонов. Их удобно изображать линиями с двойным цветом, причем каждый из двух цветов глюона «течет» в разные стороны (стрелки на рисунке). Отметим, что при испускании глюона цвет кварка, вообще говоря, меняется. Обратим внимание также на то, что линии каждого из основных цветов непрерывны, это свойство линий цвета отвечает сохранению цвета в квантовой хромодинамике, аналогу сохранения заряда в электродинамике.

(На малых расстояниях сильное взаимодействие «слабеет».) Именно это открытие послужило толчком к дальнейшему развитию квантовой хромодинамики, так как оно означает, что нелинейность уравнений поля не слишком существенна на малых расстояниях и можно корректно вычислять различные характеристики целого ряда процессов с участием адронов. В частности, стало возможным рассчитывать результаты опытов по глубоко неупругому рассеянию, о которых шла речь выше. В настоящее время во всех случаях, где возможно сравнение предсказаний квантовой хромодинамики с опытом, теория дает правильный ответ, и отказаться от нее, по-видимому, уже так же невозможно, как и от кварков.

Не менее интересные явления ожидаются, если разводить цветные объекты друг от друга на все большие и большие расстояния (например, «растаскивать» кварк и антикварк, образующие мезон). В этом случае из свойства асимптотической свободы следует, что взаимодей-

стве должно возражать с увеличением расстояния. Когда взаимодействие становится действительно сильным, становится существенной и нелинейность в уравнениях поля, и, к сожалению, при этом перестают быть применимыми известные вычислительные методы квантовой теории поля. Всеобщая надежда состоит в том, что взаимодействие продолжает расти (а нелинейность, по-видимому, значительно усиливает этот рост) и что, в конечном итоге, оказывается невозможным развести кварки на сколько-нибудь значительные



Изолированный кварк обрастает «шубой» из порожденных им ветвящихся глюонных полей. Масса этого «нагромождения» полей может быть очень большой или даже бесконечной.

расстояния, так как для этого необходима огромная (бесконечная в пределе бесконечного расстояния между кварками) энергия.

Такое поведение можно представить и так, что изолированный цветной объект (кварк) создает вокруг себя глюонное поле, которое, в свою очередь, также создает глюонное поле и так далее (это и означает нелинейность). В результате цветовой заряд обрастает бесконечно тяжелой «шубой» из глюонных полей. Поэтому энергия (масса) всего этого образования бесконечно велика. (Некоторые теоретики полагают, что энергия цветного объекта все-таки конечна, но очень велика — это почти одно и то же, так как неясно, можно ли различить эти возмож-

ности экспериментально.) В белых же объектах (физических адронах) цветовые заряды кварков взаимно скомпенсированы, и глюонное поле не выходит наружу — все силовые линии поля замыкаются между кварками. Масса поля, заключенного внутри белого адрона, конечна и весьма ощутима. Так, например, есть основания полагать, что почти вся масса протона сосредоточена во внутреннем глюонном поле.

Именно такая качественная картина представляется многим физикам ответственной за невылетание цветных объектов вообще и кварков в частности. Пока еще никто не доказал гипотезу невылетания цвета, однако этот недостаток относится, скорее всего, не к теории — квантовой хромодинамике, а к нашему неумению обращаться с ней в области сильной нелинейности. Именно отсутствие законченной теории делает важным изучение таких систем, как чармоний, для которых можно формализовать качественную картину ожидаемых свойств взаимодействия кварков. Как мы видели, эти свойства пока еще не удается вывести из основных принципов исходной теории.

ЧАРМОНИЙ

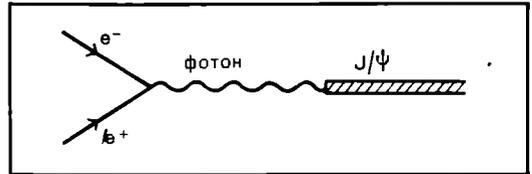
Как уже говорилось в самом начале, чармоний является системой, состоящей из нового кварка c и соответствующего ему антикварка \bar{c} . О существовании наряду с тремя кварками Гелл-Манна и Цвейга еще четвертого кварка с теоретики подозревали с 1964 г. Эта гипотеза была высказана американскими физиками Д. Бьеркеном и Ш. Глэшоу и, независимо, японским теоретиком Й. Харой. Кварк с несет новое квантовое число — очарование, или чарм (по английски *charm*, откуда и обозначение «с-кварк»). В чармонии, однако, это новое квантовое число не проявляется в явном виде, так как чарм с-кварка компенсируется «античармом» его партнера — \bar{c} -антикварка. Спин с-кварка, так же как и остальных кварков, равен $1/2$, а электрический заряд $Q_c = +2/3$. Так как цветовые свойства кварков не зависят от сорта кварка, то сильное взаимодействие всех четырех кварков («старых» — u, d, s и нового — c) одинаково. С другой стороны, масса с-кварка намного превышает массы «старых» кварков, и поэтому естественно ожидать, что движение с-кварков в чармонии намного медленней, чем движение обычных кварков в легких адронах. Действительно, характерные импульсы кварков в адроне, согласно соотно-

шению неопределенностей, определяются размером адрона R (радиусом невылета-ния): $p \sim \hbar/R$. Численно величина \hbar/R составляет $0,3-0,5$ ГэВ/с (здесь c — скорость света) и, грубо говоря, одинакова для всех адронов. Немного забега вперёд, скажем, что масса с-кварка (внутри адрона) m_c составляет примерно половину массы J/ψ -мезона, т. е. около $1,6$ ГэВ/с², и поэтому для с-кварков в чармонии характерные значения скорости $v = p/m_c$ должны быть существенно меньше скорости света c . (Более детальное рассмотрение показывает, что в J/ψ -мезоне $v^2/c^2 \approx 0,2$.) Благодаря этому при анализе свойств чармония в значительной степени можно избежать усложнений, возникающих при рассмотрении легких адронов, в которых кварки имеют ультра-релятивистские скорости. Последовательная же теория релятивистских связанных систем отсутствует и по сей день.

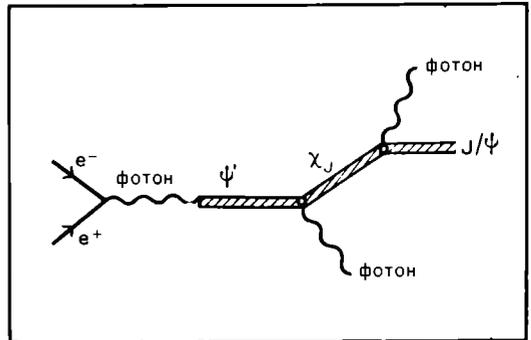
Прежде чем переходить к рассказу о том, как описываются характеристики уровней чармония в теоретических моделях и каковы экспериментальные данные, обсудим классификацию этих уровней и их квантовые числа. Состояния нерелятивистской пары $c\bar{c}$ классифицируются аналогично уровням позитрония по орбитальному угловому моменту относительного движения кварков L , суммарному спину кварка и антикварка S (напомним, что кварк и антикварк имеют спин по $1/2$ каждый, поэтому суммарный спин может принимать значения $S=0$ или $S=1$), а также по полному угловому моменту J , составленному из L и S : $J=L+S$. Компактно эти три величины записываются в виде символа $^{2S+1}L_J$. Так, J/ψ -мезон является 1^3S_1 уровнем, где единица впереди символа означает, что это есть основной 3S_1 уровень, а ψ' -мезон с массой около $3,7$ ГэВ/с² является радиально возбужденным 3S_1 уровнем, т. е. 2^3S_1 (напомним также, что здесь, как и в атомной физике, значения L обозначаются не цифрами $0, 1, 2, \dots$, а буквами S, P, D, \dots).

Значения L и S определяют важнейшие квантовые числа уровней чармония — пространственную P - и зарядовую C -четности: $P = (-1)^{L+1}$, $C = (-1)^{L+S}$. P - и C -четности характеризуют преобразование волновой функции квантовомеханической системы при пространственных отражениях и при замене всех частиц античастицами соответственно. Важность этих квантовых чисел заключается в том, что они сохраняются во всех процессах, обусловленных сильным и электромагнитным взаимодействием. Сохранение пространственной и заря-

довой четностей определяет, наряду с сохранением полного углового момента, те реакции рождения и распада, в которых может участвовать тот или иной уровень чармония. Для 3S_1 -состояний — J/ψ и ψ' -мезонов — $L=0$ и $S=1$, поэтому P - и C -четности этих частиц отрицательны, а их полный угловой момент равен единице. (Эти характеристики записывают в виде $J^{PC} = 1^{--}$.) Точно такими же квантовыми числами обладает фотон, и поэтому эти частицы наблюдаются как очень сильные резонансы в однофотонной e^+e^- -аннигиляции.



J/ψ -мезон, так же как и ψ' и ряд других частиц, обладает квантовыми числами фотона: $J^{PC} = 1^{--}$, поэтому он рождается в однофотонной e^+e^- -аннигиляции и наблюдается как очень мощный резонансный пик в сечении аннигиляции.

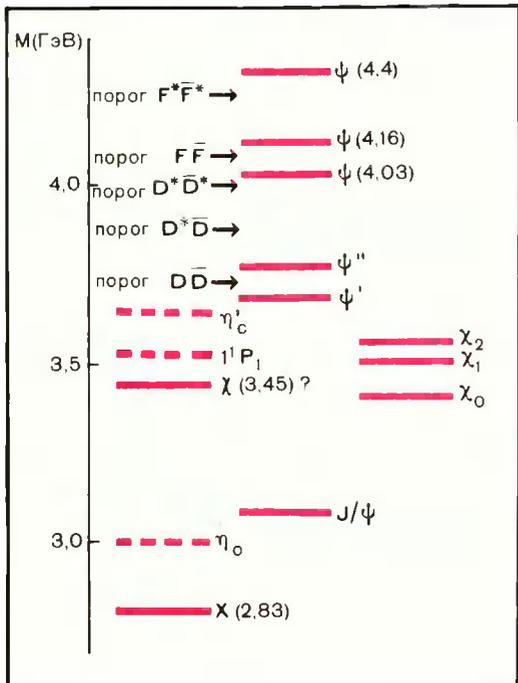


P -уровни чармония [χ_J -мезоны] имеют квантовые числа, отличные от квантовых чисел фотона, и поэтому не являются резонансами в однофотонной e^+e^- -аннигиляции. На опыте эти уровни наблюдаются в радиационных распадах ψ' -мезона. В дальнейшем возможен переход из χ_J -состояния в J/ψ -состояние испусканием фотона. Такие двухфотонные каскады наблюдались на опыте в Гамбурге.

Однако уже первые орбитальные возбуждения — P -уровни — не могут рождаться в однофотонной e^+e^- -аннигиляции, так как для этих уровней $L=1$ и их пространственная четность P положительна (а у фотона — отрицательна). Зарядовая четность P -уровней зависит от величины полного спина кварков S ; она положительна для 3P_J -уровней ($S=1, J=0, 1, 2$) и отрицательна для 1P_1 -уровня ($S=0, J=1$). Так

как состояния 3S_1 и 3P_1 имеют разные С-четности, между ними возможны радиационные переходы, т. е. эти состояния могут переходить друг в друга с испусканием фотона (С-четность которого отрицательна). Более того, такие переходы являются электрическими дипольными, и поэтому их вероятность весьма велика.

Именно описанные выше свойства 3S_1 и 3P_1 состояний чармония позволили обнаружить эти частицы на опыте. Основные исследования уровней чармония были выполнены в Станфорде (США) и Гамбург



Уровни чармония и их массы. В средней части изображены мезоны с квантовыми числами $J^PC \approx 1^{--}$, которые наблюдаются как резонансы в e^+e^- -аннигиляции. Частицы χ_0 , χ_1 и χ_2 , изображенные в правой части рисунка, являются 1^3P_J -уровнями ($J=0, 1$ и 2). В левой части находятся мезоны $\chi(2.83)$ и $\chi(3.45)$, природа которых остается невыясненной. В частности, противоречивой оказывается интерпретация этих частиц как уровней парачармония η_c и η_c' -мезонов. Поэтому η_c и η_c' -мезоны изображены пунктирными линиями при тех значениях массы, которые предсказываются теорией. Неоткрытым остается также и 1^1P_1 уровень чармония (также изображенный пунктирной линией), квантовые числа которого сильно затрудняют его наблюдение на опыте.

ге (ФРГ) на установках со встречными пучками электронов и позитронов. J/ψ - и ψ' -мезоны были открыты, как уже говорилось выше, в ноябре 1974 г. в Станфорде как чрезвычайно мощные резонансы (пики) в сечении (вероятности) аннигиляции электрона и позитрона. Так, сечение аннигиляции в максимуме резонансного пика J/ψ -мезона в 100 раз превышает величину сечения вне пика. Летом 1975 г. триплетные Р-уровни чармония (1^3P_J) были обнаружены по монохроматическим (т. е. с определенной энергией) фотонам, испускаемым в распадах $\psi' \rightarrow 1^3P_J + \gamma$. Монохроматичность фотонов, наблюдаемых на опыте в таких распадах, следует из того, что ψ' -частицы образуются электроном и позитроном, сталкивающимися с одинаковыми энергиями, и поэтому рождающиеся ψ' -мезоны находятся в покое. Благодаря этому, энергия γ -кванта строго определена и равна приблизительно разности масс начального состояния чармония (ψ') и конечного (1^3P_J) (за исключением малой поправки к энергии фотона за счет движения конечного состояния чармония). Одновременно были найдены случаи с образованием каскада из двух фотонов, когда первый испускается в распаде $\psi' \rightarrow 1^3P_J + \gamma$, а второй — в последующем распаде $1^3P_J \rightarrow J/\psi + \gamma$. Найденные таким образом на опыте 1^3P_J -уровни чармония обычно обозначают χ_J . Всего этих уровней три: χ_0 , χ_1 и χ_2 , — в согласии с тем, что полный момент J , составленный из $L=1$ и $S=1$, может принимать три значения: 0, 1 и 2. Массы этих частиц (в энергетической шкале) равны примерно 3,41, 3,50 и 3,55 ГэВ соответственно.

РАДИАЦИОННЫЕ ПЕРЕХОДЫ В ЧАРМОНИИ

Оказывается, что изучение только этих пяти уровней чармония (J/ψ , ψ' , χ_0 , χ_1 и χ_2) уже может дать весьма полезную и обширную информацию как о «внутреннем устройстве» чармония, так и о свойствах взаимодействия кварков. Наиболее интересным оказывается рассмотрение вероятностей описанных выше радиационных переходов. Вероятность того или иного распада в единицу времени (число распадов в секунду) принято называть парциальной шириной распада (слово «парциальная» часто опускается) и выражать в единицах s^{-1} или в энергетических единицах (при этом ширине 1 кэВ соответствует вероятность $1,519 \cdot 10^{18} s^{-1}$). Ширины переходов $\psi' \rightarrow \chi_J + \gamma$ для каждого из уровней χ_J примерно одинаковы и составляют около

20 кэВ. Теоретически, если переходы электрические дипольные, эти ширины должны относиться как величины $\omega_j^3 (2J+1)$ для каждого из уровней, где ω_j — энергия фотона, излучаемого в переходе $\Psi' \rightarrow \chi_j + \gamma$ (приближенно равная разности масс Ψ' и χ_j). При принятой идентификации χ_j -уровней (χ_0 — самый легкий, χ_2 — самый тяжелый) величины $\omega_j^3 (2J+1)$ приблизительно одинаковы для всех трех значений J , что вместе с экспериментальными значениями отношений подтверждает как правильность принятой идентификации, так и предположение о малости вклада высших мультиполей (последнее является следствием нерелятивистского характера движения в чармонии).

Квантовые числа J_j -уровней и структура радиационных переходов исследуются также с помощью изучения распределения фотонов, испускаемых в переходах $\Psi' \rightarrow \chi_j + \gamma$, по углу θ между осью начальных пучков электронов и позитронов, в столкновении которых рождается Ψ' , и направлением вылета фотона. Для уровня χ_0 с квантовыми числами $J^{PC} = 0^{++}$ вероятность перехода пропорциональна $(1 + \cos^2\theta)$; для переходов на уровни χ_1 и χ_2 , в предположении, что эти переходы чисто электрические дипольные, предсказываются угловые распределения

$$\left(1 - \frac{1}{3} \cos^2\theta\right) \text{ и } \left(1 + \frac{1}{3} \cos^2\theta\right)$$

соответственно. Для перехода на уровень χ_0 экспериментальные данные подтверждают теоретическое предсказание характеристик углового распределения, для остальных же двух уровней данные не противоречат приведенным выше формулам, однако экспериментальные ошибки пока еще велики, и окончательные выводы из этих данных делать рано.

Вычисление абсолютных значений ширины, а не только их отношений, требует привлечения той или иной модели взаимодействия кварков в чармонии. Именно в этом пункте можно попытаться получить конкретные физические предсказания из теоретических моделей взаимодействия кварков на больших расстояниях.

Поскольку чармоний с определенной степенью точности можно рассматривать как нерелятивистскую систему, постольку оправдано применить к нему описание взаимодействия с помощью потенциала. (Для релятивистских систем потенциальное описание неприменимо.) Вообще говоря, заранее не очевидно, что эффекты описанного выше нагромождения глюонных по-

лей, порожденного кварками, разведенными на большое расстояние, сведутся к потенциальным силам, действующим между кварком и антикварком. Однако исключить эту простейшую возможность нельзя, и, во всяком случае, имеет смысл проанализировать, к каким выводам приведет это предположение.

Какой потенциал может считаться разумным? Когда кварк и антикварк находятся на малом относительном расстоянии, то, в силу свойства асимптотической свободы, нелинейность в уравнениях глюонного поля не очень существенна, и потенциал является таким же, как потенциал взаимодействия двух заряженных тел в электродинамике. Т. е. на малых расстояниях потенциал аналогичен кулоновскому $V(r) = -\tilde{\alpha}/r$ (r — координата). Безразмерная величина $\tilde{\alpha}$ здесь описывает силу взаимодействия, так же как в электродинамике сила взаимодействия пропорциональна произведению зарядов тел. На больших же расстояниях, согласно гипотезе невылетания, потенциал должен достаточно сильно расти, чтобы не выпустить кварки наружу. Наиболее популярным способом описания невылетания кварков, применительно к чармонии, является добавление к кулоновскому взаимодействию линейного по r члена. Именно, потенциал записывается в виде

$$V(r) = -\tilde{\alpha}/r + gr$$

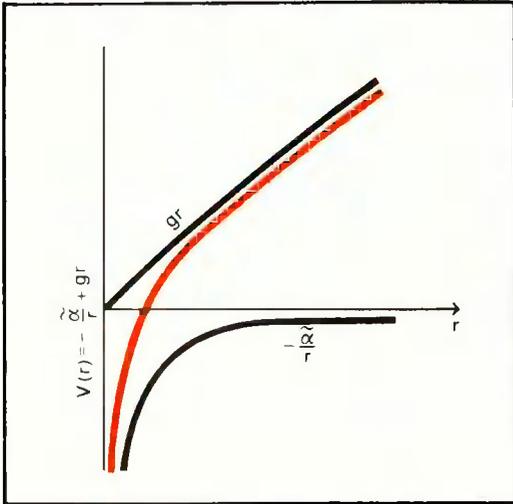
График этого потенциала напоминает воронку, и поэтому его иногда называют потенциалом типа воронки. На малых расстояниях ($r < \sqrt{\tilde{\alpha}/g}$) в потенциале доминирует кулоновское слагаемое, а на больших ($r > \sqrt{\tilde{\alpha}/g}$) — линейная часть. Здесь невылетание достигается с помощью «грубой силы» — энергия, необходимая для того, чтобы развести кварки на большое расстояние, пропорциональна этому расстоянию и стремится к бесконечности, когда r стремится к бесконечности. Величины $\tilde{\alpha}$, g , а также масса s -кварка m_s являются подгоночными параметрами модели. Они подбираются так, чтобы воспроизвести (хотя бы грубо) спектр уровней (их массы), а также распадные свойства J/Ψ -мезона — ширины его распадов на пару e^+e^- и на легкие адроны. Найденные таким образом параметры составляют $\tilde{\alpha} \approx 0,27$, $g \approx 0,25 \text{ ГэВ}^2$, $m_s \approx 1,65 \text{ ГэВ}$.

Расчеты с потенциалом $V(r)$, приведенным выше, дают оценки ширины радиационных распадов $\Psi' \rightarrow \chi_j + \gamma$, близкие к экспе-

риментальным значениям. Однако наиболее интересным результатом таких вычислений являются оценки ширины распадов $\chi_j \rightarrow J/\Psi + \gamma$. Важность этих оценок заключается в том, что на опыте в настоящее время измеряются лишь относительные вероятности распадов χ_j -уровней, т. е. отношения

$$\Gamma(\chi_j \rightarrow J/\Psi + \gamma) / \Gamma_{\text{tot}}(\chi_j),$$

где $\Gamma_{\text{tot}}(\chi_j)$ — полная ширина χ_j -уровня (сумма парциальных ширины всех распадов), которая определяет время жизни уровня



Потенциал типа воронки (цветная линия). Этот потенциал состоит из двух слагаемых — взаимодействия $[-\tilde{\alpha}/r]$ типа кулоновского и линейного члена gr . Кулоновское слагаемое доминирует на малых расстояниях, оно аналогично взаимодействию зарядов в электродинамике. Линейное слагаемое, доминирующее на больших расстояниях, описывает явление не-вылетания кварков, так как благодаря этому слагаемому потенциал неограниченно растет с ростом r и не выпускает кварки наружу.

$t(\chi_j) = 1/\Gamma_{\text{tot}}(\chi_j)$. Из экспериментального значения относительной вероятности и теоретической оценки величины $\Gamma(\chi_j \rightarrow J/\Psi + \gamma)$ не представляет труда оценить полную ширину. В свою очередь, полные ширины χ_j -уровней определяются в основном их сильными распадами на легкие адроны. Механизм адронных распадов уровней чармония имеет прямое отношение к свойствам сильного взаимодействия кварков и глюонов на малых расстояниях. Поэтому знание полных ширины уровней чармония очень важно для проверки квантовой хромодинамики.

ПРАВИЛА СУММ

Вычисленные с помощью приведенного выше потенциала $V(r)$ ширины распадов $\chi_j \rightarrow J/\Psi + \gamma$ составляют 160, 320 и 360 кэВ соответственно для $J=0, 1$ и 2 . Эти значения ширины удовлетворяют весьма общим ограничениям, установленным американским теоретиком Д. Джексоном на основе известных в квантовой механике правил сумм для дипольных матричных элементов, соответствующих рассматриваемым переходам.

Как известно, электрический диполь (система из двух противоположных зарядов, разделенных расстоянием r) тем сильнее взаимодействует с электромагнитным полем, чем больше его размер R . В квантовой механике этому свойству отвечает тот факт, что вероятность перехода системы из состояния $|n\rangle$ в состояние $|i\rangle$ с испусканием фотона пропорциональна квадрату матричного элемента вида $\langle i|\vec{r}|n\rangle$, величина которого характеризует некий усредненный по состояниям $|i\rangle$ и $|n\rangle$ размер системы. Оказывается, что из-за соотношения неопределенностей характерный размер системы R и спектр состояний связаны друг с другом. Качественно это можно понять следующим образом. Как уже упоминалось, характерный импульс кварка в силу соотношения неопределенностей составляет $p \sim \hbar/R$. Следовательно, характерный энергетический интервал между уровнями ΔE определяется выражением

$$\Delta E \sim p^2/m_c \sim \hbar^2/m_c R^2,$$

или, перегруппировав члены, $R^2 m_c \Delta E \sim \hbar^2$. Точным же выражением этой связи являются так называемые правила сумм.

Верхняя граница для ширины переходов $\chi_j \rightarrow J/\Psi + \gamma$ устанавливается правилом сумм Томаса — Райхе — Куна, которое было найдено в 1925 г. до открытия квантовой механики и сыграло исключительно важную роль при установлении соотношения неопределенностей. Правило сумм в применении к чармونیю имеет вид

$$\sum_n |\langle i|\vec{r}|n\rangle|^2 m_c (E_n - E_i) = 3\hbar^2.$$

Сумма берется по всем возможным состояниям системы $|n\rangle$, а E_n и E_i — значения энергии (массы) соответствующих состояний. В правиле сумм легко узнать все компоненты приведенного выше качественного рассуждения. Отличие же состоит в том, что точное соотношение относится не к двум отдельным уровням, а к сумме по уровням. Тем не менее, если в качестве

состояния $|i\rangle$ подставить низший по энергии уровень — J/Ψ -мезон, то энергии (массы) всех состояний $|n\rangle$, по которым берется сумма, оказывается больше, чем масса J/Ψ -мезона, т. е. $E_n > E_{J/\Psi}$. Поэтому каждое слагаемое в левой части положительно, и, следовательно, сумма любого конечного числа членов не превышает $3\pi^2$. Таким образом, правила сумм позволяют ограничить сверху величину квадрата матричного элемента перехода $|\langle J/\Psi | \vec{T} | \chi_J \rangle|^2$ и пропорциональную ему ширину $\Gamma(\chi_J \rightarrow J/\Psi + \gamma)$.

Аналогично, нижние границы для ширины обсуждаемых переходов получаются из правила сумм, установленного Ю. Вигнером, которое в интересующем нас случае можно записать в виде

$$\sum_n |\langle 1P | \vec{T} | nS \rangle|^2 m_c (E_{nS} - E_{1P}) = -(1/3) \pi^2.$$

Это правило сумм содержит матричные элементы переходов только между S- и P-состояниями. Так как переход $1P \rightarrow 1S$ ($\chi_J \rightarrow J/\Psi + \gamma$) является единственным, вносящим отрицательный знак в левую часть (масса P-уровня больше массы J/Ψ), то на соответствующий матричный элемент можно найти ограничение снизу. Согласно такому рассмотрению, ширины распадов $\chi_J \rightarrow J/\Psi + \gamma$ (в кэВ) могут лежать в интервалах 100—200, 200—400, 300—500 для $J=0, 1, 2$ соответственно.

Эффективность метода, основанного на правилах сумм, заключается в том, что получаемые ограничения в значительной мере нечувствительны к детальной форме потенциала взаимодействия, в настоящее время практически неизвестного. Эти ограничения могут также служить критерием при выборе того или иного вида потенциала, требующим, чтобы ширины, вычисленные с его помощью, удовлетворяли полученным ограничениям. (Потенциал типа воронки, как мы видели выше, удовлетворяет этому критерию.) Однако и в подходе, основанном на правилах сумм, трудно корректно учесть взаимодействие, зависящее от спинов кварков, которое в чармонии оказывается весьма существенным — создаваемые этим взаимодействием расщепления масс χ_J -уровней с различными значениями J составляют около 100 МэВ. Неучтенные факторы могут сдвигать оценки верхних и нижних границ на несколько десятков процентов.

Если тем не менее скомбинировать, как обсуждалось выше, оценки Джексона для абсолютных ширины радиационных переходов с экспериментальными данными

об их относительных вероятностях, то с учетом неопределенности теоретических предсказаний и экспериментальных неточностей полные ширины χ_J -уровней можно оценить равными 1,6—8; 0,3—1,5 и 0,6—4 МэВ для $J=0, 1, 2$ соответственно. Эти значения очень хорошо согласуются с теоретическими предсказаниями для полных ширины χ_J -уровней, полученными в нерелятивистской модели чармония с потенциалом типа воронки группой итальянских теоретиков, а также с результатами вычисления, основанного на релятивистских правилах сумм для распадов чармония, полученных группой теоретиков в Институте теоретической и экспериментальной физики в Москве.

Релятивистские правила сумм основаны на весьма общих свойствах квантовой хромодинамики — асимптотической свободе и принципе причинности, и не зависят от предположения о законности описания чармония с помощью потенциала². Поэтому согласие результатов этого подхода и нерелятивистских оценок указывает на существование нетривиальной взаимосвязи между свойствами взаимодействия кварков на малых и на больших расстояниях, а также повышает доверие к нерелятивистской модели в оценках тех характеристик уровней чармония, для которых потенциальное рассмотрение является в настоящее время единственно возможным.

Необходимо отметить также следующее важное обстоятельство. Приведенные выше оценки ширины радиационных переходов, а также нерелятивистские оценки полных ширины получены с помощью потенциала типа воронки. Качественно результаты не сильно меняются, если вместо линейного члена прибавить к кулоновской части потенциала какую-нибудь другую достаточно быстро растущую функцию, обеспечивающую невылетание кварков. (Об этом говорят и оценки Джексона, в которые потенциал вообще явно не входит.) Однако вся описанная выше согласованная картина разрушится, если предположить, что потенциал «выпускает» кварки (например, потенциал чисто кулоновского типа). При этом система становится слишком

²Детальное обсуждение релятивистских правил сумм для распадов чармония выходит за рамки этой статьи. Подробный обзор этого подхода содержится в ст.: Вайнштейн А. И. и др. Чармоний и квантовая хромодинамика. — Успехи физических наук, 1977, т. 123, вып. 2, с. 217.

«рыхлой», из-за чего в десятки раз должны возрасти ширины радиационных переходов и примерно во столько же раз упасть ширины распадов на обычные адроны. Кроме того, становится невозможным удовлетворить правилам сумм, так как потенциал кулоновского типа даже грубо не воспроизводит экспериментальный спектр уровней. Все это представляется важным аргументом против картины вылетания кварков и в пользу теоретических представлений об удержании кварков внутри адронов.

ДРУГИЕ СОСТОЯНИЯ И НЕРЕШЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ

Таким образом, в отношении известных уровней чармония с $S = 1$ удается качественно, а во многих аспектах и количественно, увязать воедино всю совокупность экспериментальных данных и теоретических представлений. Иначе, к сожалению, обстоит дело с уровнями парачармония, т. е. с $S = 0$. На опыте наблюдаются два уровня с положительной C -четностью $X(2,83)$ и $\chi(3,45)$ (в скобках указаны массы в ГэВ), являющиеся кандидатами для интерпретации их как уровней парачармония. Так, состояние $X(2,83)$, обнаруженное по монохроматическим фотонам в распаде

$$J/\Psi \rightarrow X(2,83) + \gamma,$$

можно было бы отождествить с основным состоянием парачармония — 1^1S_0 -уровнем, для которого «заготовлено» название η_c . Основным препятствием для такой идентификации является ненаблюдение на опыте распадов $X(2,83)$ на адроны. Согласно теоретической схеме, адронные распады $X(2,83)$ должны быть примерно в 850 раз более вероятны, чем единственный наблюдавшийся до сих пор распад его на два фотона. Согласно же экспериментальным данным, отношение суммарной вероятности адронных распадов $X(2,83)$ к фотонному не превышает приблизительно 120, и с улучшением чувствительности эксперимента расхождение между теоретическими ожиданиями и опытом все увеличивается.

Во многом аналогичная ситуация имеет место с состоянием $\chi(3,45)$. Относительная вероятность его распада на $J/\Psi + \gamma$ экспериментально превышает 25%. Если же это состояние отождествить с радиально возбужденным 2^1S_0 уровнем чармония (η_c' -мезоном), то для последнего распад на $J/\Psi + \gamma$ должен составлять, во всяком случае, менее одного процента от полной ширины.

Таким образом, либо $X(2,83)$ и $\chi(3,45)$ являются уровнями парачармония, и в этом случае существующие представления о механизме адронных и радиационных распадов чармония существенно неправильны, либо эти частицы представляют собой совершенно новые объекты, а η_c - и η_c' -мезоны все еще ожидают своего открытия. Необычные свойства $X(2,83)$, и в первую очередь чрезвычайно высокая относительная вероятность его распада на два фотона, наводят на мысль, что эта частица, возможно, вообще не состоит из кварков, а представляет собой какой-то новый, еще неизвестный вид фундаментальной материи. В литературе высказывалось предположение, что $X(2,83)$ является так называемым мезоном Хиггса, существование которого необходимо для построения единой теории электромагнитных и слабых взаимодействий. Так это или нет, покажут будущие эксперименты. В любом случае частица $X(2,83)$ заслуживает самого внимательного изучения.

Что касается частицы $\chi(3,45)$, то необходимо отметить, что в последней серии опытов, проведенных в Гамбурге, сигнал, отвечающий этому состоянию, отсутствует. Поэтому вполне возможно, что наблюдения этого состояния было экспериментальной флуктуацией.

Из сравнительно низких по энергии уровней чармония, предсказываемых нерелятивистской моделью, остается неоткрытым также основной P -уровень парачармония 1^1P_1 (его масса должна составлять 3,4—3,6 ГэВ). Квантовые числа этого уровня $J^{PC} = 1^{+-}$ сильно затрудняют его обнаружение на опыте: из-за отрицательной C -четности радиационный переход из состояния Ψ' на этот уровень запрещен (иначе C -четность не сохранялась бы), и поэтому его невозможно наблюдать по монохроматическим фотонам в распадах Ψ' .

До сих пор речь шла об уровнях чармония с массой, не превышающей массы Ψ' -мезона. Рассмотрим теперь известные из эксперимента мезоны, более тяжелые, чем Ψ' . Все они имеют квантовые числа фотона: $J^{PC} = 1^{--}$ и наблюдаются на опыте как резонансы в e^+e^- -аннигиляции. Свойства этих частиц тесно связаны с обнаруженными весной 1976 г. в Станфорде очарованными D - и D^* -мезонами³, так как для них, в отличие от более

³ Об открытии D - и D^* -мезонов см.: «Природа», 1977, № 2, с. 137.

легких уровней чармония, энергетически возможны распады на пары $D\bar{D}$, $D^* \bar{D}$, $D\bar{D}^*$ и $D^* \bar{D}^*$. Такие распады не запрещены так называемым правилом Цвейга, и их ширины велики. В настоящее время уверенно выделяются резонансы Ψ'' с массой 3,77 ГэВ и $\Psi(4,4)$ с массой 4,41 ГэВ. Кроме того, около 4,0 ГэВ в e^+e^- -аннигиляции имеется сложная резонансная структура, в которой наиболее заметны пики при энергии 4,028 ГэВ: $\Psi(4,03)$, и 4,16 ГэВ: $\Psi(4,16)$. Полные ширины каждого из этих резонансов составляют 30—70 МэВ. Для резонанса Ψ'' , открытого в начале лета 1977 г., экспериментально известно, что более 95% всех его распадов составляют распады на $D\bar{D}$.

Природа этих резонансов еще до конца не выяснена, однако есть основания полагать, что среди них имеются адроны нового типа, состоящие не из пары кварк-антикварк, а содержащие две или большее число таких пар. Очень правдоподобно, что такой структурой обладает резонанс $\Psi(4,03)$, относительные вероятности распадов которого на пары $D\bar{D}$ и $D^* \bar{D}^*$ отвечают связи с каналом $D^* \bar{D}^*$ по крайней мере в 100 раз большей, чем с каналом $D\bar{D}$. Наиболее естественное объяснение этого факта состоит в том, что $\Psi(4,03)$ является не «атомной» системой, составленной из кварка и антикварка, а «молекулой», состоящей из двух кварковых «атомов»-мезонов: D^* и \bar{D}^* , которые внутри этого резонанса сохраняют свою индивидуальность, т. е. не разваливаются на отдельные кварки.

Согласно наиболее оптимистичным теоретическим ожиданиям, спектр состояний типа молекулярного чармония должен быть значительно более богатым, чем спектр «атомарных» уровней. Изучение адронов этого типа обещает принести обширную информацию о взаимодействии очарованных частиц между собой.

Полученные совсем недавно в Гамбурге данные о свойствах резонансов $\Psi(4,16)$ и $\Psi(4,4)$ указывают на то, что эти резонансы более вероятно связаны не с D-мезонами, а с открытыми в конце 1977 г. также в Гамбурге F-мезонами. Последние, как и D-мезоны, несут новое квантовое число — очарование, но они обладают еще и другим «старым» квантовым числом — странностью. На кварковом языке F-мезон состоит из очарованного c-кварка и странного \bar{s} -кварка. Согласно экспериментальным данным, в пике $\Psi(4,16)$ в e^+e^- -аннигиляции наиболее интенсивно

образуются пары псевдоскалярных мезонов $F\bar{F}$, а в пике $\Psi(4,4)$ — пары векторных мезонов $F^* \bar{F}^*$. Возможно, эти данные указывают, что резонансы $\Psi(4,16)$ и $\Psi(4,4)$ имеют «молекулярную» природу, т. е. состоят из мезонов $F\bar{F}$ и $F^* \bar{F}^*$.

Что касается резонанса Ψ'' , то он может оказаться как молекулой, состоящей из D и \bar{D} , так и «атомарным» уровнем чармония с орбитальным моментом L , равным двум, т. е. 1^3D_1 -уровнем. В выяснении его структуры, по-видимому, решающим окажется изучение радиационных переходов типа $\Psi'' \rightarrow \chi_1 + \gamma$.

Летом 1977 г. группа под руководством Л. Ледермана, проводившая эксперименты на ускорителе Национальной ускорительной лаборатории им. Ферми в Батавии (США), сообщила об открытии частиц с массами 9,4 ГэВ и 10,0 ГэВ, названных Υ и Υ' ⁴. В мае 1978 г. частицу Υ удалось получить на встречных электрон-позитронных лучках в Гамбурге (для того, чтобы получить Υ' , энергия ускорителя была недостаточной). Почти ни у кого не вызывает сомнения, что эти частицы принадлежат семейству уровней новой системы, аналогичной чармонию, но состоящей из новых кварка и антикварка, масса которых примерно в три раза больше массы c-кварка. В этом новом семействе уровней Υ и Υ' играют ту же роль, что J/Ψ и Ψ' в семействе уровней чармония. Благодаря большей массе кварка, новая система должна быть еще более нерелятивистской, чем чармоний, и поэтому очень вероятно, что, изучая ее, удастся продвинуться еще дальше в понимании свойств сильного взаимодействия и структуры адронов.

Изучение «мира чарма» — чармония и очарованных частиц, а также начатые открытием Υ - и Υ' -резонансов исследования еще более тяжелой атомоподобной кварковой системы изобилуют экспериментальными и теоретическими, решенными и нерешенными проблемами. Многие физики считают, что системы, состоящие из тяжелых кварков, сыграют для физики сильных взаимодействий такую же роль, как атом водорода для открытия квантовой механики.

⁴ Об открытии Υ - и Υ' -частиц см.: «Природа», 1978, № 1, с. 137.

Загадки верхнего докембрия

Б. М. Келлер



Борис Максимович Келлер, доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующий лабораторией стратиграфии и геохронологии верхнего докембрия Геологического института АН СССР. Основные научные интересы лежат в области геологии и палеонтологии докембрия. Автор большого числа работ по стратиграфии, палеогеографии и тектонике.

В 1977 г. на совещании в Уфе была принята стратиграфическая шкала докембрия. Бурные дискуссии по поводу выделенных в ней подразделений, которые велись на совещании, не утихают и до настоящего времени. Предмет этой дискуссии не является праздным. Геологам должен быть дан в руки наиболее приемлемый стандарт, с которым при проведении геологической съемки можно сравнивать отложения разных регионов СССР. Степень обоснованности этой шкалы еще будет рассмотрена в специальных научных статьях, а в этом сообщении автору хотелось бы остановиться на некоторых вопросах геологии верхнего докембрия, которые до самого последнего времени представлялись загадочными.

ВОЗРАСТ «НЕМЫХ СВИТ» УРАЛА

Все древние свиты западного склона Южного Урала до ашинской серии включительно я отношу к докембрию и для всей группы этих отложений предлагаю название Рифейская группа (Рифей [Ripheus] — Урал).

Н. С. Шатский, 1945 г.

Хорошо известно, что новейшая история Земли, или фанерозойский ее эон, на-

чинается с кембрийского периода. Нижняя граница кембрия, по данным цифр возраста, вычисленным на основании радиоактивного распада элементов, обычно оценивается в 570 млн лет. Ниже кембрийских отложений залегают мощные и сложно построенные толщи пород докембрия с остатками организмов совершенно иного облика, представленные главным образом остатками водорослей или их постройками (фитолитами). Отсутствие раковинной, или так называемой скелетной фауны, свойственной всему фанерозою (последние 570 млн лет), не позволяет проводить корреляцию пород докембрия с такой точностью, как в системах фанерозоя. Поэтому построить стратиграфическую шкалу докембрия долго не удавалось. В 30-х—40-х годах нашего столетия удалось создать довольно грубую стратиграфическую шкалу докембрия, пользуясь данными изотопного датирования горных пород и общими историко-геологическими данными.

Несколько в особом положении оказалась самая верхняя часть докембрийского разреза, сложенная толщами слабо измененных «свежих» пород, по внешнему облику напоминающих фанерозойские отложения. Эти породы давно изучали и картировали на западном склоне Южного Урала, выделяя четыре крупные серии

общей мощностью до 15000 м. Долгие годы их причисляли к палеозою, но видимые отпечатки палеозойской фауны или флоры в них, несмотря на тщательные поиски, обнаружены не были. Иногда это объясняли геохимическими особенностями древних бассейнов, в которых в силу неизвестных нам причин возникла обстановка, неблагоприятная для органической жизни. Не имея возможности по составу окаменелостей определить возраст загадочных толщ Урала, геологи начали называть их «древними немymi свитами».

Во время Великой Отечественной войны известный советский геолог Н. С. Шатский побывал на Урале, где имел возможность познакомиться со строением древних немых свит. Он обратил внимание на то, что все четыре их серии отвечают единому крупному тектоническому циклу, в котором общая последовательность пород очень сходна с давно подмеченной в тектонических циклах фанерозоя. Отложения древних немых свит начинаются осадочными толщами с покровами основных лав, выше залегают различные толщи частого переслаивания более грубых и тонкозернистых отложений, похожие на флишевые толщи фанерозоя. Цикл заканчивается обломочными породами (молассаи), обычно накапливающимися у подножия горных возвышенностей. Весь этот сложно построенный комплекс отложений Шатский выделил в особую группу, пород, назвав ее рифейской. Рифей, по мнению Шатского, отвечал особому этапу в истории Земли, а отсутствие в его породах фауны палеозойского типа объясняется тем, что рифейские породы отложились гораздо раньше, когда жизнь на Земле была более примитивной. Такие ранее выделявшиеся подразделения докембрия, как альгонк, синий, гиперборей — всего лишь части рифейской группы. Взгляды Шатского были восприняты не сразу. Особенно противились им геологи Урала, которые древние немые свиты обычно рассматривали как толщи немого палеозоя; каратавскую серию (верхний рифей) считали кембрийской, а вышележащую ашинскую — кембрием, ордовиком и даже девоном.

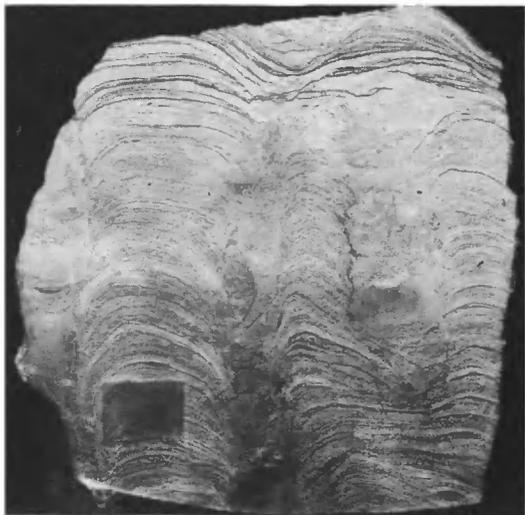
В конце 50-х годов сторонникам старых взглядов был нанесен сокрушительный удар. Результаты изотопного определения возраста каратавской серии по глауконитам, опубликованные Г. А. Казаковым и Н. И. Полевой, дали значения порядка 700—900 млн лет, что намного превышало возраст древнейших слоев кембрийской

системы. Лишь для ашинской серии были получены цифры 570 и 590 млн лет, близкие к границе кембрия и докембрия. На основании этих новых данных, на межведомственном совещании, проходившем в Свердловске в 1963 г., в составе нижнего палеозоя «удержались» лишь аналоги каратавской серии приполярного Урала, лишённые глауконита, и ашинские отложения, которые до самого последнего времени были настоящим «яблоком раздора».

В 60-х годах было начато интенсивное изучение палеонтологии докембрия. Основное внимание уделялось при этом фитолитам — постройкам синезеленых водорослей, часто встречающимся в карбонатных породах рифея. Их разделяют на две группы: одна из них — строматолиты, имеющие форму прямых, иногда ветвящихся, столбиков с поперечной микрослоистостью, обращенной выпуклостью вверх (по этому признаку легко отличить низ и верх пластов даже в отвалившихся кусках доломита). Другая группа — микрофитолиты, во многих странах называлась гороховым камнем. Такая порода состоит из желваков размером с горошину, каждая такая горошина на срезе микрослоистая, иногда радиально-лучистая.

Особенности строения строматолитов и микрофитолитов, характер их микрослоистости и ряд других признаков позволили выделить среди них несколько групп и форм. Каждая форма при этом получила такое же двойное название, как роды и виды фанерозойской фауны. Эти группы и формы отнюдь не совпадают с родами и видами синезеленых водорослей — строителей фитолитов, однако такая классификация оказалась удобной и быстро привилась. Изучение вертикального распределения фитолитов в разрезах Сибири и Урала, проведенное советскими геологами З. А. Журавлевой, И. Н. Крыловым, М. А. Семихатовым, Т. А. Дольник и другими, показало, что смена их комплексов в очень удаленных разрезах происходит однотипно. Поразительно то, что сопоставление фитолитов позволило установить в рифее 4 ассоциации форм, залегающие в очень удаленных разрезах в одной и той же последовательности. Наша методика, проверенная в зарубежных странах, подтвердила эти выводы на ряде других примеров и позволила выделить подразделения рифея в СССР, КНДР, Индии, Австралии и США.

Исследования последнего десятилетия показали, что в прослоях и линзах



Строматолит *Kussiella* из нижнего рифея Урала [уменьшено в 2 раза].

кремней великолепно сохранились остатки самих водорослей, создававшие строматолитовые постройки. При увеличении в несколько тысяч раз они имеют вид удлиненных нитей и лепешек. Чрезвычайно перспективно также изучение акритархов из глинистых и алевролитовых пород, которое ведется в нашей стране начиная с 50-х годов. Акритархи — это тельца шарообразной формы, размером 50—100 мк, относимые обычно к цистам водорослей. В горных породах они сплющиваются и приобретают вид лепешки или блина. В рифее акритархи имеют чрезвычайно простое строение и медленно изменяются во времени. У нижней границы кембрия их комплексы разнообразны и богато скульптурированы. На западе Русской плиты по их составу удается выделить в кембрии дробные статиграфические горизонты. Как будет обстоять дело в рифее, покажет будущее.

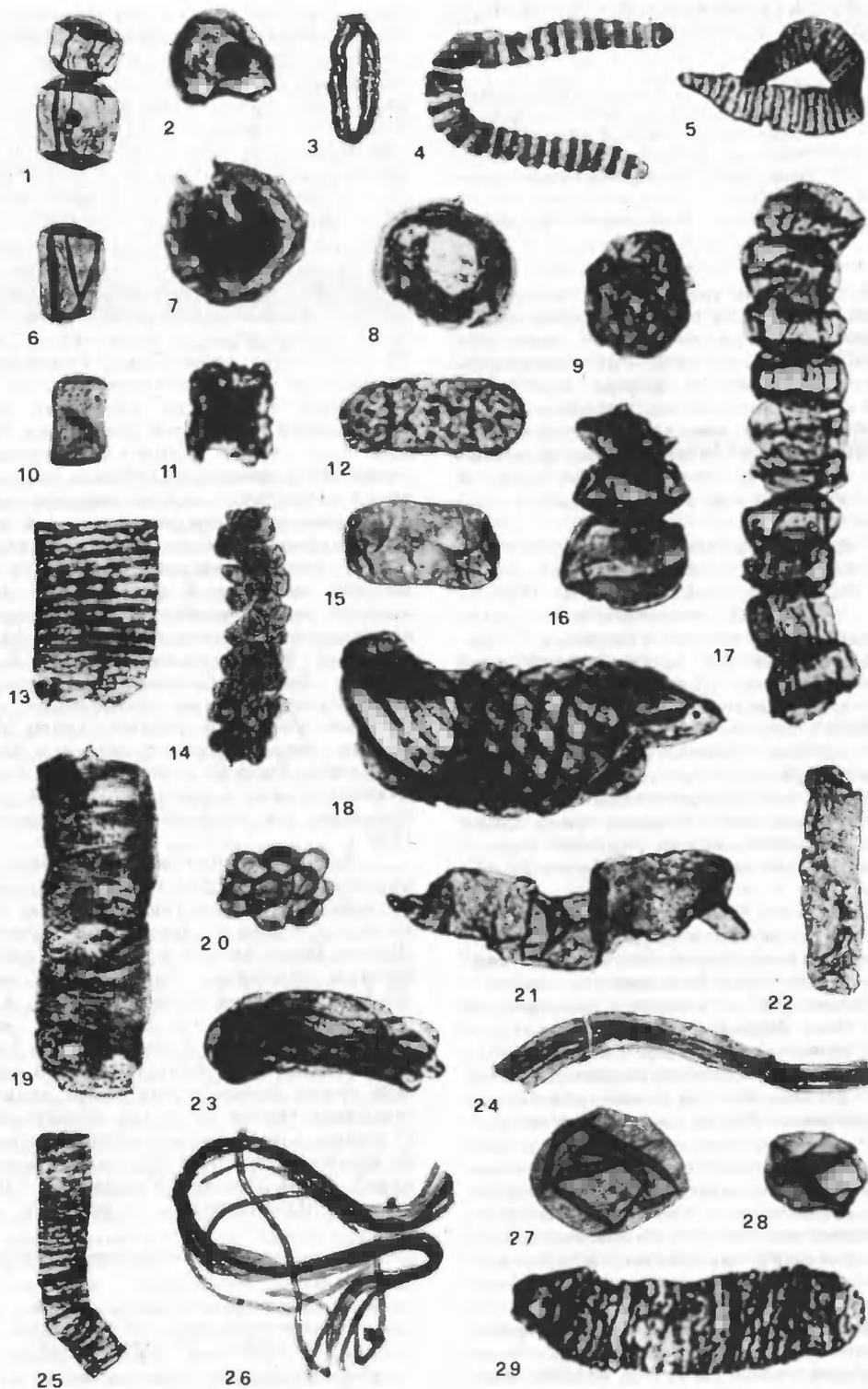
Обособление в составе рифейской группы 4 древнейших систем (фитем), охарактеризованных комплексами фитоцитов, дало нам средство для межконтинентальной корреляции разрезов. Вместе с тем надо отметить, что проследить фитемы рифея нельзя с такой же точностью, как

Водоросли и акритархи верхнего докембрия Урала (по Т. В. Янкаускасу): 1, 6, 10 — *Arctacellularia dolijormis* Herm. [увел. в 500 раз]; 2 — *Nucellosphaeridium minutum* Tim [увел. в 500 раз]; 3 — Кольцевая форма [увел. в 500 раз]; 4 — *Feliconstrictosus* sp. [увел. в 1000 раз]; 5, 21 — *Tortunema zibirica* Herm. [увел. в 1000 раз]; 7 — *Pterospermopsisimorpha* sp. [увел. в 500 раз]; 8 — *Volyniella* sp. [увел. в 750 раз]; 9 — *Protosphaeridium vermium* Tim. [увел. в 1000 раз]; 11 — *Octaedrixium* sp. [увел. в 750 раз]; 12 — *Tortunema zilimica* Yank [in litt] [увел. в 750 раз]; 13, 19, 25 — *Granotrichoides* sp. [увел. в 500 раз]; 14 — *Polysphaeroides* sp. [увел. в 500 раз]; 15, 22 — *Brevitrihoides* sp. [увел. в 500 раз]; 16, 17 — *Arctacellularia ellipsoidea* Herm. [увел. в 1000 раз]; 18, 23 — *Tortunema eniseica* Herm. [увел. в 500 раз]; 20 — *Synsphaeridium* sp. [увел. в 500 раз]; 24 — *Polytrichoides lineatus* Herm. [увел. в 500 раз]; 26 — *Leitrichoides* sp. [увел. в 500 раз]; 27 — *Kildinella sinica* Tim. [увел. в 500 раз]; 28 — *Kildinella hyperboreica* Tim. [увел. в 500 раз]; 29 — *Tortunema* sp. [увел. в 750 раз].

Образцы отобраны из трех мест: 3, 7, 9 — из мергельной пачки верхнего рифея на границе каватской и подинзерской свит по р. Шишняк; обр. 12, 16, 24 — из мергелей, известковых глин и песчаников на левом берегу р. Зилим из нижней части уксской свиты терминального рифея; остальные формы из мергелей и глин верхнего рифея [1], вскрытых скважиной в районе г. Уфы [глубина 3526—3528 м].

системы фанерозоя, обособление которых основано на хорошо изученной эволюционной смене фауны и флоры. Есть основание полагать, что границы фитем в значительной степени подчинены изменениям среды бассейнов прошлого (фациальному контролю). Четыре комплекса фитоцитов верхнего докембрия никогда не появляются в разрезах в обратном порядке, но в некоторых случаях за вторым может идти сразу четвертый, а третий комплекс становится неразличимым. Природа ставит нам новые загадки, от решения которых зависит точность расчленения и корреляции разрезов.

Подведем итоги. Загадка возраста «древних немых свит» Урала была решена. Оказалось, что обособленная на Урале рифейская группа отвечает особому этапу развития Земли и по составу фитоцитов может быть расчленена на 4 части, аналоги которых удалось наметить на других материках. Рифейская группа, выделенная геологами в СССР, стала эталоном для привязки разновозрастных отложений других стран. Она является одним из важнейших подразделений общей стратиграфической шкалы, принятой на совещании в Уфе.



ВРЕМЯ ПОЯВЛЕНИЯ ФАНЕРОЗОЙСКОЙ ФАУНЫ И ПРОБЛЕМА ВЕНДА

Бросается в глаза стратиграфическая неустроенность «вендского комплекса», все еще занимающего сиротливое положение между рифейской и палеозойской группами...

А. А. Богданов, 1968 г.

В последние десятилетия произошел полный переворот в наших представлениях о стратиграфии самой верхней части докембрийской серии пород и об этапах появления фанерозойской фауны. Для этого интервала геологического времени появилось большое количество стратиграфических схем, а бурное накопление фактического материала заставляло улучшать и пересматривать многие сложившиеся концепции.

Первым подразделением для слоев, непосредственно предшествующих кембрию, был венд, выделенный в 1950 г. Б. С. Соколовым. Вендскими отложениями были названы песчано-глинистые толщи северо-западной части Русской плиты, вскрытые под древнейшими слоями кембрия, выделенными под именем балтийской серии. В 50-е годы вендская серия, которая первоначально не претендовала на универсальность, входила в состав синяя, считавшегося синонимом рифея. Впоследствии название венд было заменено в официальных изданиях термином валдайская серия, якобы более благозвучным.

Серия эта была полным синонимом венда, только позже в венд были включены подстилающие базальты и древние ледниковые отложения Белоруссии.

После 1963 г. в связи с выходом из печати тома «Верхний докембрий», изданного в серии «Стратиграфия СССР», популярность венда особенно возросла. В этой книге, где венд взят за основу для корреляции разрезов СССР, дана первая палеонтологическая характеристика венда и изображено несколько видов бесскелетных животных, в том числе своеобразная форма, названная позже *Vendia sokolovi* Kell. Форма эта, напоминающая лишнего панциря «голового трилобита», вызвала всеобщий интерес; фотографии ее появились во многих изданиях.

В Сибири к венду была отнесена юдомская свита, также залегающая ниже древнейших слоев кембрия, которая сло-

жена доломитами с песчано-глинистой пачкой в основании. Для юдомских доломитов З. А. Журавлевой был установлен так называемый IV комплекс микрофитолитов — ассоциация видов, включающая свыше 40 форм. Этот комплекс был взят в качестве одного из основных критериев при распознавании венда.

В середине 60-х годов микрофитолиты IV комплекса были обнаружены на Урале в доломитах укской свиты, которая лежит здесь заведомо ниже ашинской серии венда. Эти данные привели к появлению концепции большого венда (венд *sensu lato*), включающего пачелмскую серию Русской плиты, укскую свиту Урала и разновозрастные им образования. В таком расширенном толковании венд был принят участниками Казанского совещания 1964 г. Для того чтобы устранить создавшийся разнобой в понимании объема венда, для венда *sensu lato* многие геологи начали применять название терминальный рифей или вендомий; нижняя его граница определялась сменой фитолигов, верхняя — подошвой кембрия. В этом объеме терминальный рифей является подразделением, пригодным для межконтинентальной корреляции¹. В Европейской части СССР в его составе были выделены два подразделения — кудаш, охарактеризованный комплексами фитолигов укской свиты Урала, и венд, типом которого является валдайская серия Русской плиты. Эти два подразделения вошли в корреляционную схему, принятую на совещании в Кишиневе в 1974 г.

Важное открытие, касающееся рассматриваемой проблемы, было сделано в середине 70-х годов после того, как в венде по р. Сюзьме на Онежском полуострове (Летний берег Белого моря) были найдены богатые комплексы бесскелетных животных². Дальнейшие исследования М. А. Федонкина показали, что фауна того же типа встречается и на Зимнем берегу Белого моря к северу от Архангельска. В настоящее время Беломорская биота венда насчитывает свыше 30 видов, относящихся к 17 родам. Среди них имеются представители кишечнополостных (сцифо- и гидромедузы), членистоногих (*Vendomia*), плоских червей (*Dickinsonia*), иглокожих (*Tri-*

¹Вендомий (терминальный рифей и его региональные типы). Итоги науки, серия «Стратиграфия и палеонтология». 1974, № 5.

²«Природа», 1975, № 7, с. 85—87.



Вендия (*Vendia sokolovi* Keller) из валдайской серии венда (Яренская свазина, глубина 1552 м).

brachidium), а также формы неясной систематической принадлежности (*Pteridinium*, *Rangea*, *Ynkrylovia* и др.). Это сообщество видов чрезвычайно сходно с фауной из песчаников Паунд Эдиакары, описанной А. Сприггом, М. Глесснером и М. Уэйд и получившей широкую известность. Отличие заключается в том, что наше местонахождение бесскелетных венда является более богатым и представительным, а фауна характеризует более широкий отрезок стратиграфической колонки.

Известно, что ниже валдайской серии на Русской плите располагаются древние ледниковые отложения — тиллиты, сохранившиеся здесь лишь во внутренних ее прогибах, таких как Оршанский и Пачелмский авлакогены. Это оледенение, названное Н. М. Чумаковым лапландским, имело чрезвычайно широкое распространение. Следы его можно видеть на северном Урале, в Белоруссии, в средней и северной Норвегии, на о-ве Шпицберген, во Франции, в Испании и на севере Африки.

На Русской плите вместе со смежными осадочными толщами и покрывающими эффузивами лапландские тиллиты входят в состав древлянского горизонта (древлянский отдел венда по И. Е. Постниковой). Каких-либо органических остатков в древлянских отложениях не было обнаружено, если не считать некоторого количества акритархов рода *Kildinella*, обычного для верхнего рифея. Точно так же отпечатки животных пока не найдены в подстилающих кудашских отложениях. Лишь в более древних рифейских толщах были встречены образования, напоминающие норки каких-то животных. Если подобные соотношения отражают реаль-

ную картину становления фауны беспозвоночных, а не объясняются случайностью и неполнотой сборов, то мы можем сделать вывод, что после лапландского оледенения имело место быстрое расселение беспозвоночных на обширных площадях. Эти представители органического мира, чрезвычайно разнообразные по своему систематическому составу, относятся к формам, лишенным твердого скелета в виде панциря или раковины, чем и объясняется редкость их нахождения в ископаемом состоянии. Просуществовав около 50—70 млн лет, от подошвы валдайских отложений (600—620 млн лет) до подошвы балтийской серии кембрия (550—570 млн лет) они сменились ассоциацией форм с твердым скелетом.

Таким образом, картина развития органического мира в венде и низах кембрия представляется следующей. В теплых морях верхнего рифея до эпохи великого лапландского оледенения повсеместно были распространены синезеленые водоросли, создававшие в карбонатных толщах строматолитовые постройки. Животный мир этого времени изучен слабо.

В вендских отложениях, относящихся к послеледниковому времени, произошло быстрое расселение беспозвоночных животных, образующих устойчивую, очень разнообразную по своему систематическому составу ассоциацию видов. Составляющие ее формы относятся к организмам, лишенным твердого скелета в виде панциря или раковины. В морях геологического прошлого эта фауна появилась 600—620 млн лет назад и существовала около 50 млн лет. Многие типы и семейства, свойственные этой фауне, мы находим и в более молодых кембрийских отложениях. Фитолиты в венде отходят на второй план, появляются и развиваются своеобразные растительные сообщества, получившие название вендетениевой флоры.

В раннем кембрии, около 550—570 млн лет назад, произошло второе обновление органического мира Земли. В морях появились и широко расселились формы с твердым скелетом — хиолиты, гастроподы, брахиоподы, ханцеллории, лапвортеллы и ряд других. Их твердые раковины великолепно сохранились в породах кембрия. В растительных сообществах также произошли удивительные события. Акритархи венда, диагностика которых чрезвычайно трудна, сменились богатыми сообществами видов с шипами и выростами. Их быстрая эволюция позволила для ряда районов дать зональное расчленение

кембрийских отложений. Таким образом, в истории становления органического мира Земли может быть отмечено два рубежа. Первый из них пока не привлекал пристального внимания ученых, второй оживленно обсуждался, и по поводу появления скелетной фауны в основании кембрия было высказано множество гипотез. Возникновение скелета у различных типов животных, возможно, было связано с изменением химизма морских вод и атмосферы, появлением в ассоциации видов хищников (выживали лишь формы, успевшие «одеться» панцирем) и даже внешними космическими причинами³.

Посмотрим теперь, как эти установленные особенности развития органического мира Земли могут быть использованы при построении стратиграфической шкалы. Мы придем в этих случаях к следующим выводам.

Венд является подразделением общей стратиграфической шкалы, отвечающим особому этапу развития органического мира Земли. Валдайская серия Архангельской области, заключающая ассоциацию бесскелетных животных, является его наиболее представительным эталоном. Палеонтологические данные являются основным принципом выделения венда.

Нижняя граница венда может быть проведена по подошве слоев с характерной для нее фауной, т. е. по подошве валдайской серии, как это и было сделано Б. С. Соколовым в 50-х годах. Присоединение к венду различных отложений, не содержащих вендской фауны, в том числе лапландских тиллитов, неправомерно. Верхняя граница венда должна совпадать с основанием кембрийской системы и быть рубежом между двумя совершенно различными биотами, которые пока не были встречены в одном разрезе. Это является крупнейшим недостатком в исследованиях отдельных ученых и рабочих групп, созданных для решения этой проблемы.

Венд должен, наконец, найти себе естественное место в общей стратиграфической шкале докембрия.

В шкале, принятой в Уфе в 1977 г., венд входит в состав протерозоя, но почему-то исключен из рифея. Говорить, что протерозой делится на карелий, рифей и венд,— это все равно, что утверждать, что год делится на два полугодия и де-

кабрь месяц. Пора покончить с этой неустроенностью венда и включить его в рифей или палеозой.

РАДИОМЕТРИЧЕСКИЙ ВОЗРАСТ ПОРОД ДОКЕМБРИЯ

Если спрашивают о возрасте у сорокапятилетнего человека — должен ли он отвечать: «Мой абсолютный возраст равен сорока пяти годам?» Этот термин не только излишний и бессмысленный с философской и научной точки зрения, он бессмыслен также и по психологическому стремлению к большей степени точности, чем это может быть установлено.

А. Холмс, 1967 г.

Новая стратиграфическая шкала докембрия построена с учетом громадного числа радиометрических дат, вычисленных в миллионах лет и полученных в многочисленных лабораториях СССР и зарубежных стран. Хорошо известно, что для датирования пород используется явление радиоактивного распада элементов, идущего с постоянной скоростью. К числу этих элементов относятся: уран (конечный продукт распада — свинец), калий (конечный продукт — аргон), рубидий (конечный продукт — стронций). Соответственно методы установления возраста называются урано-свинцовый, калий-аргоновый и рубидий-стронциевый. Возраст, или, как иногда говорят, абсолютный возраст, при этом исчисляется по соотношению в горной породе начального элемента и продукта его распада. Лабораторная сторона этих определений в настоящее время достигает большого совершенства, а сложность заключается в истолковании полученных значений возраста. Любая горная порода на протяжении миллионов лет испытывает сложные преобразования. В ней возникают новые минералы, во многих случаях идет вынос и привнос различных элементов, и во многих случаях геолог получает цифру, отвечающую не возрасту самой породы, а возрасту более поздних ее изменений, сопровождающихся образованием новых минералов. Поэтому геологическая интерпретация полученных значений возраста горных пород — одна из наиболее сложных, но в то же время интересных задач.

³Томмотский ярус и проблема нижней границы кембрия. М., 1969.

Многие радиометрические даты, использованные при построении новой стратиграфической шкалы верхнего докембрия, получены калий-аргоновым методом по глаукониту. Этот зеленый минерал группы гидрослюд, который можно встретить в древнейших осадочных горных породах, позволяет определить их возраст.

Но цифры радиометрического возраста по глаукониту обычно не отличаются большой точностью. Положительной их стороной является возможность получения возраста, отвечающий времени образования самой осадочной породы. Могут учитываться также даты, полученные калий-аргоновым методом по валовым пробам древних лав по диабазам, внедрившихся в массивы уже сформировавшихся пород.

Опыт показывает, что единичные цифры, полученные по указанным породам, не могут считаться надежными. Приходится все время проверять полученные результаты и иметь серию цифр, взаимно контролирующихся друг друга. Этим путем удастся получить простейшую геохронологическую шкалу, выраженную в миллионах лет.

Правильность полученных калий-аргоновых цифр может быть проконтролирована данными более точного урано-свинцового метода, который применим к таким, например, минералам, как циркон. Этот красивый желтовато-коричневый минерал встречается в гранитах, в кислых эффузивах, а в переотложенном виде среди обломочных зерен песчаников. Получить точные даты изотопного возраста цирконов горных пород, хорошо «привязанных» к стратиграфическому разрезу, — большая удача. Такие цифры вселяют в нас уверенность, что стратиграфическая шкала, построенная на основании калий-аргоновых и рубидий-стронциевых дат, может считаться надежной.

Первые даты изотопного возраста пород верхнего докембрия, полученные в конце 50-х годов, были восприняты геологами с недоверием и казались сильно преувеличенными. Когда эти цифры были подтверждены десятками и сотнями определений, выполненных различными методами, они стали восприниматься как достоверные. Вместе с тем внимательный их анализ ставит перед геологами трудные и пока неразрешимые проблемы. При сравнении геохронологических дат фанерозоя и рифея вырисовывается мало понятная картина. Оказалось, что геологические свиты, осадочные формации и крупные геологи-



Бесскелетные животные верхнего докембрия [по М. А. Федонкину]: сверху — *Nemiana simplex* Pajl [натуральная величина]. Слелки одиночных гидроидных полипов. Остатки этих примитивных животных встречены в докембрийских отложениях Подольского Приднестровья и юго-восточного Беломорья; в центре — *Dickinsonia costata* Sprigg [натуральная величина]. Отпечаток плоского червя, имеющего листовидное метамеризованное тело. Одна из характерных форм докембрийских отложений Южной Австралии и юго-восточного Беломорья; внизу — *Pteridium nepoxa* Keller [увел. в 0,75 раз]. Организм неясного систематического положения, напоминающий современные морские перья. Встречается в докембрии Южной Австралии и юго-восточного Беломорья.

Общая стратиграфическая шкала докембрия СССР*

Эоны	Общие подразделения шкалы и их границы		Возраст рубежей в млн лет	Типы подразделений в Европейской части СССР			
Фанерозой	Кембрий		570±20	Стратотип: западная часть Московской синеклизы—вилчанская, волынская и валдайская серии (снизу вверх)			
Протерозой (Pt)	Верхний (Pt ₂)	Венд (V)		650 680±20	Стратотип: разрез Башкирского антиклинория Южного Урала		
		Рифей (R)	Кудаш (R ₄)			Укская свита, криво-волукская серия	
			Каратавий (R ₃)				Каратавская серия
			Юрматиний (R ₂)				
	Бурзяний (R ₁)		Юрматинская серия				
Нижний (Pt ₁)		1650±50	Бурзянская серия				
Архей (Ar)			2600±160	Карельский и курско-кри-ворожский комплексы			
				Лопский комплекс, гимольская серия, беломорский комплекс			

* Шкала принята на Уфимском совещании в 1977 г., отредактирована и утверждена Межведомственным стратиграфическим комитетом в 1978 г.

ческие циклы формировались в рифее в 5—8 раз медленнее, чем в фанерозое. Так, например, миньярская и инзерская свиты на Южном Урале образовались за 130—140 млн лет, а сходные свиты палеозоя — за 15—20 млн лет. Продолжительность формирования молассовой формации на Урале или на Кавказе в фанерозое оценивается в 15—30 млн лет; а моласс верхнего докембрия на Енисейском крае — примерно в 200 млн лет. Время формирования тектонических циклов фанерозоя (герцинского или альпийского) оценивается в 200 млн лет, а длительность байкальского (рифейского) цикла не менее чем в 800—1000 млн лет. Именно исходя из сравнения сходно построенных тектонических циклов Н. С. Шатский оценивал длительность рифейской эры в 250 млн

лет, а не в 800—1000 млн лет, как это вытекает из современных радиометрических определений.

Объяснить это несоответствие в длительности формирования геологических тел докембрия и фанерозоя мы пока не можем.

Радиометрический возраст пород, на основании которого было установлено это несоответствие, проверялся сотнями и тысячами определений в разных лабораториях. Надежность полученных цифр не вызывает сомнения.

Предположение о том, что скорость радиоактивного распада элементов изменяется во времени, пока не подкрепляется физическими данными. Правда, Э. К. Герлинг, Л. Н. Овчинников и некоторые другие авторы допускали некоторые

изменения скорости радиоактивного распада, однако степень этих изменений ничтожна и не может объяснить пятикратного несоответствия в длительности геологических процессов рифея и фанерозоя.

Несостоятельными оказались и все предположения о замедленности темпов осадконакопления в рифее (по подсчетам некоторых авторов в рифее в год отлагалась одна песчинка). Такая замедленность сразу привела бы к существенным отличиям в строении осадочных толщ рифея. Полевые исследования говорят о другом: общий тип строения осадочных толщ рифея поразительно сходен с более поздними. При изучении разрезов мы видим те же особенности строения осадочных толщ, одинаковую слоистость пород, одинаковые текстурные признаки.

Очевидно, мы имеем дело с особым явлением — загадкой радиоактивных часов Земли, для которой пока нет удовлетворительного объяснения. Мы можем лишь утверждать, что «миллионы лет докембрия» и «миллионы лет фанерозоя», определенные изотопными методами, — разные величины. Цифры «абсолютного возраста» докембрия, имеющие огромное значение для корреляции разрезов, не могут быть использованы для решения общих вопросов геологической истории, установления ранга стратиграфических подразделений докембрия и других выкладок⁴.

В заключение следует привести общую стратиграфическую шкалу докембрия, принятую в Уфе в 1977 г., с теми редакционными изменениями, которые были внесены в нее при утверждении в Межведомственном стратиграфическом комитете. В прилагаемой таблице показана общая последовательность подразделений докембрия в том виде, как они принимаются в настоящее время. Как мы видели, стратиграфическая шкала докембрия нуждается в дальнейшей доработке и уточнении. Особенно это касается расчленения самой верхней части докембрийского разреза — объема и стратиграфического положения венда, расчленения верхнего (R_3) и терминального (R_4) рифея. Тем не менее принятая шкала — важный этап в изучении геологической истории Земли.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ВЕРХНИЙ ДОКЕМБРИЙ. Стратиграфия СССР. М., 1963.
- Келлер Б. М., Семихатов М. А. НА ЗАРЕ ИСТОРИИ ЗЕМЛИ. М., 1966.
- Келлер Б. М. ВЕРХНИЙ ПРОТЕРОЗОЙ РУССКОЙ ПЛАТФОРМЫ. М., 1968.
- КОРРЕЛЯЦИЯ ДОКЕМБРИЯ. Т. 1, 2. М., 1977.
- Крылов И. Н. НА ЗАРЕ ЖИЗНИ. М., 1972.
- Салоп Л. И. ОБЩАЯ СТРАТИГРАФИЧЕСКАЯ ШКАЛА ДОКЕМБРИЯ. Л., 1973.
- Соколов Б. С. ВЕНДСКИЙ ЭТАП В ИСТОРИИ ЗЕМЛИ. В кн.: Палеонтология. М., 1972.
- Соколов Б. С. НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ СТРАТИГРАФИИ ВЕРХНЕГО ДОКЕМБРИЯ И ПОЛОЖЕНИЯ ВЕНДА. В кн.: Проблемы стратиграфии и исторической геологии. М., 1978.
- Чумаков Н. М. ДОКЕМБРИЙСКИЕ ТИЛЛИТЫ И ТИЛЛОИДЫ. М., 1978.
- Шатский Н. С. ПРИНЦИПЫ СТРАТИГРАФИИ ПОЗДНЕГО ДОКЕМБРИЯ И ОБЪЕМ РИФЕЙСКОЙ ГРУППЫ. В кн.: Стратиграфия позднего докембрия и кембрия. М., 1960.

⁴Келлер Б. М. Сравнение скоростей осадконакопления рифея и фанерозоя в свете данных абсолютной геохронологии. — В кн.: Проблемы осадочной геологии докембрия. М., 1975, с. 43—47.

К истории заселения европейского Севера

С. В. Ошибкина



Светлана Викторовна Ошибкина, кандидат исторических наук, научный сотрудник Института археологии АН СССР; занимается археологией каменного века.

Природная среда всегда оказывала определенное влияние на человека и его хозяйственную деятельность, что находит отражение в тех остатках материальной культуры, изучением которых занимается археология. Поэтому исследование природной среды, в которой проходила жизнь и деятельность древнего человека, реконструкция условий его существования привлекают внимание многих исследователей. Особенно важное значение имели природные условия в ранний период истории, когда они в значительной степени определяли хозяйственную деятельность человека.

Учитывать этот фактор необходимо, особенно когда речь идет о районах с не слишком благоприятным для жизнедеятельности людей климатом. Таков, например, европейский Север. Его освоение началось в глубокой древности и больше чем где-нибудь зависело от природных условий и их периодических изменений. История древнейшего населения Севера еще недостаточно изучена. В то же время совершенно ясно, что вскоре после отступления ледника и освобождения территории от приледниковых вод здесь появились первые человеческие коллективы. По-видимому, это произошло не ранее

VII тыс. до н. э., хотя восточные районы, куда не доходил ледник, были освоены человеком еще раньше и в Приполярном Урале известны стоянки верхнепалеолитического времени.

Примерно в начале VI тыс. до н. э. на рубеже бореального и атлантического периодов начался так называемый климатический оптимум голоцена, который продолжался около 3000 лет и, как полагают, имел глобальный характер. В это время произошло значительное потепление, а позже увеличение влажности. Климат лесной полосы и Севера был теплее и суше современного, что отразилось на составе лесов, в которых преобладали сосна и береза с примесью широколиственных пород. В то время такие породы деревьев, как липа и дуб, встречались значительно севернее своих современных границ. Благоприятные климатические условия и вызванные ими изменения в составе флоры и фауны должны были способствовать освоению самых отдаленных районов. Именно к этому времени относится большинство памятников эпохи мезолита на европейском Севере. Это стоянки охотников и рыбаков, пришедших сюда с юга и юго-запада, а также с востока.

Одним из самых интересных памятников эпохи мезолита на Севере считается стоянка Нижнее Веретье, открытая и исследованная М. Е. Фосс. Она расположена

в южной части Архангельской области, на 62° с. ш., около берега озера Лача. Местность, где находится стоянка, в настоящее время сильно заболочена, и культурный слой залегает на песке под торфом и в самом торфе на уровне грунтовых вод. В то же время исследования показали, что в период существования здесь стоянки в составе леса были дуб (до 10%), ива, ольха, орех, вяз. Наличие этих пород, и особенно дуба, свидетельствует о более сухом и теплом климате. Это подтверждается и составом фауны, так как среди костных остатков обнаружены кости теплолюбивых рыб; таких как жерех, синец, красноперка. На стоянке были найдены многочисленные орудия из кости и камня, в том числе наконечники гарпунов и стрел, струги, мотыги, всевозможные острия, рыболовные крючки. Многие предметы орнаментированы. Особенно интересны предметы, связанные с искусством и верованиями древних жителей. К ним относятся фигурки рыб из плоских костяных пластинок и кочедык (орудие для плетения сетей), заверченный головой животного или, может быть, птицы. Подобные костяные орудия и орнаментальные мотивы известны среди мезолитических памятников Прибалтики. К этому же кругу находок относятся роговые муфты составных орудий (типа мотыги), которые получили распространение в Прибалтике, в культуре кунда, и известны в мезолите северной Европы. Три таких мотыги обнаружены, например, в районе Вологды. Все они удивительно близки по форме, по манере выполнения деталей, имеют одинаковые пазы для укрепления вставного лезвия, которое тоже делалось из рога.

Заслуживает упоминания еще одна стоянка эпохи мезолита на северном берегу небольшого озера (примерно в 70 км к западу от Белого озера), где культурный слой связан с прибрежным песком и перекрыт слоем глины и поздними напластованиями. Здесь найдены многочисленные орудия из сланца и кремня. Исследования пыльцы показали, что во время существования стоянки в составе леса были сосна, береза, липа, дуб, ольха, т. е. те же породы, которые характерны и для Нижнего Веретья. В вышележащих слоях состав леса меняется, увеличивается количество пыльцы влаголюбивой ели, исчезают широколиственные, резко уменьшается количество березы. Все говорит о похолодании и увеличении влажности.

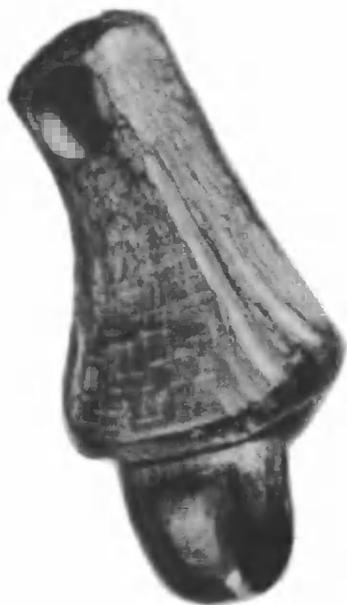
Очередное и значительное потепление и общее улучшение климатических условий в Северном полушарии, по мне-

нию многих исследователей палеоклимата, произошло в середине IV тыс. до н. э. В это время начинается особенно активное освоение Севера в основном населением из более южных районов, из междуречья Оки и Волги. В поисках новых охотничьих угодий люди двигались к северу по левым притокам Волги, оседали на озерах и мелких реках. На западе Вологодской, юге Архангельской областей, в Карелии, на востоке Финляндии возникают многочисленные поселения неолитического времени. Они представляют собой постоянные или временные стоянки с остатками наземных жилищ, очагов, иногда на окраинах стоянок находятся небольшие могилы. Самые многочисленные находки — это сосуды большого размера с характерным узором, который состоит из круглых глубоких ямок и покрывает всю поверхность и круглое дно. Кроме того — в изобилии мелкие орудия из кремня, в том числе наконечники стрел, копий, бытовые орудия для обработки камня, дерева, шкур, а также топоры и тесла из сланца.

В расположении стоянок можно наблюдать определенную закономерность. В древности, когда основой хозяйства были охота и рыболовство, люди, как правило, селились около воды, нередко у самой береговой линии. На озерах с низкими берегами стоянки эпохи мезолита расположены также у воды, но заторфованы. На озерах Карелии и Финляндии, где берега постепенно поднимаются в связи с поднятием Балтийского щита, они располагались на самых высоких местах. В долинах рек с хорошо выраженными береговыми террасами мезолитические стоянки устраивались на высоте 10—15 м. Такая картина наблюдается, например, в долине Сухоны.

В начале эпохи неолита в связи с потеплением и понижением уровня воды в водных системах европейского Севера, начавшимися в середине IV тыс. до н. э. и продолжавшимися до середины III тыс. до н. э., стоянки располагались на берегах ниже современного уровня воды. На это обращали внимание уже первые исследователи. Одним из них был талантливый ученый И. С. Поляков, который дважды, в 1871 г. и 1873 г., посетил Олонецкий край, открыл и впервые исследовал ряд памятников древности.

В середине III тыс. до н. э. климат снова посуровел, повысилась влажность, а уровень воды поднялся. Жители неолитических стоянок были вынуждены покинуть низкие берега и перебраться на вы-



Мотыга, найденная в 1952 г. у деревни Прилуки на р. Вологде.



Мотыга, найденная в 1937 г. на левом берегу р. Вологды, возле Лиминского кирпичного завода.

сокие или удаленные от водоемов. Число стоянок сократилось — очевидно, часть населения переселилась в другие районы. Их прежнее жилье было затоплено и постепенно заторфовывалось. На берегах многих озер Вологодской, Архангельской областей и Карелии можно обнаружить остатки размытых неолитических стоянок. Так, например, возле мыса Ваьшкин Бор на Азатском озере, лежащем на северо-западе Вологодской области, во время высокого стояния воды в 1976 г. под водой были найдены остатки очагов, развалы сосудов, полировальные плиты и многочисленные орудия из камня, в основном из сланца, которым выстлан весь мыс. На этой россыпи обработанные, хорошо шлифованные и даже полированные орудия видны плохо, несмотря на крупные размеры. Небольшую площадь приходилось осматривать по несколько раз, и каждый раз находились новые топоры и тесла. Всего здесь собрано 16 крупных рубящих орудий из сланца.

На протяжении второй половины

III тыс. до н. э. происходили, по меньшей мере дважды, резкие и, вероятно, кратковременные регрессии водоемов Северного полушария, что отмечено в Западной Европе и западных районах СССР — факт особенно важный, поскольку речь идет о памятниках этого времени, расположенных в заболоченных низинах Севера.

Одним из них является единственная в своем роде стоянка, получившая широкую известность после раскопок А. Я. Брюсова, которые были начаты еще в 1938 г. и продолжались с большими перерывами до 1957 г. Перерывы в раскопках были вызваны некоторыми особенностями в расположении памятника. Свайное поселение Модлона — так называется этот памятник — находится в бассейне большого ледникового озера Воже, одного из крупнейших озер на границе Архангельской и Вологодской областей. Это остаток приледникового водоема, ныне сильно сократившегося, с большой (до 40 км) заболоченной низиной. В западной ее части протекает довольно широкая река Модлона с

несколькими рукавами и множеством мелких и сильно заболоченных притоков. Как раз в центре болотистой низины, у впадения в Модлону правого притока речки Перечной, расположено это свайное поселение. Оно занимает узкий и длинный мыс, образованный реками. Ныне его ширина 12—15 м. Местность здесь низкая, большую часть лета она покрыта водой и поэтому в наше время совершенно не заселена. От воды мыс освобождается только в августе, хотя в некоторые годы вода не уходит совсем. Остатки свайных построек находятся на глубине 120 см от современной поверхности и, как правило, ниже уровня воды в реке на 80—100 см. Именно поэтому раскопки памятника так трудны. Иногда в засуху, как это было, например, в 1975 г., вода уходит. Тогда удалось увидеть на берегу остатки дома и мостиков, ряды вбитых в землю свай и между ними массивную плиту с пазами, сделанными каменным орудием.

Несомненно, поселение Модлона и подобные ему памятники могли существовать в этой местности только при условии гораздо более низкого уровня воды в Воже и его притоках. По археологическим данным, свайное поселение датируется второй половиной III тыс. до н. э. Полученные для него радиоуглеродные даты уточнили время его существования периодом 2300—2000 года до н. э. Очевидно, его появление относится ко времени регрессии озера, которая соответствовала регрессии водоемов на значительной территории, в Прибалтике и на севере Западной Европы, о чем упоминалось выше. Жители поселения были пришельцами с юго-запада и устроились поблизости от стоянок местного коренного населения. Может быть, поэтому для поселения было выбрано защищенное водою место, хотя, как представляется, не происходило столкновений между местным и пришлым населением, скорее существовали связи и даже обмен отдельными предметами и украшениями.

Судя по археологическим данным, материальная культура двух групп населения была во многом различной, хотя и те и другие занимались охотой и рыболовством. Местное население строило наземные дома с каменными круглыми очагами, пользовалось посудой из красной глины с примесью крупного песка и орнаментом из круглых ямок, орудия труда изготавливало из пестрого валунного кремня и сланца; умерших сородичей хоронили на

окраине стоянок, а в некоторых случаях — внутри дома.

Пришрое население строило свои дома на сваях над водой. Орудия здесь из светлого кремня, сланец почти не употреблялся. Посуду делали из серой озерной глины с примесью раковины, древесной щепы и растительности. Умерших не хоронили на стоянках, существовали, возможно, отдельные могильники. В свайном поселении Модлона найдено много изделий из дерева, кости и янтаря. Из дерева делали не только сваи, стены домов, переходы между ними, но и бытовые предметы и даже скульптуру. Найдено, например, скульптурное изображение головы собаки, служившее рукоятку ковша, с прекрасно моделированной мордой, глазам углублениями и висячими ушами. Древесина при этом искусно подобрана и как будто передает шерсть животного. По-видимому, в жизни и хозяйственной деятельности собака имела важное значение, что подтверждается находками костей этого животного в культурном слое.

Р 1975 г. на поселении найдено скульптурное изображение головы лося, сделанной из кости, с массивной нижней челюстью и угловатой мордой, на которой прорезями обозначен рот. Под челюстью и на горле изображен, возможно, соляренный символ. Скульптура напоминает изображения лосиных голов, служивших наконечниками для жезла, известных по Оленеостровскому могильнику в Карелии и по некоторым стоянкам в Литве. А отдельные детали оформления (глаза в виде плоских выпуклостей и подчеркнута массивная челюсть) позволяют сравнивать эту фигурку с изображениями лосей из памятников каменного века Финляндии.

В свайном поселении найдены и другие изображения животных, фигурки птиц из кремня и украшения из прибалтийского янтаря, что указывает на связи с юго-западными районами.

Очередное подтопление заставило жителей покинуть свайное поселение Модлона. Позже в этой местности неоднократно селились люди, но стоянки были кратковременными, о чем свидетельствует отсутствие поздних построек и сколько-нибудь значительного культурного слоя. Вообще, конец III тыс. до н. э. был временем исчезновения многих, если не большинства неолитических поселений, жители которых по ряду причин изменили привычные места обитания, частично освоив новые территории. Значительные изменения происходили, по-видимому, в хозяй-



Остатки свайного поселения на р. Модлоне. Поселение, подобно граду Китежу, погружено с III тыс. до н. э. в воду. «Появляется» из воды только в самые сухие годы. Одним из таких сезонов был 1975 г., позволивший «поселение» заснять на пленку.

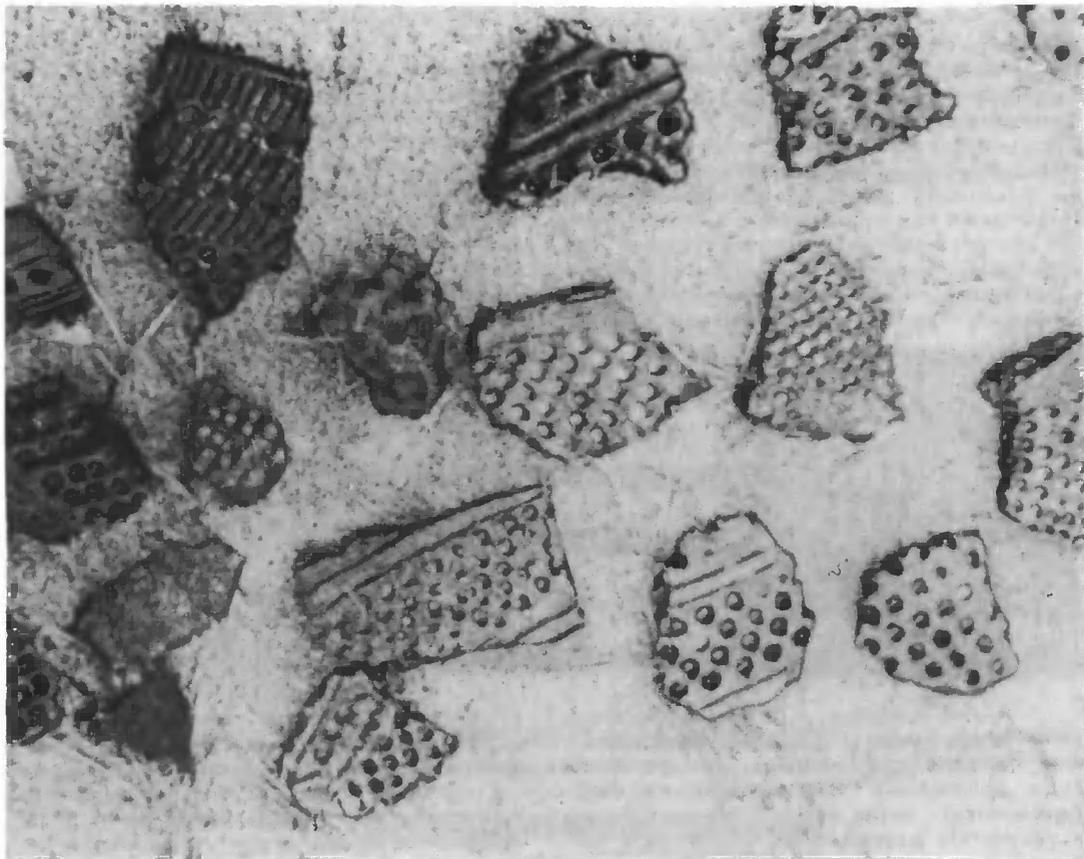
стве, быту, в экономическом укладе северных племен неолитического времени.

На рубеже III—II тыс. до н. э. произошли важные исторические события. К этому времени относится мощная миграция населения, известного под названием «культуры боевых топоров». Племена скотоводов продвинулись в лесную зону Европы, достигли Прибалтики, Верхнего и Среднего Поволжья, территории современных Дании, Швеции, Финляндии. В то же время север лесной полосы не привлекал это население, потому что в тот период климат таежных районов был достаточно влажным, а условия жизни — суровыми и мало приспособленными для разведения скота. Следы пребывания этой

группы населения встречаются здесь в исключительно редких случаях.

Только в последних веках II тыс. до н. э. — в эпоху поздней бронзы — на берегах северных озер и рек вновь появляются постоянные поселения. В озерных местах они расположены по тем же берегам, что и неолитические стоянки, хотя и не достигают самых низких отметок, оставленных раннеолитическими стоянками. В бассейне Сухоны памятники этого времени занимают террасы высотой 6—8 м от современного уровня воды, т. е. они ниже мезолитических, но выше неолитических.

О климате конца II тыс. до н. э. у исследователей нет единого мнения. Многие считают, что климат был значительно теплее и суше современного, иногда этот период именуют ксеротермическим и связывают с ним заметный, хотя и кратковременный, сдвиг ландшафтных зон в северном направлении. Другие исследователи полагают, что существенных изменений климата в это время не было. Однако изу-



Остатки «северной» керамики из затопленной стоянки. Снимок сделан через воду.

чение археологических памятников показывает, что в пыльцевых спектрах снова обнаруживается пыльца широколиственных пород деревьев, а в ныне совершенно затопленных озерных низинах европейского Севера могли существовать большие и постоянные поселения. Примером такого поселения служит Селище в бассейне озера Воже, где найдены посуда, орудия труда, изделия из кости и металла, а также кости домашних животных. О низком уровне воды в водоемах свидетельствует и расположение памятников, что как будто подтверждает предположение о периоде теплого и сухого климата.

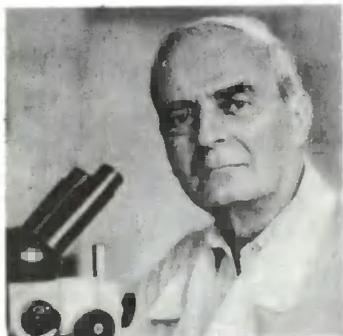
Примерно в середине I тыс. до н. э. снова произошла смена климатических

условий, наступило резкое похолодание, а в результате катастрофических наводнений изменились очертания берегов северных морей. Эти явления в той или иной степени коснулись значительных территорий Северного полушария: население севера лесной полосы резко сократилось, памятники второй половины I тыс. до н. э. редки и мало изучены.

Как видим, освоение Севера началось в глубокой древности и было самым тесным образом связано с природными условиями, климатом, водным режимом озер и рек. В определенные исторические периоды северные районы были достаточно плотно заселены. Обычно это совпадало с понижением влажности, увеличением количества безморозных дней в году, изменениями в составе лесов и фауны. Особенно многочисленны памятники эпохи неолита, во время существования которых природные условия Севера были наиболее пригодными для освоения зоны таежных лесов племенами охотников и рыболовов.

Прыгающие гены

С. М. Гершензон



Сергей Михайлович Гершензон, академик АН УССР, заведует отделом Института молекулярной биологии и генетики АН УССР. Работает в области общей и молекулярной генетики. Главные направления его исследований — генетическое строение природных популяций и мутагенное действие ДНК и вирусов.

Давно известно, что гены расположены в хромосомах в строго определенном порядке, специфичном для каждого вида организмов. Иногда этот порядок нарушается перестройками хромосом: в результате разрывов хромосом либо теряется оторвавшийся фрагмент и возникают так называемые нехватки, или делеции, либо возникшие фрагменты воссоединяются иначе, чем было в исходных хромосомах, следствием чего являются инверсии, дупликации или транслокации. Мутации этих типов лишь изредка возникают спонтанно, но их довольно легко получать искусственно: воздействием разных физических и химических факторов, например ионизирующими излучениями, различными химическими веществами, поэтому такие мутации хорошо изучены.

В последние годы к этим привычным для генетиков типам хромосомных перестроек прибавился еще один, а именно: перемещение с места на место в хромосомах маленьких отрезков ДНК с содержащимися в них немногочисленными генами. Этому явлению, названному транспозицией генов, уделяется сейчас большое внимание. Транспозиции широко распространены, они объясняют ряд давно известных, но остававшихся непонятными фактов и, по-видимому, играют важную роль как в эволюции генетического аппарата, так и

в регуляции действия генов, в том числе в процессе дифференцировки клеток и тканей развивающегося организма.

Большинство работ, посвященных изучению таких «прыгающих» генов, было проведено на бактериях, плаزمидях и фагах, т. е. на прокариотах, у которых нет морфологически обособленного клеточного ядра, а единственная хромосома представлена голой молекулой ДНК.

В ходе исследований транспозиций у прокариотов выяснилось, что маленькие отрезки ДНК, способные вычлениваться из хромосомы (эксцизия) и встраиваться в нее в другом месте (инсерция) могут быть разделены на два класса: инсерционные сегменты (сокращенное обозначение ИС)¹ и транспозоны (сокращенное обозначение Тп).

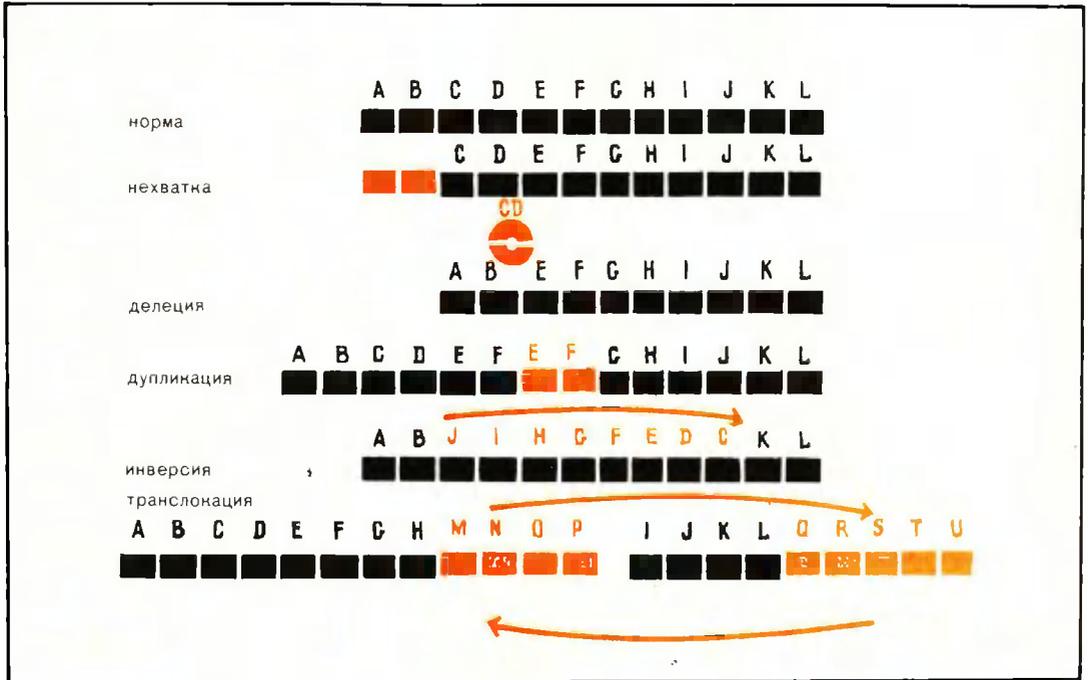
Инсерционные сегменты значительно меньше, чем транспозоны. Кроме того, транспозоны содержат в себе структурные гены (разные у разных Тп), функции которых не связаны с инсерцией или эксцизией участка ДНК. В ИС таких генов, по-видимому, нет.

¹В англо-американской литературе обозначение ИС представляет сокращение слов insertion sequence, т. е. инсерционная последовательность (подразумевается — нуклеотидных пар).

ИНСЕРЦИОННЫЕ СЕГМЕНТЫ

Несколько лет назад П. Штарлингер с сотрудниками и Г. Зедлер с сотрудниками (ФРГ), изучая галактозный и лактозный опероны кишечной палочки, которые отвечают за усвоение бактериями соответствующих сахаров, обнаружили необычный тип мутаций кишечной палочки, вызываемых встраиванием небольших отрезков ДНК в гены этих оперонов². Последующие работы показали, что инсерционные сегменты — это очень короткие отрезки ДНК,

длиной всего 550—1400 пар нуклеотидов (что соответствует одному или немногим небольшим генам). В ИС, по-видимому, нет структурных генов, кроме участвующих в функциях, связанных с транспозицией. Сейчас известно семь разных видов инсерционных сегментов, отличающихся главным образом размерами; некоторые из них содержат промоторы или терминаторы, а другие — нет. Для большинства ИС характерно, что оба конца отрезка ДНК состоят из тождественных последовательностей нуклеотидных пар; у некоторых



Обычные типы перестроек хромосом: нехватка — потеря концевой участка хромосомы, делеция — потеря участка из середины хромосомы, дупликация — удвоение участка хромосомы, инверсия — поворот на 180° участка хромосомы, транслокация — обмен участками двух негомологичных хромосом.

сегментов эти концевые повторы ориентированы одинаково, у других они перевернуты (например, АБВГД и ДГВБА) относительно друг друга (так называемые палиндромы).

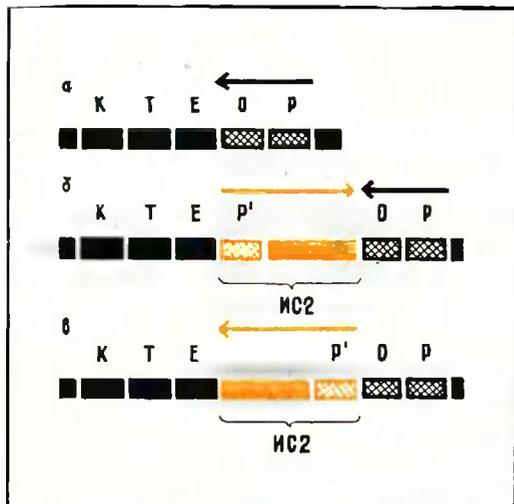
Предполагается, что все ИС происходят из бактериальных хромосом. По крайней мере, в хромосоме диких кишечных палочек всегда присутствует восемь копий ИС1 и пять копий ИС2. Имеются ИС и в ряде плазмид кишечной палочки: в так называемом половом факторе F их три (один ИС1 и два ИС3), есть они и в плазмидах типа R, содержащих гены устойчивости к антибиотикам.

Инсерционные сегменты могут встраиваться во многие места бактериальной или фаговой хромосомы, а также R-плазмид.

²Оперон — это участок ДНК, который переписывается в виде одной непрерывной цепи ДНК. В своей начальной части он содержит промотор, т. е. участок ДНК, который узнается ферментом, синтезирующим РНК, РНК-полимеразой. В конце оперона находится участок, называемый терминатором, на котором заканчивается транскрипция (синтез матричной РНК). Основная часть оперона (90—98%) приходится на структурные гены, т. е. участки генома, на которых синтезируется матричная РНК. Между промотором и структурными генами расположен оператор.

мид. Когда ИС включается в какой-нибудь ген, то этот ген прекращает функционировать (он перестает транскрибироваться, так что не синтезируется кодируемый геном белок или полипептид). В то же время тормозится работа и других генов данного оперона, расположенных в направлении транскрипции, т. е. возникают так называемые полярные мутации этих генов.

Примечательно, что кроме негативного действия ИС обладают и позитивными свойствами. Это связано с присутствием в ИС элементов, участвующих в управлении



Регуляция галактозного оперона кишечной палочки инсерцией ИС2. К, Т, Е — структурные гены, О — оператор, Р — промотор оперона, Р' — промотор ИС2. Стрелками указано направление движения РНК-полимеразы (по П. Неферс и Х. Зедлеру, 1977). Обычно при функционировании оперона его оператор активируется галактозой, тогда РНК-полимераза свободно минуется оператор и транскрибирует структурные гены [а]. На схеме хорошо видна зависимость действия ИС2 от его ориентации [показано красной стрелкой]. Если ориентация ИС2 противоположна направлению транскрипции оперона, то структурные гены не функционируют [б], при обратной ориентации гены работают даже, если оператор депрессирован [в].

транскрипцией. Так ИС1 прекращает или снижает активность генов оперона, будучи встроеным в него в любой ориентации, потому что этот сегмент содержит последовательность нуклеотидных пар, опознаваемую терминаторным белком, останавливающим транскрипцию. Напротив, ИС2 проявляет тормозящее действие только в одной из двух возможных ориентаций, а в другой он активирует работу

генов оперона, так как содержит собственный промотор, т. е. последовательность нуклеотидных пар, имеющую сродство с ферментом РНК-полимеразой, осуществляющим транскрипцию (синтез матричной РНК на ДНК). Такая зависимость действия ИС2 от его ориентации хорошо видна, когда он встроен в галактозный оперон кишечной палочки. Оперон этот состоит из промотора, оператора и трех структурных генов К, Т и Е, кодирующих ферменты галактокиназу, трансферазу и эпимеразу. Обычно для функционирования этого оперона нужно, чтобы его оператор был активирован поступлением в клетку галактозы; тогда РНК-полимераза, присоединившаяся к промотору этого оперона, свободно минуется оператор и транскрибирует структурные гены. Когда в галактозный оперон встраивается ИС2, там оказываются два промотора сразу — собственный промотор оперона и промотор ИС2. Если при этом ИС2 ориентирован так, что направление его транскрипции противоположно направлению транскрипции оперона, то структурные гены не функционируют; при обратной же ориентации сегмента структурные гены работают непрерывно, притом даже в том случае, если оператор репрессирован, так как их транскрибирует РНК-полимераза, прикрепившаяся к промотору ИС2.

Эти два противоположные эффекта показывают, что инсерционные сегменты могут действовать как простые переключатели работы генов.

Способность инсерционных сегментов ДНК не только вызывать мутации, но и регулировать действие близлежащих генов, имеет важное значение.

Иногда происходит утеря инсерционных сегментов, т. е. эксцизия (вырезание) ИС с полным восстановлением функции бактериального гена, в который ИС был встроен; другими словами, этот ген возвращается к своему нормальному состоянию. Установлено, что инсерция и эксцизия ИС осуществляется двумя разными ферментами. Они пока еще не идентифицированы, но показано их отличие от ферментов, участвующих в обычной перегруппировке генов между гомологичными участками хромосом (кроссинговере). Это видно из того, что инсерция и эксцизия ИС обнаружены в бактериях, у которых вследствие мутации нарушен ферментативный механизм обычной рекомбинации.

С некоторыми ИС связаны более крупные хромосомные перестройки. Так, частота делеций, возникающих вблизи

встроенного в хромосому ИС1, увеличивается в 100—1000 раз, причем сам сегмент остается на месте и продолжает вызывать все новые делеции. Эти делеции начинаются точно от конца ИС1 и по своим размерам принадлежат к нескольким классам, каждый из которых встречается с определенной частотой. В образовании этих делеций участвуют ферменты, отличающиеся от фермента эксцизии и от ферментов обычной рекомбинации и способные опознавать как конец ИС1, так и определенные точки (сайты) бактериальной хромосомы, до которых простираются делеции. Под влиянием сегментов могут возникать и дупликации; например, обнаружены дупликации ИС2, включенного в галактозный оперон кишечной палочки.

ТРАНСПОЗОНЫ

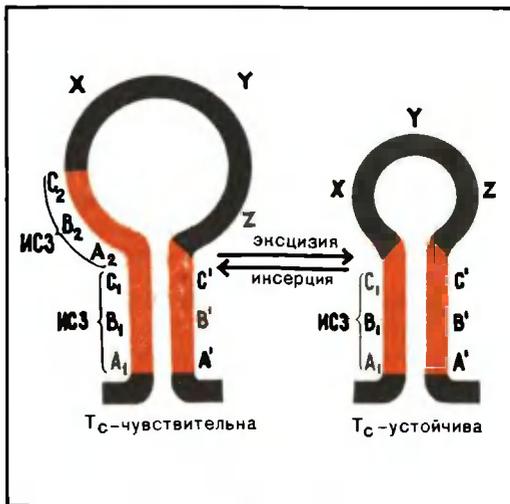
За последние 15 лет убедительно показано, что гены устойчивости к антибиотикам могут перескакивать из R-плазмид в геном фагов, оттуда в бактериальную хромосому, снова в плазмиду, из одной плазмиды в другую, вообще могут перемещаться между всеми этими элементами в любых направлениях. К настоящему времени выяснилось, что такой перенос генов осуществляется с помощью отрезков ДНК, названных транспозонами (Тн).

Транспозоны крупнее инсерционных сегментов (длина их всегда более 2 тыс. пар нуклеотидов), они содержат по несколько генов и обычно имеют характерную структуру, до некоторой степени сходную со структурой ИС: обе концевые последовательности нуклеотидных пар у них одинаковы, но ориентированы они в большинстве случаев палиндромно, т. е. инвертированы одна по отношению к другой. Для некоторых Тн показано, что эти концевые последовательности представляют собой ИС; например, у Тн, несущего ген устойчивости к тетрациклину, концевыми последовательностями служат ИС3. В средней части Тн лежит ген, ответственный за устойчивость бактерии к тому или иному антибиотику. Известны Тн, содержащие гены устойчивости к пенициллину, стрептомицину, тетрациклину, ампициллину, хлорамфениколу, сульфаниламидам и др. Все эти Тн независимы друг от друга.

Транспозоны могут встраиваться в новые места даже в том случае, если в бактерии отсутствуют ферменты обычной рекомбинации. Отсюда вытекает, что транспозиции Тн происходят с помощью собственных ферментов. Недавно этот вывод

был экспериментально подтвержден Ф. Хеффроном и сотрудниками (США), изучившими делеции в одном Тн. Оказалось, что потеря концевых повторов всегда устраняла возможность транспозиции, делеция же в середине Тн только препятствовала синтезу фермента, нужного для транспозиции.

Кроме функции переноса генов устойчивости, транспозоны, подобно инсерционным сегментам, могут обладать мутагенным действием. Так, встраивание в плазмиду транспозона, содержащего ген



Инактивация гена Тс, определяющего устойчивость кишечной палочки к тетрациклину, в результате инсерции дополнительного ИС3 в транспозон плазмиды типа R [по С. Козну, 1976].

устойчивости к ампициллину, вызывает полярные мутации близлежащих генов плазмиды. Структурные перестройки Тн могут контролировать проявление находящихся в них генов. Например, иногда в транспозон, несущий ген устойчивости к тетрациклину, встраивается еще один ИС3, и тогда ген устойчивости к тетрациклину полностью подавлен; утеря же добавочного ИС3 восстанавливает активность этого гена.

Существование транспозонов в качестве постоянных нормальных компонентов бактериальных хромосом и плазмид наводит на мысль, что они чем-то полезны бактериям. Очевидно, что транспозиции помогают бактериям приобретать наследственную устойчивость к антибиотикам и другим вредным для них факторам. Воспроизведение ИС и Тн, а следовательно

сохранение их в популяции бактерий, обеспечено их способностью встраиваться в плазмиды. Участие ИС в объединении разных плазмид позволяет мелким плазмидам включаться в крупные, которые переходят из клетки в клетку по образуемым ими мостикам. Несомненно также, что транспозиции участвуют в регуляции работы генов прокариотов и могут вызывать у них хромосомные перестройки и генные мутации, что должно иметь эволюционное значение.

Заканчивая рассмотрение переноса генов прокариотов инсерционными сегментами и транспозонами, нужно отметить, что эти явления имеют много общих черт с переносом генов некоторыми фагами (например, фагом *Mu* кишечной палочки), геном которых может встраиваться в хромосомы бактерий и освобождаться из них. На основании этого сходства можно предположить родственное происхождение фагов, плазмид и бактериальных хромосом.

ТРАНСПОЗИЦИИ И РЕГУЛЯЦИИ ПОЛА У ДРОЖЖЕЙ

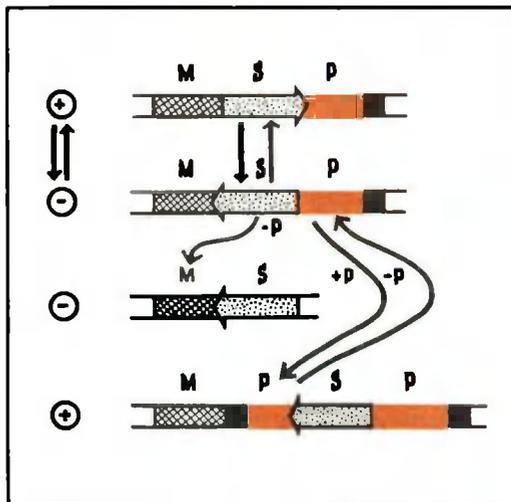
Полученные за последние годы данные не только доказывают, что у эукариотов транспозиции также имеют место, но и позволяют считать, что, по крайней мере, у некоторых из них молекулярные механизмы транспозиций принципиально сходны с обнаруженными у прокариотов. Это предположение особенно веско подкрепляют результаты исследований регуляции пола у дрожжей, проведенных главным образом Р. Эггелем (ФРГ).

У дрожжей половой процесс состоит в слиянии двух гаплоидных клеток, принадлежащих к разным половым типам. Существуют гомоталлические клоны, в каждом из которых все клетки в половом отношении одинаковы, т. е. принадлежат одному из двух половых типов и стойко передают этот тип при вегетативном размножении, а также гетероталлические клоны, состоящие из смеси клеток обоих половых типов.

У африканских пивных дрожжей *Saccharomyces rombe* в гомоталлических кломах пол клеток очень часто изменяется при их делении — клетка типа «плюс» дает потомков типа «минус» или наоборот. Установлено, что у этих дрожжей в одной из хромосом почти рядом лежат два гена, один из которых (*M*) определяет принадлежность клетки к типу «минус», а другой (*P*) — к типу «плюс». Между этими генами

находится маленький отрезок хромосомы, играющий роль переключателя их работы. При одной его ориентации транскрибируется ген *P*, при другой — ген *M*.

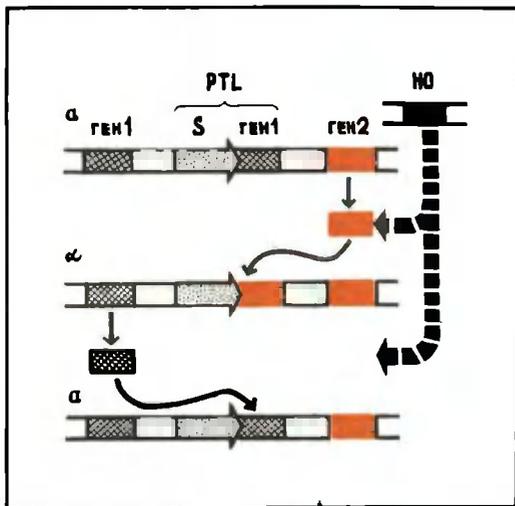
По-иному, но тоже с участием транспозиций, регулируется пол у обычных хлебопекарских дрожжей (*Saccharomyces cerevisiae*). Два типа половых клеток (α и α) в гомоталлических кломах часто переходят друг в друга. В одной из хромосом локализованы два «молчащих» гена 1 и 2. В промежутке между ними, но на некотором расстоянии от обоих, на-



Регуляция половых типов у дрожжей шизосахаромицет. *M* — ген «минус» типа, *P* — ген «плюс» типа, *S* — контролирующий элемент, содержащий промотор; указано направление транскрипции (по Р. Эггелю, 1977).

У этих дрожжей в одной из хромосом почти рядом лежат два гена: ген *M* определяет принадлежность клетки к «минус» типу, а ген *P* — ее принадлежность к «плюс» типу. Маленький отрезок хромосомы, находящийся между этими генами, играет роль переключателя. При одной его ориентации транскрибируется ген *P*, а когда вследствие инверсии переключатель оказывается перевернутым на 180°, то транскрибируется ген *M*. В этом переключателе имеется собственный промотор переключателя *S*, который осуществляет регуляцию активности генов *M* и *P*. Ниже на рисунке показано, как у этого вида дрожжей из гомоталлического клона получается гетероталлический. При выпадении гена *P* образуется «минус» клон, а дупликация этого же гена, происходящая путем его транспозиции, дает «плюс» клон.

ходится «локус пола» PTL, состоящий из переключателя, ориентированного всегда одинаково, и из перенесенной в соседство к нему копии либо гена 1 (тогда клетка принадлежит к типу α), либо гена 2 (тогда клетка принадлежит к типу α). Здесь информация о половых типах находится в двух разных местах генома, а элемент, контролирующий реализацию этой информации, помещается в третьем месте. Регуляция осуществляется не изменением ориентации этого элемента, а транспозицией структурных генов. Для того, чтобы



Регуляция половых типов у хлебопекарских дрожжей. Ген 1 определяет половой тип α , ген 2 определяет половой тип α , S — контролирующий элемент, содержащий промотор [указано направление транскрипции]. HO — ген, определяющий гомоталлизм [по Р. Эгелю, 1977]. Как и в предыдущем случае, два половых типа α и α в гомоталлических клонах часто переходят друг в друга. В одной из хромосом локализованы два «молчащих» гена 1 и 2. Между генами, но на некотором расстоянии от обоих, находится «локус пола» PTL, состоящий из переключателя, ориентированного всегда одинаково, и из перенесенной в соседство к нему копии либо гена 1 [тогда клетка принадлежит к типу α], либо гена 2 [тогда клетка принадлежит к типу α]. Здесь и регуляция осуществляется не изменением ориентации контролирующего элемента, а транспозицией структурных генов. Для этого необходимо присутствие гена HO, определяющего гомоталлизм и локализованного в другой хромосоме. Если этот ген удален скрещиванием, то наследственно закрепляется либо половой тип α , либо половой тип α ; очевидно, ген HO кодирует специальный фермент, нужный для транспозиции.

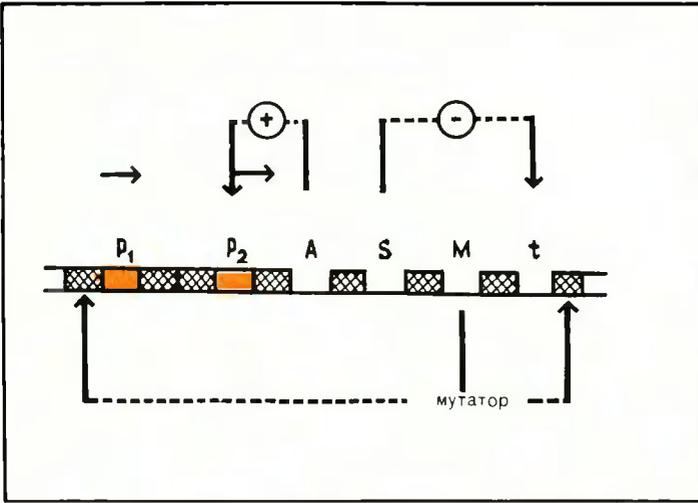
такая транспозиция происходила, необходимо присутствие гена HO, локализованного в другой хромосоме и определяющего гомоталлизм. Если этот ген удален скрещиванием, то наследственно закрепляется либо половой тип α , либо половой тип α ; очевидно, ген HO кодирует специальный фермент, нужный для транспозиции.

КОНТРОЛИРУЮЩИЕ ЭЛЕМЕНТЫ У КУКУРУЗЫ

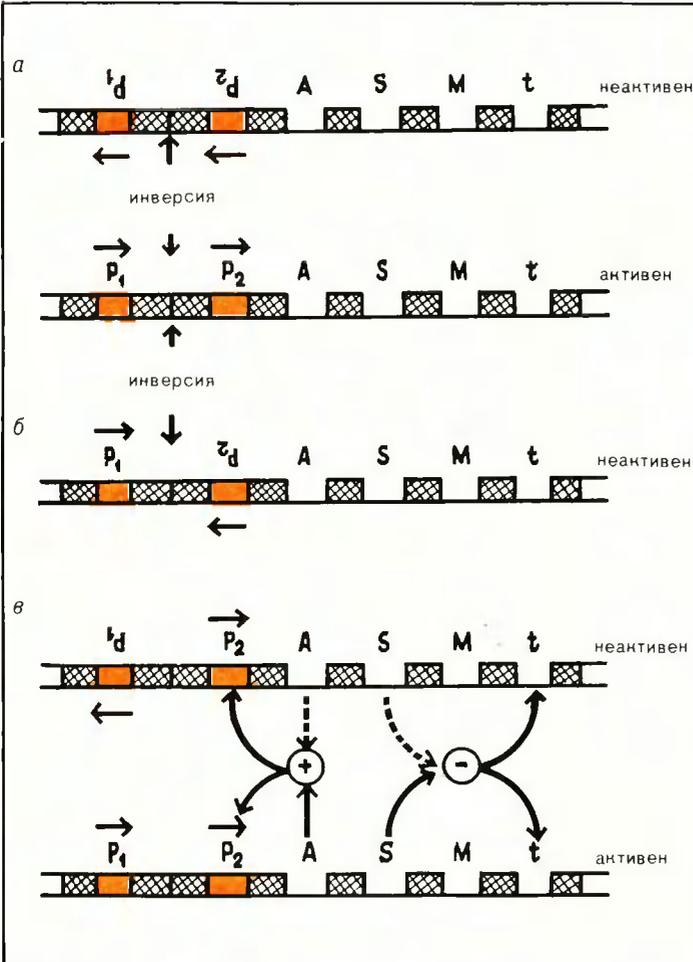
Так называемые контролирурующие элементы у кукурузы, открытые Б. Маклинтоком (США) более четверти века назад и затем подробно изученные ею с помощью методов классической генетики, также во многом похожи на инсерционные сегменты и транспозоны у прокариотов. Встраивание контролирующего элемента в тот или иной ген вызывает его мутацию, т. е. либо полную инактивацию гена, либо изменение его фенотипического выражения. Нередко происходит точная эксцизия встроеного контролирующего элемента, в результате чего восстанавливается функция того гена, куда он был встроен. Вычленение этих элементов в соматических клетках ведет к мозаичному проявлению мутантного гена.

Есть два типа контролирующих элементов: сложные регуляторные элементы и подчиненные им более простые рецепторные элементы, не кодирующие какого-либо продукта. Те и другие могут встраиваться, вырезаться и перемещаться в другие места хромосом. Известно несколько таких двойных систем элементов, независимых друг от друга. Недавно П. Неферс и Г. Зедлер (ФРГ) предложили схему молекулярно-генетической структуры и механизма действия наиболее изученной системы, обозначаемой Spt (супрессор-мутатор).

Согласно их гипотезе, в состав регуляторного элемента Spt входят три структурные гена — А (активатор), S (супрессор) и М (мутатор). Слева от них находятся два отрезка, аналогичные ИС2 бактерий; каждый из них имеет собственный промотор. На другом конце регуляторного элемента лежит отрезок, аналогичный ИС1 бактерий; он содержит терминатор транскрипции (t). Транскрипция начинается с первого промотора (P₁), но чтобы РНК-полимераза могла дойти до структурных генов, нужна активация второго промотора (P₂), осуществляемая продуктом гена А. Продукт гена S прекращает транскрипцию, действуя на терминатор (t). Продукт гена



Предполагаемая структура и функция активного регуляторного контролирующего элемента *Spt* кукурузы, в состав которого входят три структурных гена — A (активатор), S (супрессор) и M (мутатор). На левом конце находятся два элемента, аналогичные ИС2 бактерий и имеющие собственный промотор (P_1 и P_2). На правом конце лежит отрезок, аналогичный ИС1 бактерий, содержащий терминатор транскрипции (t). Транскрипция начинается с первого промотора (P_1), но чтобы РНК-полимераза могла дойти до структурных генов, нужна активация второго промотора (P_2), осуществляемая продуктом гена A . Супрессор действует на терминатор, прекращая транскрипцию. Активатор, наоборот, стимулирует ее, активируя промотор P_2 . Мутатор вырезает из хромосомы весь элемент *Spt*. Вертикальные заштрихованные столбики — последовательности пар нуклеотидов, в которых могут происходить разрывы, ведущие к инверсиям, дупликациям и делециям (по П. Неферс и Х. Зедлеру, 1977).



Циклические изменения активности *Spt*. Инверсия одного или обоих промоторов ведет к трем разным неактивным структурам (а, б и в). Структура в может быть вновь активирована, если активирующий продукт будет доставлен другим работающим геном (по П. Неферс и Х. Зедлеру, 1977).

М вызывает эксцизии всего или части регуляторного элемента, а также эксцизии и мутации рецепторного элемента.

Активное состояние рецепторного элемента S_{pm} с определенной частотой чередуется с неактивным. Предполагают, что инактивация вызывает инверсия одного (любого) из двух промоторов S_{pm} . Когда инвертируется P_2 , то прикрепившаяся к нему РНК-полимераза сталкивается с РНК-полимеразой,двигающейся от P_1 в противоположном направлении, и не допускает ее до структурных генов S_{pm} ; когда же инвертируется P_1 , то транскрипция этих генов происходит лишь в том случае, если промотор P_2 активируется продуктом гена А, что может иметь место только при наличии где-нибудь в геноме растения еще одного регуляторного элемента S_{pm} , притом находящегося в работающем состоянии.

ИНСЕРЦИОННЫЕ МУТАЦИИ У ДРОЗОФИЛЫ

Случаи, когда тот или иной ген плодовой мушки дрозофилы становится нестабильным, т. е. приобретает способность мутировать гораздо чаще обычного, были известны давно, но природа этого явления стала проявляться только в самые последние годы. Большое значение в этом отношении имели исследования М. Грина (США) и Б. Расмусона (Швеция), показавшие, что причины дестабилизации генов у дрозофилы сходны с обнаруженными у бактерий. Этот вывод был затем подтвержден и дополнен работами ряда других генетиков.

Нестабильные мутации возникают в результате встраивания в хромосому дрозофилы какого-то «постороннего» фрагмента, т. е. содержащего генетическую информацию, не свойственную данному отрезку хромосомы. Мутации эти могут идти в разных направлениях — от доминантности к рецессивности и от рецессивности к доминантности, от нестабильного аллельного состояния гена к стабильному или к другому нестабильному, от видимого фенотипического проявления к летальному и т. д. Вероятно, различия эти определяются тем, в какое место гена встроены посторонний фрагмент, а иногда зависят от ориентации встроеного фрагмента в хромосоме. В некоторых случаях инсерция влияет на проявление не одного, а нескольких близлежащих генов. По временам встроены в хромосому фрагмент самопроизвольно выпадает из нее, что

приводит к восстановлению исходного немутантного состояния гена или генов, находившихся в районе инсерции. Как и при инсерционных мутациях у бактерий, иногда рядом со встроеным в хромосому фрагментом теряется участок небольшой хромосомы. Такие делеции возникают от границы встроеного участка и простираются до определенных точек, так что относятся по своей длине к нескольким разным классам.

Все эти особенности позволяют предположить, что нестабильные генные мутации у дрозофилы по своей природе очень близки к мутациям, вызываемым инсерционными сегментами и транспозонами у прокариотов. Это предположение получило веское подкрепление, когда обнаружили, что фрагменты, встроены в хромосомы дрозофилы и вызывающие там дестабилизацию генов, способны к перемещению в другие места хромосомного аппарата, подобно ИС и Тн бактерий. Так, М. Грин показал, что фрагмент, встроены в ген *white* (белые глаза) вблизи левого конца X-хромосомы дрозофилы (местоположение 1,5 по генетической карте этой хромосомы) переместился в среднюю часть X-хромосомы, вызвав мутацию гена *dusky* (серые крылья, местоположение 36,2), а несколько позже снова слегка передвинулся, в результате чего возникла нестабильная мутация соседнего гена *miniature* (уменьшенные крылья, местоположение 36,1).

Недавно Г. Исинг и К. Рамель (Швеция) подробно изучили у дрозофилы инсерцию, первоначально локализованную в правой части X-хромосомы. Встроеный фрагмент довольно крупный (около 1% длины X-хромосомы) и содержит, по меньшей мере, два известных гена — аллель гена *white*, обуславливающий розовую окраску глаз, и нормальный аллель гена *roughest* (неправильное строение глаз). В течение нескольких лет авторы следили за перемещением этого фрагмента в хромосомах дрозофилы и обнаружили 40 случаев его транспозиции, из которых для 38 была определена новая локализация фрагмента (5 — в X-хромосоме, 14 — во 2-й хромосоме, 18 — в 3-й хромосоме и 1 — в Y-хромосоме). Места встраивания изучавшегося фрагмента распределялись по длине хромосом не случайно. Так, из 18 случаев «перепрыгивания» его в третью хромосому 9 были сосредоточены в небольшом отрезке в середине хромосомы; а в X-хромосоме четыре из пяти транспозиций были в районе гена *white*, т. е. транспозон встро-

ился в тот участок хромосомы, откуда, несомненно, происходил перемещавшийся фрагмент. Почти в половине случаев встроенный фрагмент вызывал инактивацию близлежащего гена, что выражалось в появлении летальной мутации. Кроме того, содержащийся в этом фрагменте аллель гена white был нестабильным, давая частые (до 0,2%) мутации к доминантному нормальному состоянию (определяющему красную окраску глаз) или к другим рецессивным состояниям. Отмечен случай, когда перемещающийся фрагмент захватил и перенес на новое место один из генов 2-й хромосомы, ранее в этом фрагменте отсутствовавший. Утеря встроенного фрагмента в результате самопроизвольной эксцизии происходит с частотой от 0,03% до 1,86% в зависимости от генотипа линии.

Интересно, что подобные нестабильные мутации довольно часто встречаются в природных популяциях дрозофилы. Впервые такие случаи были зарегистрированы автором статьи еще в 1937—1939 гг. при исследовании одной природной популяции дрозофилы в окрестностях Киева³. Среди пойманных мух и их потомков были выделены нестабильные аллели, по меньшей мере, пяти генов; при размножении мух из этих линий нестабильность наследовалась, но по временам появлялись и стабильные мутации тех же генов, а также нормальные особи, потерявшие способность к частному мутированию этих генов.

Позже подобные нестабильные мутации в природных популяциях дрозофилы находили и другие исследователи. М. Д. Голубовский и Ю. Н. Иванов (Институт цитологии и генетики СО АН СССР) на протяжении ряда лет изучали это явление в нескольких географически удаленных друг от друга местностях СССР (Украина, Кавказ, Средняя Азия, Дальний Восток). Длительные наблюдения привели авторов к представлению о существовании в природных популяциях дрозофилы своего рода «моды на мутации», выражающейся в повышении и последующем снижении частоты определенных мутаций одновременно в разных точках ареала вида. В 1930-е годы в десятки и сотни раз возросла частота мутаций генов yellow (желтое тело) и white (белые глаза); в 1940-х гг. мутабильность этих генов нормализовалась. В 1968 г. во множестве стали появляться мутанты с ненормальным строением брюшка; в 1973 г.

частота этой наследственной аномалии в популяциях стала падать. Однако в это же время в ряде изолированных друг от друга популяций произошла вспышка мутабильности гена singed (опаленные щетинки). Многие (или все?) такие «модные» мутации, появившиеся в природных популяциях дрозофилы, были нестабильными.

Для объяснения одновременного повышения частоты мутаций определенных генов в популяциях дрозофилы, разделенных сотнями и тысячами километров, М. Д. Голубовский и соавторы предложили следующую гипотезу. Они полагают, что явление вызвано быстрым распространением какого-то инфекционного агента, вероятно вируса с мутагенными свойствами, вызывающего мутации преимущественно определенных генов. Данные, полученные в нашей и в ряде других лабораторий, показали высокую мутагенность для дрозофилы ряда вирусов, притом мутагенность, обладающую некоторой избирательностью в отношении определенных генов, что говорит в пользу этой гипотезы.

Механизм встраивания контролирующих элементов в хромосому дрозофилы, их эксцизии и транспозиции неизвестен. Возможно, что ключ к пониманию этого механизма даст изучение обмена участками между гомологичными хромосомами (кроссинговера) у самцов. Как известно, у дрозофилы кроссинговер происходит во время мейоза у самок, но не встречается у самцов. В последние годы С. Минамори с сотрудниками (Япония) и Ю. Хирайзumi, Б. Слатко и М. Грина (США) в природных популяциях дрозофилы нашли наследственный фактор (или, может быть, несколько разных факторов, это точно не установлено), в присутствии которого кроссинговер осуществляется и у самцов, хотя гораздо реже, чем у самок. Этот фактор с большой частотой (иногда достигающей 20% и даже 50%) встречается во многих географически разобщенных популяциях дрозофилы в разных частях света. Он локализован во 2-й хромосоме, но нередко присутствует не в хромосоме, а в цитоплазме, очевидно в форме своего рода плазмиды, и тогда наследуется так, как это свойственно внеядерным генетическим элементам.

Известно, что кроссинговер осуществляется ферментами. Однако ферменты, участвующие в кроссинговере у самцов дрозофилы, специфичны и отличаются от ферментов, с помощью которых происходит кроссинговер у самок. Способность наследственных факторов, обуславливаю-

³Гершензон С. М. «Збірн. праць з генетики», 1941, № 45, с. 3—30.

щих кроссинговер у самцов, индуцировать мутации и притом мутации нестабильные, позволяет предполагать, что инсерции и кроссинговер у самцов обязаны действию одних и тех же ферментов.

Для прокариотов твердо установлено, что их инсерционные сегменты и транспозоны представляют отрезки ДНК. Едва ли можно сомневаться, что и у эукариотов при транспозициях перемещаются отрезки ДНК, но прямые экспериментальные доказательства этого отсутствуют, имеются только косвенные подтверждения, полученные при изучении мутационного и трансформирующего действия ДНК у дрозофилы и у плесени нейроспоры.

Мутагенность препаратов ДНК разного происхождения для дрозофилы была показана в нашей лаборатории и подтверждена другими исследователями⁴. Инъекции дрозофиле или скармливание ее личинкам чужеродной ДНК вызывает многочисленные летальные и видимые мутации. Результаты таких опытов свидетельствуют о том, что воздействие чужой ДНК ведет к возникновению передающейся по наследству нестабильности определенных генов, по-видимому, обусловленной инсерциями фрагментов ДНК. Аналогичные данные были получены А. Фоксом и сотрудниками (США) и Б. Лимбург-Бушон (Франция) в опытах, в которых дрозофилам из линий, маркированных рецессивными генами, вводили ДНК из линий, несущих доминантные аллели этих же генов. Трансформация рецессивного аллеля в доминантный у потомков подопытных мух часто бывает нестабильной, а характер наследования таких изменений позволяет думать, что они обязаны инсерциям фрагментов ДНК в хромосому. К такому же выводу приводят данные недавней работы Н. Мишра (США) по трансформирующему действию ДНК у нейроспоры.

НЕКОТОРЫЕ ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ О ТРАНСПОЗИЦИЯХ У ЭУКАРИОТОВ

При транспозиции фрагмент ДНК, освободившийся из хромосомы или искусственно введенный в клетку экспериментатором, должен просуществовать в цитоплазме некоторое время без изменений, прежде чем он встроится в новое

место хромосомы. В ряде случаев длительность такого автономного существования ДНК весьма значительна. Так, в опытах по введению в дрозофилу или нейроспору ДНК для получения мутаций или для генетической трансформации показали, что поступивший в клетку фрагмент ДНК может долго оставаться в цитоплазме неразрушенным, многократно передается в таком виде из одного клеточного поколения в другое и лишь затем встраивается в хромосому⁵. К такому же выводу приводит изучение многих нестабильных мутаций, встречающихся в природных популяциях дрозофилы. Столь продолжительное сохранение в цитоплазме свободных фрагментов ДНК, вероятно, возможно только при условии, что эти фрагменты образуют кольцевые структуры, подобные плазмидам или эписомам. Такая структура предохраняет фрагмент от разрушения нуклеазами, всегда имеющимися в цитоплазме. Кроме того, кольцевая структура фрагмента, по-видимому, способствует его инсерции в хромосому.

Из опытов с бактериями известно, что освободить клетку от плазмид или эписом, не повредив при этом ее хромосомный аппарат, можно с помощью профлавина или этидрий бромида. Мишра обрабатывал тем и другим веществом штаммы нейроспоры, проявляющие нестабильность генов, предположительно объясняемую присутствием более легких частиц гена (эписом). В результате нестабильность исчезла — сохранялись либо стойко немутантные особи (очевидно, потерявшие эписому), либо особи, у которых мутантный признак стабилизировался (вероятно, вследствие инсерции эписомы в хромосому).

Исследование транспозиций у эукариотов началось так недавно, что уверенно ничего нельзя сказать об их распространенности, но, видимо, оно широко или даже универсально. Нестабильные мутации описаны у десятков видов растений; у тех из них, у которых такие мутации изучены относительно подробно, например у львиного зева и дельфиниума, они очень похожи своим проявлением и наследованием на мутации кукурузы, вызываемые контролирующими элементами, т. е. почти несомненно обязаны инсерциям. Нестабильная мутация того же типа, какой встречается у дрозофилы, обнаружена у тутового шелкопряда.

⁴См. библиографию в кн.: Гершензон С. М., Александров Ю. Н., Малюта С. С. Мутагенное действие ДНК и вирусов у дрозофилы. Киев, 1975.

⁵Mechanism of mutation and inducing factors. Praha, 1965, pp. 291—293; «Nature», 1978, v. 264, pp. 251—253.

Инсерции имеют место у теплокровных животных и человека. Известно, что в их хромосомы (и притом избирательно в определенные места хромосом) могут встраиваться геномы некоторых вирусов: доказано, что в хромосомы человека встраиваются геномы аденовирусов и вируса герпеса, а в хромосомы мышей и кур — состоящие из ДНК копии геномов ряда РНК-содержащих опухолеродных вирусов (такие копии образуются путем так называемой обратной транскрипции).

Новые данные в пользу широкого распространения инсерций у эукариотов получены в самое последнее время при изучении новейшими молекулярно-генетическими методами тонкой структуры некоторых генов (генов бета-глобина мыши и кролика, гена овальбумина курицы, гена легкой цепи иммуноглобулина мыши)⁶. Внутри каждого из этих генов имеются инсерции сегментов ДНК, не участвующие в синтезе соответствующих зрелых мРНК, кодирующих белковые продукты этих генов. Например, ген овальбумина курицы имеет такую структуру (инсерционные сегменты обозначены буквами ИС, а кодирующие белок части гена — буквами КЧ):

ИС — 1-я КЧ — ИС — 2-я КЧ — ИС —
— 3-я КЧ — ИС

Между тем зрелая мРНК овальбумина, присутствующая в клетках, синтезирующих этот белок, содержит нуклеотидную последовательность только кодирующих частей гена, исключая информацию, записанную в инсерционных сегментах. Вероятно, что первоначально синтезируется полная последовательность всех нуклеотидов ДНК гена овальбумина, а потом из этой пре-мРНК вырезаются участки, считанные с инсерционных сегментов, и остаются лишь транскрипты кодирующих частей гена. Такой механизм, по-видимому, может объяснить, почему пре-мРНК, синтезируемые в клеточных ядрах эукариотов, как правило, гораздо длиннее получающихся из них зрелых мРНК. По крайней мере, в одном случае (ген глобина) выяснено, что внутригенный ИС транскрибируется, но его транскрипт затем вырезается из мРНК. Однако не исключена и другая возможность — внутригенные ИС не считываются вовсе, а транскрибируются

(каждая по отдельности) только кодирующие части гена, а затем эти транскрипты соединяются в одну общую мРНК. Будущее покажет, какая из этих двух гипотез правильна.

Пока неясно, для чего нужны инсерционные сегменты внутри генов. Возможно, они играют определенную роль в эволюции геномов и в регуляции активности генов, но эти предположения еще не подкреплены фактическими данными.

Н. Хозуми и С. Тонегава (Швейцария), изучая синтез иммуноглобулинов у мыши, установили, что в эмбриональных клетках мыши гены, кодирующие постоянную и изменяющуюся части молекулы иммуноглобулина, лежат в хромосоме на некотором расстоянии друг от друга, а позже, при дифференцировке лимфоцитов, эти гены оказываются рядом и считываются совместно, что приводит к образованию единой белковой молекулы. Ряд соображений заставляет предполагать, что такое сближение прежде разобщенных генов происходит при помощи транспозиции. Есть и другие факты, касающиеся онтогенеза многоклеточных организмов, наводящие на мысль о транспозициях или изменениях ориентации элементов, регулирующих работу генов. Так, у дрозофилы известны мутации, при которых какой-нибудь имагинальный диск личинки развивается совсем в иной орган, чем свойственно данному диску у немутантной особи; например, диск, служащий в норме зачатком усика, образует не усик, а ногу. Подобные изменения происходят иногда и при пересадке их в брюшко взрослой мухи. Вероятно, механизм этих изменений аналогичен механизмам, определяющим половые типы дрожжей или контролирующую работу генов галактозного оперона кишечной палочки. Нужно думать, что изучение инсерций, эксцизий и транспозиций генов у эукариотов углубит понимание закономерностей индивидуального развития растений, животных и человека.

Исследование транспозиций перспективно еще в одном отношении. Известно, что инсерции фрагментов ДНК распределяются по длине хромосом не случайно, а до некоторой степени избирательно. Это наблюдается не только при спонтанных транспозициях, но и при экспериментальном введении в организм чужеродных ДНК. Выяснение причин такой избирательности должно способствовать достижению одной из важнейших целей генетики — получения желаемых мутаций.

⁶ Nevers P. «Biol. in unsere Zeit», 1978, № 8, S. 30—31.

ЛАУРЕАТЫ НОБЕЛЕВСКОЙ ПРЕМИИ 1978 ГОДА

По физике — П. Л. Капица

Нобелевская премия по физике присуждена академику Петру Леонидовичу Капице за фундаментальные изобретения и открытия в области физики низких температур.

Петр Леонидович — крупнейший физик-экспериментатор, сочетающий талант ученого с изобретательностью инженера. Он родился в Кронштадте 9 июля 1894 г. Его отец был военным инженером. Петр Леонидович окончил в 1918 г. электромеханический факультет Петроградского политехнического института и начал свою научную работу в этом институте на кафедре А. Ф. Иоффе.

В 1921 г. П. Л. Капица был направлен в научную командировку в Англию. Здесь он работал в Кавендишской лаборатории Кембриджского университета. Директором этой лаборатории был Э. Резерфорд; с которым Петра Леонидовича связала большая дружба. С 1924 по 1932 г. Петр Леонидович был заместителем Резерфорда по Кавендишской лаборатории. В те годы лаборатория Резерфорда была крупнейшим в мире центром по изучению атомного ядра. Здесь были разработаны основные методы исследования процессов радиоактивного излучения.

Исследование явлений, протекающих в сильных магнитных полях, составили важный этап в научной деятельности П. Л. Капицы. В них проявился характерный для Петра Леони-

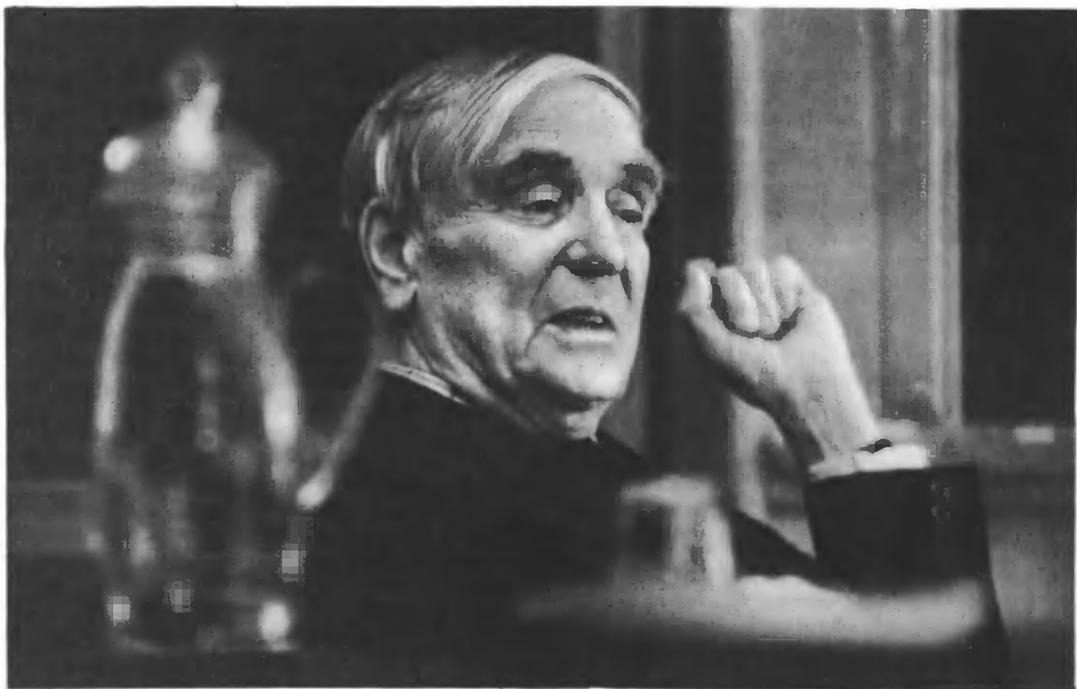
довича революционный подход к каждой проблеме, за которую он брался. Вместо того чтобы идти проторенным путем, увеличивая размеры широко применявшихся лабораторных электромагнитов с железными сердечниками, он выдвинул идею использовать катушки без сердечников и пропускать через них колоссальные токи в десятки тысяч ампер. Чтобы при пропускании такого тока катушка не расплавилась от нагрева, Петр Леонидович предложил пропускать ток в течение очень короткого времени и проводить исследования в импульсных магнитных полях, так как для изучения очень многих явлений достаточно времени, меньшее чем 1 мс. В процессе создания установки для получения импульсных магнитных полей Петр Леонидович разработал оригинальные решения целого ряда возникших при этом технических задач: создание накопителя, который в течение 0,01 с давал мощность около 200 МВт; размыкание электрической цепи, по которой течет ток в тысячи ампер; создание механически прочных катушек. Была также разработана аппаратура для физических исследований в импульсных полях.

В процессе экспериментов с сильными магнитными полями Петром Леонидовичем был в 1928 г. открыт закон линейного по величине магнитного поля возрастания электропроводности металлов. Это

экспериментальное открытие на 30 лет опередило развитие теоретических представлений о характере движения электронов в металлах, представлений, с помощью которых такая неожиданная аномалия была объяснена. Исследования свойств металлов в сильных магнитных полях логически привели П. Л. Капицу к необходимости перенести эти исследования в область возможно более низких температур.

Такие температуры в те годы получали с помощью жидкого гелия. Для этого использовались ожижители гелия, работающие на основе эффекта Джоуля — Томсона — охлаждения газа при его дросселировании, т. е. при пропускании газа через вентиль с поддержанием на нем большого перепада давления. Как известно, эффект Джоуля — Томсона связан с неидеальностью газа и приводит к его охлаждению только в том случае, когда его температура ниже так называемой температуры инверсии. Для гелия эта температура составляет около 50 К. Поэтому в ожижителях гелия, работающих на основе эффекта Джоуля — Томсона, необходимо иметь предварительную ступень охлаждения гелия жидким водородом.

П. Л. Капица создал установку для ожижения гелия, в которой охлаждение газа происходило благодаря совершенной внешней работы при его адиабатическом расширении в специальном детанде-



Петр Леонидович Капица.
Фото В. Генде-Роте.

ре — поршневой машине. Это во много раз более эффективный, термодинамически наиболее выгодный метод; он не требует предварительного охлаждения газа жидким водородом. Однако для его реализации необходимо было решить, казалось бы, неразрешимую задачу — найти материал для смазки, работающий при столь низких температурах. Петр Леонидович использовал с этой целью сам газообразный гелий, оставив зазор в 35 мкм между стенкой поршня и цилиндром. Чтобы поршень при этом не заклинивался, на нем было сделано несколько кольцевых канавок, по которым выравнивалось давление газа на стенку цилиндра. Первый такой ожигитель был построен П. Л. Капицей в 1934 г.; сейчас по этому прин-

ципу строятся практически все ожигители, и их выпускает целый ряд промышленных фирм в разных странах по несколько сот машин в год. Эти крупные успехи П. Л. Капицы побудили Лондонское королевское общество организовать в 1930 г. специальную лабораторию им. Монда для работы в области низких температур и сильных магнитных полей, директором которой был назначен Петр Леонидович.

Другое изобретение Петра Леонидовича в области ожигителей было сделано после того, как в 1934 г. он вернулся из Англии в Москву. Здесь он организовал Институт физических проблем, который был оснащен полученным из Англии оборудованием, включая и построенные Петром Леонидовичем установки для создания сильных магнитных полей и ожигения гелия. В новом институте Петр Леонидович обращается к проблеме создания машины для ожигения воздуха с использованием только цикла низкого давления. В этом случае оказалось возможным использовать турбомашину (турбокомпрессор и турбо-

детандер), что было характерно для многих областей техники, где переход к большим мощностям сопровождался заменой поршневых установок турбинными. Этот принцип П. Л. Капица применил и в установках для ожигения воздуха с целью промышленного получения кислорода. В результате проведенных им исследований был найден оптимальный тип турбины для работы с холодным газом сравнительно большой плотности. Разработанный П. Л. Капицей высокоэффективный радиальный турбодетандер с КПД 80—85% предопределил развитие во всем мире современных крупных установок разделения воздуха для получения кислорода. Можно отметить, что использование турбодетандера в установках по получению газообразного кислорода из воздуха дало нашей стране экономию в сотни миллионов рублей. Таковы два важных изобретения в области низких температур, о которых говорится в решении Нобелевского комитета.

Фундаментальные открытия Петра Леонидовича в области низких температур

были сделаны в процессе изучения им аномальных свойств жидкого гелия. Эти исследования проводились в Институте физических проблем в конце 30-х гг. Тогда П. Л. Капица поставил целый ряд необычайно изящных и тонких экспериментов. Один из них описан в его статье 1938 г., которая воспроизводится в этом номере журнала; о других можно прочесть в книге П. Л. Капицы «Эксперимент, теория, практика»¹, написанной ясно, увлекательно и живо.

Первый этап этих исследований завершился открытием в 1937 г. сверхтекучести жидкого гелия при температурах ниже 2,19 К. Петр Леонидович назвал жидкий гелий сверхтекучим потому, что, как он показал, его вязкость при протекании через тонкие капилляры и щели оказывается настолько меньше вязкости самой маловязкой жидкости, что ее нужно считать равной нулю. Следующий важный шаг в изучении аномальных свойств жидкого гелия был сделан в опытах по изучению распространения потока тепла от нагревателя, помещенного в замкнутый объем гелия. Здесь Петр Леонидович показал, что в гелии происходят одновременно два макроскопических движения с разными свойствами; одно движение оказывает воздействие на тело, помещенное в потоке, а другое не оказывает.

Экспериментальные результаты, полученные Петром Леонидовичем, не могли быть объяснены в рамках существовавших тогда представлений. Они послужили основой для развития совершенно нового направления в физике — физики квантовых жидкостей. Квантовомеханическая теория сверхтекучести была построена Л. Д. Ландау, работавшим в тесном содружестве с Петром Леонидовичем. Теория полностью объяснила его эксперименты и подтвердила справед-

ливость сделанного им предположения о существовании двух частей (компонент) жидкого гелия с различными свойствами. При этом из квантовой механики следовало еще более неожиданный вывод, чем это мог предположить П. Л. Капица. Он считал, что два движения гелия разделены в пространстве. Оказалось, что нормальная и аномальная компоненты как бы перемешаны друг с другом и их встречное движение происходит во всей массе жидкости. Таким образом, эксперименты П. Л. Капицы на многие годы определили развитие экспериментальной и теоретической физики низких температур.

В процессе проведения своих экспериментов Петр Леонидович обнаружил следующий важный факт: при передаче тепла от твердого тела к жидкому гелию на границе их раздела возникает скачок температуры, получивший название скачка Капицы. Величина скачка резко растет с понижением температуры. Это явление играет важнейшую роль при получении температур порядка 10^{-3} К и ниже.

Открытие П. Л. Капицей явления сверхтекучести пролило свет и на оставшееся в то время необъясненным явление сверхпроводимости. Сверхпроводимость стали трактовать как сверхтекучесть электронного газа, что оказало плодотворное влияние на развитие теории этого явления.

Заклячая краткий обзор работ Петра Леонидовича по физике жидкого гелия, на этом примере хочется подчеркнуть особенности «стиля» Капицы в науке. Прежде всего Петр Леонидович неизменно подчеркивает первостепенную важность эксперимента. Эксперимент нужно стремиться поставить так, чтобы он привел к обнаружению новых фактов, на основании которых можно сделать утверждения, не зависящие от существующих теоретических представлений. Особенно ценной является такая работа, результаты которой противоречат существующим представлениям. Экспериментальную работу, которая только подтверждает суще-

ствующие предсказания теории, Петр Леонидович часто в шутку называет «закрытием». Залог успешного эксперимента — это создание оригинальной аппаратуры, которая позволяет наблюдать исследуемое явление в новых условиях.

В конце 40-х гг. П. Л. Капица обращается к совершенно новому кругу физических задач — к вопросу о создании мощных генераторов СВЧ-колебаний непрерывного действия. Решив сложную математическую задачу о движении электрона в СВЧ-генераторах магнетронного типа, Петр Леонидович конструирует СВЧ-генераторы нового типа — планетрон и ниготрон. Построенный им в 1966—1967 гг. ниготрон имел рекордную мощность — 175 кВт в непрерывном режиме. Создание таких мощных генераторов позволило П. Л. Капице выдвинуть идею о передаче электроэнергии больших мощностей на значительные расстояния с помощью радиоволн. Несомненно, этот вопрос будет со временем поставлен на повестку дня большой энергетики.

Используя созданные им генераторы больших мощностей, Петр Леонидович построил установку, состоящую из генератора и присоединенного к нему резонатора СВЧ-колебаний. Наполняя резонатор различными газами (гелием, водородом, дейтерием) под давлением в несколько атмосфер, он обнаружил, что в центре камеры, где электрическое поле СВЧ-колебаний максимально, в газе возникает шнуровой разряд. В настоящее время Петр Леонидович увлеченно работает над изучением этого разряда. Применяя различные методы диагностики плазмы, он показал, что температура электронов в этом плазменном шнуре очень велика (больше 1 млн град.). Эти работы П. Л. Капицы открыли новый подход к решению задачи о создании термоядерного реактора.

Оценивая инженерные достижения Петра Леонидовича, хочется обратить внимание читателя на то, что такие его изобретения, как генераторы импульсных магнитных

¹ Капица П. Л. Эксперимент, теория, практика. М., 1977.

полей, детандерный ожижитель гелия, турбодетандерная установка для получения кислорода, не только не устарели за прошедшие 40—50 лет, но наоборот, с каждым годом все шире используются в науке и промышленности. Такое не часто встречается в наш век бурного развития техники.

Говоря о Петре Леонидовиче, нельзя ограничиться только его научными и инженерными заслугами. П. Л. Капица — выдающийся организатор науки. Он создал превосходный физический институт — Институт физических проблем и руководит им; он является членом Президиума Академии наук СССР; руководит ведущим советским журналом по физике («Журнал экспериментальной и теоретической физики»). Петр Леонидович уделяет много внимания поискам наиболее прогрессивных методов организации такого тонкого и слож-

ного процесса, каким является научное творчество. В тесной связи с этим вопросом стоит вопрос о воспитании и отборе творческой молодежи для научной работы, которому П. Л. Капица уделяет много внимания. Он был одним из инициаторов создания Московского физико-технического института (МФТИ) и является председателем координационного совета этого института. Несмотря на свою занятость, Петр Леонидович всегда сам проводит заседания государственной экзаменационной комиссии по защите дипломов студентами МФТИ, выполнивших свою дипломную работу в Институте физических проблем. Он также всегда сам принимает вступительные экзамены в аспирантуру и к каждому экзамену составляет набор задач для экзаменующихся. П. Л. Капица — крупный общественный деятель. Его волнуют все аспекты развития че-

ловеческого общества. Он неоднократно выступал на многих международных форумах по таким жгучим вопросам развития человеческого общества, как энергетический кризис, проблема загрязнения окружающей среды, проблема разоружения.

Несмотря на большое количество обязанностей, Петр Леонидович проводит много времени в своей лаборатории, где он работает над изучением проблемы получения горячей плазмы. Присуждение ему Нобелевской премии — справедливое признание заслуг этого выдающегося человека. Все его друзья, коллеги, учение и люди самых разных специальностей сердечно поздравляют лауреата с заслуженной наградой и желают ему всего наилучшего.

Академик
А. С. Боровик-Романов

Москва

Вязкость жидкого гелия при температурах ниже точки λ

П. Л. Капица

Жидкий гелий при понижении давления, достигая температуры 2,19 К, переходит в другую модификацию, называемую гелий II; она имеет ряд интересных свойств. Одно из самых замечательных было недавно открыто Кеезомом¹.

Оно заключается в том, что теплопроводность ее в три миллиона раз превышает теплопроводность обычной модификации, называемой гелий I. Другие работы по изучению этой теплопроводности, произведенные Алленом, Пейрлсом и Уддином², показали, что она отличается от обычной

еще и тем, что зависит, например, от градиента температуры.

Для объяснения этих аномальных явлений мне казалось, что возможно сделать предположение, что эта теплопроводность не есть истинная, а происходит благодаря конвекционным потокам. Но для возникновения и существования этих конвекционных потоков необходимо, чтобы гелий II обладал исключительно малой вязкостью. До сих пор известны только одни из-

Статья ранее опубликована в «Докладах Академии наук СССР», 1938, т. XVIII, № 1, с. 21.

¹ «Physica», 1936, v. 3, p. 359.

² «Nature», 1937, v. 140, p. 62.

мерения вязкости гелия, произведенные в Торонто³. При этих измерениях было найдено, что при переходе из модификации I в модификацию II происходит только незначительное уменьшение вязкости гелия. Так, вязкость ниже точки λ в 3 раза меньше, чем вязкость гелия при нормальном давлении (4,22 К) и в 8 раз меньше вязкости перед λ -точкой перехода (2,40 К). К сожалению, в этих измерениях не было выяснено, являлось ли движение ламинарным или турбулентным. Это важно знать, так как жидкий гелий является жидкостью с удельным весом $\rho = 0,15$, незначительно отличающимся от удельного веса обычной жидкости, в то время как его вязкость μ того же порядка, как и у газов. Этот факт делает кинематическую вязкость $\nu = \mu/\rho$ исключительно малой сравнительно со всеми известными жидкостями. Вследствие этого, если вязкость гелия изучается в обычных вискозиметрах, надо особенно внимательно следить, чтобы рейнولدсовское число не достигало больших значений, чтобы сохранить движение жидкости ламинарным. В особенности при том методе, который был

выбран работниками в Торонто — наблюдением за погашением колебаний жидкости в аксиально-осциллирующем цилиндре, — рейнولدсовское число должно иметь исключительно малое значение, так как в такого рода движениях особенно легко возникает турбулентное состояние. Подсчитывая условия эксперимента в Торонто, можно показать, что эти условия совсем не были выполнены, и можно с уверенностью сказать, что результаты их относятся к вихревому движению, вследствие чего полученные величины для вязкости жидкого гелия не соответствуют истинным и могут быть во сколько угодно раз больше⁴.

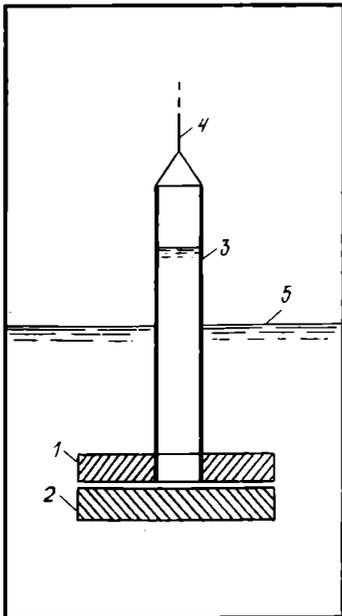


Схема прибора. 1, 2 — стеклянные диски; 3 — трубка; 4 — нить для подвеса; 5 — жидкий гелий.

Измерения вязкости жидкого гелия — трудная задача ввиду необходимости создания такого метода, в котором можно было бы сохранять ламинарное движение даже при его малой кинематической вязкости.

Мы разработали следующий метод, при котором можно мерить вязкость жидкостей

от 4,22 К до λ -точки (2,19 К) она не зависит от температуры в пределах 5% и величина ее приблизительно равна $11 \cdot 10^{-6}$. Это дает экспериментальное подтверждение тому, что вязкость, полученная в Торонто, даже для гелия I гораздо выше действительной. Температурная же зависимость ее, наблюдаемая в Торонто, по-видимому, объясняется увеличением плотности гелия по мере понижения температуры к точке λ ; увеличение плотности увеличивает турбулентность, производя кажущееся увеличение вязкости.

с гораздо меньшей кинематической вязкостью, чем обычно. Схематически прибор показан на рисунке.

Вязкость измерялась по разности давлений жидкостей, текущих в очень узком щелевом зазоре, образуемом между двумя дисками — 1 и 2. Эти диски были сделаны из оптического отшлифованного стекла, и расстояние между ними могло устанавливаться посредством прокладок из слюды. Внешний диаметр дисков был 3 см, и отверстие в верхнем диске было 1,5 см. Над этим отверстием ставилась трубка 3. Посредством ниточки 4 весь этот прибор мог опускаться и подниматься в жидком гелии, и уровень жидкости в трубке 3 мог быть установлен выше или ниже уровня жидкости 5 в окружающем дьюаре. Количество протекаемой жидкости и давление столба измерялись катетометром.

Измерения дали с самого начала интересные результаты. Например, в случае, когда диски 1 и 2 были прижаты друг к другу без слюдяных прокладок, — по интерференционным полосам можно было видеть, что образовавшаяся щель была порядка 0,5 мкм, — тогда гелий I протекал еще еле заметно: на протяжении нескольких минут наблюдения высота столбика в трубке 3 менялась лишь на долю миллиметра. В случае же гелия II наблюдалось сильное протекание, и уровень выравнивался в течение нескольких секунд.

Из числовых данных измерений можно было заключить, что вязкость гелия модификации II, по крайней мере в 1500 раз меньше, чем гелия модификации I при 4,22 К. Экспериментальные данные также показывают, что в случае гелия II разность давления на края щели пропорциональна квадрату скорости течения гелия через щель, что показывает, что и в нашем случае движение потока гелия в щели было еще турбулентным. Но если мы все-таки вычислим вязкость, считая движение ламинарным, мы получим ее порядка 10^{-9} в абсолютных единицах, что, очевидно, превышает собой

³ Burton.— «Nature», 1935, v. 135, p. 265; Wilhelm, Misener and Clark.— «Proc. Roy. Soc. A.», 1935, v. 151, p. 342.

⁴ Пример вязкости гелия I показал, что в пределах



П. Л. Капица (справа) и лаборант С. И. Филимонов⁵ проводят измерение вязкости жидкого гелия в лаборатории Института физических проблем [1937 г.].

Фото из архива Института физических проблем.

верхний предел возможной вязкости, в то время как истинная вязкость может быть во сколько угодно раз меньше. Из этих данных мы можем установить также нижний предел для рейнольдсовского числа, которое получается равным 50 000. Это показывает, что турбулентное движение

еще свободно могло происходить и в нашем тонком зазоре.

Мы теперь разрабатываем метод, при котором надеемся иметь возможность установить еще более низкий предел для вязкости гелия II, но уже и те результаты, которые нами получены, кажутся достаточно значительными, так как жидкий гелий II, имея вязкость 10^{-9} , уже обладает вязкостью, по крайней мере, в 10 000 раз меньшей, чем водород в газообразном состоянии при самой низкой температуре, при которой вязкость его имеет наименьшее значение. Как известно, вязкость газообразного водорода считалась наименьшей измеренной вязкостью, известной для какой-либо текучей среды. Мне кажется, что этого предела уже достаточно, чтобы по сравнению с явлением сверхпроводимости считать, что жидкий гелий ниже точки λ принимает особую модификацию, которую ввиду ее исключительно малой вязкости можно было бы назвать «сверхтекучей».

Как мы уже указывали, такой исключительной текучестью гелия II, по-видимому, поддерживается то объяснение ненормальной теплопроводности жидкого гелия II и тех аномалий, о которых говорилось в начале заметки. Очевидно, что турбулентное движение гелия II, которое может в нем возникнуть благодаря всем техническим манипуляциям, которые с ним производят во время опыта, ввиду его большой текучести не будет гаситься даже в капиллярных трубках, которые употребляются для измерения теплопроводности. Такое вихревое движение, конечно, будет гораздо более действенно производить теплопередачу. При этой большой текучести гелия II будут также легко возникать конвекционные потоки; величина их будет зависеть от разности температур, при которой измеряется теплопроводность. Таким образом можно будет объяснить зависимость теплопроводности гелия от температурного градиента, наблюдаемую Алленом, Пейрлсом и Уддином.

⁵ В настоящее время доктор технических наук С. И. Филимонов по-прежнему является одним из ближайших помощников П. Л. Капицы и его заместителем по Физической лаборатории АН СССР.

Рождение физики квантовых жидкостей

Без всякого преувеличения можно сказать, что именно воспроизведенная здесь статья Петра Леонидовича Капицы положила начало новой области науки — физике квантовых жидкостей. Эта область пережила за истекшие десятилетия бурное развитие и продолжает развиваться. Несомненно, что это развитие оказало революционизирующее влияние и на другие области физики — физику твердого тела и даже на физику ядра.

Напомним основные факты, предшествовавшие открытию П. Л. Капицы и составляющие тот фон, на котором можно понять роль его работы.

Жидкий гелий — единственное вещество, которое может оставаться жидким при охлаждении вплоть до абсолютного нуля: все другие вещества в конце концов затвердевают. Между тем, согласно «классическим» представлениям, при абсолютном нуле все атомы вещества должны были бы остановиться, т. е. занять определенные положения внутри тела (это и означает, что тело было бы твердым).

Уже это обстоятельство — первое свидетельство того, что свойства жидкого гелия могут быть поняты только на основе совершенно иных представлений, а именно представлений квантовой механики. Хорошо известно, что этой механике подчиняются явления микромира — мира атомов и молекул. В данном же случае мы имеем дело не с отдельными микроскопиче-

скими частицами, а с макроскопическим телом, состоящим из огромного числа атомов. В известном смысле можно сказать, что в таких телах при обычных температурах квантовые свойства как бы заслоняются хаотическим тепловым движением частиц. Лишь при самых низких температурах, когда интенсивность этого движения становится слабой, проявляются глубокие квантовые свойства вещества. Все вещества, за исключением только гелия, затвердевают прежде, чем их квантовые свойства успевают в достаточной мере выявиться. Один лишь гелий может стать «квантовым» до своего затвердевания, а после этого он уже вообще не обязан затвердевать, так как в квантовой механике несправедливо утверждение о полной остановке движения атомов при абсолютном нуле температуры. Таким образом, жидкий гелий является уникальным объектом, который природа предоставила в распоряжение физиков для изучения «квантовой жидкости».

Гелий (при атмосферном давлении) переходит в жидкое состояние при абсолютной температуре 4,2 К. При температуре же 2,2 К гелий, оставаясь жидким, претерпевает еще одно превращение. Оно было первоначально открыто Г. Каммерлинг-Оннесом в 1926 г. по скачкообразному изменению теплоемкости этой жидкости. Жидкий гелий при температурах выше точки превращения получил название гелий I, а ниже — гелий II. Именно последний

и оказался жидкостью, совершенно исключительной по своим свойствам.

Первое указание на эти свойства было получено в 1936 г. в Лейдене В. Кеезомом и мисс Кеезом в работе, упомянутой в начале статьи П. Л. Капицы. Они обнаружили, что разность температур между концами заполненного гелием капилляра выравнивается чрезвычайно быстро, так что гелий II оказывается как бы наилучшим из известных нам проводников тепла.

Но решающий шаг в раскрытии свойств жидкого гелия был сделан в 1937 г. П. Л. Капицей в воспроизведенной здесь статье. Его эксперимент имел целью измерение вязкости жидкого гелия. Он описан в статье с простотой и ясностью, не требующими комментариев. Но хочется в особенности отметить исключительную идейную простоту этого эксперимента, ведущего к цели наиболее прямым путем. Не подтверждается ли здесь общее, по-видимому, правило — внутренняя простота великих шагов на пути познания нового?

В этой статье впервые появляется слово «сверхтекучесть», и здесь же впервые высказывается предположение, что большая теплопроводность жидкого гелия представляет собой в действительности не первичное его свойство, а является следствием сверхтекучести, приводящей к легкому возникновению конвективных потоков.

В последующие несколько лет П. Л. Капица провел обширное экспери-

ментальное исследование механизма теплопередачи в жидком гелии с позиций его сверхтекучести. Эти исследования привели к установлению основных свойств данного явления и дали надежное основание для построения теории сверхтекучести.

Упомянем здесь лишь один из наиболее наглядных опытов. Было обнаружено, что если перед отверстием сосуда, наполненного жидким гелием (и погруженного в жидкий гелий), подвесить легкое крылышко, то при нагревании гелия в сосуде крылышко отклоняется. Тем самым непосредственно доказывается связь процесса теплопередачи в гелии с возникновением движения в нем. Но это движение имеет весьма парадоксальный характер: из отверстия вырывается струя жидкости, отклоняющая крылышко, и в то же время количество жидкости в сосуде не меняется, он остается полным. Таким образом, необходимо было предположить, что одновременно с вытекающей струей имеет место также и какой-то «противопоток» жидкости. Другими словами, здесь было впервые получено экспериментальное указание на два одновременно происходящие в жидкости движения. Это свойство, не укладывающееся в «классические» представления, послужило, как мы знаем теперь, основой для понимания явлений в сверхтекучей жидкости.

Уже сказано, что эксперименты Капицы явились фундаментом для построения теории сверхтекучести. Это было сделано в 1940—1941 гг. Львом Давидовичем Ландау, работавшим в тесном контакте с П. Л. Капицей.

Изложение теории Ландау не входит в задачу этих кратких комментариев к статье Капицы. Отметим лишь, что теория сверхтекучести была создана с самого начала с замечательной полнотой: уже в первой статье Ландау содержатся почти все основные идеи как микроскопической теории жидкого гелия, так и построенной на ее основе макроскопической теории —

термодинамики и гидродинамики этой жидкости. Несомненно, что такой успех был в значительной степени обязан тесной связью между параллельно протекающими работами замечательного экспериментатора и замечательного теоретика. Две статьи Капицы с изложением его экспериментальных исследований и статья с изложением теории Ландау были опубликованы в одном и том же XI томе «Журнала экспериментальной и теоретической физики» в 1941 г. и, без сомнения, должны быть причислены к классическим произведениям физики.

Комментируя воспроизведенную здесь статью Капицы, упомянем лишь об одном из результатов теории. В статье говорится о противоречии между результатами автора и результатами экспериментов в Торонто, давших для вязкости гелия II хотя и малое, но вполне конечное значение. Мы знаем теперь, что это различие не было в действительности результатом ошибки и было связано лишь с различием в примененных методах измерения. Согласно теории, явления в жидком гелии II можно наглядно описывать так, как если бы эта жидкость представляла собой смесь двух «компонент», которые могут двигаться независимо, «одна свозь другую». По свойствам этих двух движений компоненты принято называть сверхтекучей и нормальной; движение нормальной компоненты аналогично движению обычных жидкостей. При вращении погруженного в жидкость цилиндра он испытывает трение о ее «нормальную» часть, и, таким образом, в опытах в Торонто измерялась, по существу, вязкость именно этой компоненты. В опытах же Капицы с узкой щелью между двумя дисками через щель протекает сверхтекучая часть гелия, между тем как обладающая вязкостью нормальная компонента задерживается щелью, «просачиваясь» через нее весьма медленно; таким образом в этом опыте обнаруживается отсутствие

вязкости у сверхтекучей компоненты.

Наконец, вернемся еще раз к началу этих комментариев. Значительный шаг в познании природы, в построении физической теории почти всегда становится возможным лишь после достижения определенного уровня наших опытных сведений о природе. Фантазия природы значительно превосходит даже гениальное воображение человека. В этом смысле неслучайно, что теория квантовой жидкости возникла и начала быстро развиваться лишь после экспериментального открытия сверхтекучести жидкого гелия. Явление сверхпроводимости металлов было открыто задолго до сверхтекучести. Мы знаем теперь, что сверхпроводимость — это сверхтекучесть квантовой «электронной жидкости» в металле. Но сверхпроводимость оставалась необъясненной вплоть до 1957 г. Для ее объяснения потребовались как общие представления теории Ландау, так и новая идея — о «спаривании» электронов, в результате которого электронная жидкость приобретает свойства, до некоторой степени аналогичные свойствам жидкого гелия. В этом смысле можно сказать, что в жидком гелии свойство сверхтекучести выявлено в более чистом виде, чем в явлении сверхпроводимости. Не приходится удивляться поэтому, что решительный сдвиг в нашем понимании квантовых свойств макроскопических тел возник лишь после открытия и объяснения сверхтекучести жидкого гелия.

Член-корреспондент АН СССР
Е. М. Лифшиц
 Москва

По физике — А. Пензиас и Р. Вильсон

В третий раз за последние десять лет Нобелевская премия по физике присуждена за работы в области современной астрофизики: в 1967 г. Нобелевскую премию получил Г. Бете, впервые рассмотревший ядерные реакции синтеза гелия в звездах, а в 1974 г. — М. Райл и Э. Хьюиш — за разработку и реализацию новых методов радиоастрономических исследований, которые позволили изучить внегалактические радиоисточники и открыть радиопульсары¹. Нобелевская премия 1978 г. присуждена видным американским радиоастрономам — Арно Пензиасу и Роберту Вильсону. С их именами связано крупнейшее достижение в области современной космологии — наблюдательное обнаружение реликтового фонового излучения, заполняющего нашу Вселенную.

Арно Пензиас (Arno Penzias) родился 26 апреля 1933 г. в Мюнхене. В 1958 г. закончил Колумбийский университет в США; степень доктора философии получил в 1962 г. С 1961 г. работает в фирме «Белл Телефон Лабораториз» («Bell Telephone Laboratories»), Холмдел, штат Нью-Джерси; с 1972 г. по настоящее время возглавляет там отдел радиотехнических исследований.

Роберт Вильсон (Robert Wilson) родился 10 января 1936 г. в Хьюстоне (штат Техас). Получил степень доктора философии в 1962 г. в Калифорнийском технологическом институте. С 1963 г. по настоящее время — сотрудник «Белл Телефон Лабораториз».

В чем суть их открытия,



Арно Пензиас (слева) и Роберт Вильсон.

Телефото ЮПИ-ТАСС.

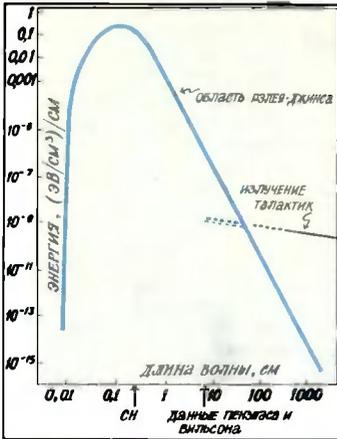
что дало оно астрономам, всей космологии? В 1964 г. Пензиас и Вильсон обнаружили излучение с температурой около 3 К, которое, как показали последующие исследования, имеет спектр абсолютно черного тела и характеризуется высокой степенью изотропии — его температура практически не зависит от направления наблюдения. Это излучение заведомо не рождается в нашей Галактике. Оно заполняет всю Вселенную; в каждом кубическом сантиметре ее объема находится 400 фотонов, это в 10^8 — 10^9 раз больше, чем средняя плотность атомов (если считать, что все вещество Вселенной распределено равномерно). Велика и средняя плотность энергии реликтового излучения — $0,25$ эВ/см³, что в сотни раз превышает среднюю по Вселенной плотность энергии оптического излучения, которое представляет собой суммарное излучение звезд. Ана-

лиз возможных источников реликтового излучения показал, что ни звезды, ни межзвездная пыль, ни радиоисточники не могут сформировать наблюдаемый спектр излучения.

Объяснить его происхождение можно лишь в рамках горячей модели Вселенной, предложенной и разработанной в конце 40-х гг. известным физиком-теоретиком Г. Гамовым с сотрудниками. Согласно этой модели, расширяющаяся Вселенная на ранних стадиях эволюции была горячей; вещество и находившееся в термодинамическом равновесии с ним излучение были нагреты до столь высоких температур, что шли ядерные реакции синтеза гелия. А до этого, при еще более высоких температурах в равновесии с излучением находились электрон-позитронные пары, протоны и антипротоны, различные мезоны.

Первый миллион лет от начала расширения Вселенная была радиационно-доминированной, и именно излучение определяло ход расширения Вселенной. Впо-

¹ «Природа», 1975, № 1 с. 111.



Спектр реликтового микроволнового излучения. По оси ординат — энергия в единице объема, приходящаяся на данный интервал длин волн; по оси абсцисс — длина волны.

Следствием расширения Вселенной привело к адиабатическому охлаждению вещества и излучения. Вещество сконцентрировалось в галактики, звезды, планеты, а на память об удивительном этапе в жизни Вселенной нам остались чернотельное микроволновое излучение (названное, с легкой руки И. С. Шкловского, реликтовым), повсеместное 30% (по весу) обилие гелия и незначительное количество дейтерия, синтезированное в ходе ядерных реакций в период между первой секундой и десятой минутой от начала расширения. Недавно первичный дейтерий в межзвездной среде был обнаружен при наблюдениях с помощью ультрафиолетового телескопа, установленного на орбитальной астрономической обсерватории «Коперник». Любопытно, что Гамов в 1956 г. оценивал температуру реликтового излучения в 6 К; благодаря открытию Пензиаса и Вильсона, мы теперь знаем, что она близка к 3 К.

Открытие реликтового излучения не только подтвердило горячую модель, но и дало в руки астрономов мощный инструмент исследования Вселенной. Реликтовое излучение выделяет в каждой точке пространства именно

ту систему координат, относительно которой все направления в расширяющейся Вселенной равноценны. Наблюдая распределение интенсивности этого излучения по небу, астрофизики измерили скорость движения Земли относительно системы координат, в которой реликтовое излучение изотропно. Эта скорость близка к 400 км/с. В направлении движения из-за эффекта Доплера температура излучения на тысячные доли градуса выше, чем в других направлениях.

Наблюдая угловое распределение реликтового излучения в малых масштабах (градусы, минуты), мы узнали, что расширение Вселенной изотропно с точностью до сотых долей процента. В дальнейшем, по мере увеличения точности измерений можно надеяться на получение информации о времени возникновения галактик и природе малых первичных возмущений плотности, которые привели к образованию наблюдаемых сейчас объектов; можно исследовать распределение горячего межгалактического газа в скоплениях галактик.

Реликтовое излучение ограничивает сверху спектр протонов космических лучей сверхвысоких энергий (Г. Т. Зацепин, В. А. Кузьмин, Физический институт им. П. Н. Лебедева АН СССР, 1966). Оно определяет время жизни релятивистских электронов в межгалактическом и межзвездном пространстве: при рассеянии реликтовых фотонов на релятивистских электронах генерируются рентгеновские лучи. Не только космология, но и астрофизика высоких энергий немалым образом зависит от реликтового излучения.

Вернемся к истории открытия. В конце 50-х — начале 60-х гг. усилился интерес к космологии. В Принстоне (США), Кембридже (Англия) и Москве ряд теоретических групп исследовали поведение Вселенной на ранних стадиях ее расширения, проводились расчеты ядерных реакций в рамках горячей модели, рассматривалась ее альтернатива — холодная модель. В 1964 г. А. Г. Дорошкевич

и И. Д. Новиков (Институт прикладной математики АН СССР) в Москве, Дж. Пиблс в Принстоне отметили, что наблюдения фонового излучения в сантиметровом диапазоне длин волн позволят сделать выбор между этими двумя моделями.

В 1964 г. фирмой «Белл Телефон Лабораториз» была построена 20-футовая рупорная антенна, предназначавшаяся для связи с американским спутником «Эхо». Антенна имела рекордную для тех лет чувствительность, и Пензиас и Вильсон решили провести на ней измерения потока радиоизлучения от плоскости нашей Галактики в дециметровом диапазоне волн. Так как в сантиметровом диапазоне излучение Галактики должно быть очень слабым, то для оценки собственного шума антенны были проведены наблюдения неба на длине волны 7,35 см. Температура неба за вычетом зависящего от угла к зениту вклада атмосферы оказалась равной $3,5 \pm 1$ К и не связанной с Галактикой. Долгий анализ и проверки показали, что это — температура фонового излучения Вселенной, а не собственный шум антенны и радиометров.

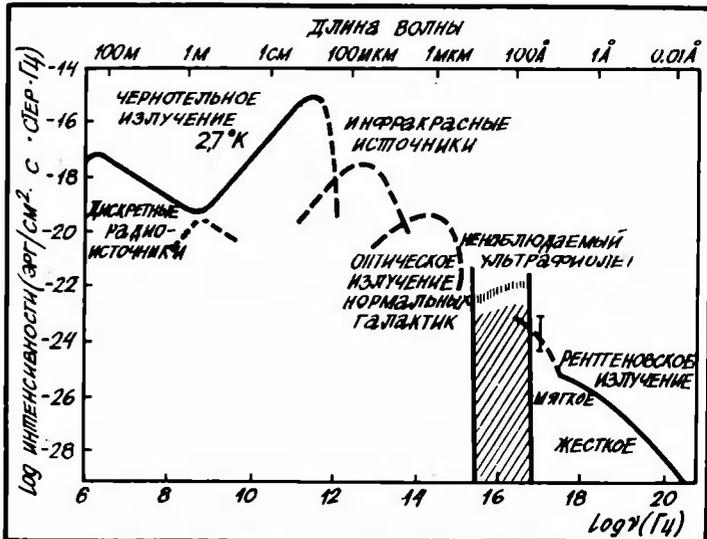
К такому ответственному решению могли прийти лишь опытные экспериментаторы, ведь проще всего было объяснить наблюдаемый эффект собственными шумами антенны. Требовалось тщательное проведение расчетов и наблюдений; нужно было с большой точностью определить вклад всех известных источников шума. На последнем этапе рупором антенны поверхность, охлажденную до гелиевой температуры (~ 4 К), и сравнили создаваемое этой поверхностью излучение с излучением неба. Был и комический момент, когда в рупоре антенны обнаружили голубиный помет — «белое диэлектрическое вещество», по выражению Пензиаса. Возникло опасение, не это ли вещество создает весь эффект, но после тщательной очистки рупора приборы продолжали регистриро-

вать космическое радиоизлучение.

После того как Пензиас и Вильсон убедились в реальности сигнала, встал вопрос — какова его природа? Вскоре друзья и коллеги сообщили им о докладе, сделанном в Нью-Йорке молодым теоретиком Дж. Пиблсом, рассказывавшем о горячей модели Вселенной и ее важнейшем предсказании — реликтовом излучении с температурой порядка 10 К, о планах поиска этого излучения группой Р. Дикке в Принстоне. В результате в «Astrophysical Journal» одновременно появились две заметки — об обнаружении реликтового излучения (данные Пензиаса и Вильсона) и об интерпретации этого открытия². Вторая статья была написана группой Дикке, которая затем провела ряд важнейших экспериментов по исследованию спектра и изотропии излучения. В настоящее время этот спектр изучен в широком диапазоне длин волн — от миллиметров до дециметров.

Открытие Пензиаса и Вильсона представляет собой крупнейший вклад в современную космологию, по своему значению сравнимый лишь с обнаружением расширения

² «Astroph. J.», 1965, v. 142, p. 414; p. 419.



Спектр фонового излучения Вселенной во всем диапазоне длин волн. Сплошные линии — результаты наблюдений, штриховка — теоретические оценки.

Вселенной. Это открытие вызвало поток экспериментальных и теоретических работ в области космологии и астрофизики высоких энергий. Детали горячей модели, ее следствия, многие аспекты теории образования галактик, вопросы влияния реликтового излучения на космические лучи и межзвездный газ были разработа-

ны в течение всего лишь нескольких лет. Были получены также ограничения на массу и число таких элементарных частиц, как нейтрино. Исследования продолжают; от дальнейших наблюдений и теоретических работ в этой области мы ждем новых данных о свойствах Вселенной.

Академик Я. Б. Зельдович,

Р. А. Сюняев,
доктор физико-математических наук
Москва

По химии — П. Митчелл

Из Стокгольма пришло известие: Питеру Митчеллу (Великобритания) присуждена Нобелевская премия по химии за исследование биоэнергетических процессов в клетке. Новый лауреат комментировал это событие весьма лаконично: «Я крайне удивлен!»

Питер Митчелл (Peter Mitchell) родился 29 сентября

1920 г. в Митчеме (графство Суррей). Закончил Кембриджский университет. В 1950 г. получил степень доктора философии. После этого проработал 5 лет в Кембриджском университете. С 1955 по 1963 гг. возглавлял биохимическую группу кафедры зоологии Эдинбургского университета,

где также вел преподавательскую работу. С 1964 г. руководит Глинновскими исследовательскими лабораториями в Корнуэлле.

В 1961 г. Митчелл, в то время сотрудник кафедры зоологии Эдинбургского университета в Шотландии, опубликовал в «Nature» статью (четы-

ре странички текста)!, где впервые изложил свою хемиосмотическую гипотезу биоэнергетики. Затем последовали пять лет молчания. Митчелл работал архитектором и бригадиром строителей, восстанавливая развалины старинного дома, купленного им на юге Англии, в Корнуэлле, близ Бодмина. Новый дом («Глинн Хауз») был оборудован в основном под жилье, а несколько комнат — под небольшую лабораторию. Так возникла новая научная ячейка, громко названная ее создателем «Глинновские лаборатории для стимулирования фундаментальных биологических исследований».

Вернувшись от строительных дел к науке, Митчелл обнаружил, что его гипотеза осталась незамеченной, хотя прошедшие годы принесли ряд разрозненных наблюдений, свидетельствовавших в пользу идеи, высказанной в 1961 г. Тогда Митчелл решил подробно изложить свою концепцию. Была написана брошюра «Хемиосмотическое сопряжение в окислительном и фотосинтетическом фосфорилировании». Попытки автора пристроить свой труд в какое-либо издательство не увенчались успехом, и Митчелл вновь был вынужден последовать принципу «сделай сам». Был куплен ротпринт, рукопись размножена и разослана заинтересованным лицам: биохимикам, занятым проверкой их собственных гипотез.

Результат не замедлил сказаться. Гипотеза Митчелла была немедленно атакована с нескольких позиций и, казалось бы, рухнула под огнем критики ее оппонентов. Но кое-то среди них не мог не обратить внимание на живучесть главного принципа концепции, который никак не удавалось опровергнуть в прямом эксперименте.

Тем временем поток информации выносил на по-

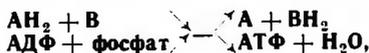


Питер Митчелл. Фотография сделана в момент сообщения о присуждении ему Нобелевской премии.

Телефото АП-ТАСС.

верхность новые факты, существование которых предсказывалось гипотезой Митчелла. С каждым годом таких фактов становилось все больше. Научное общественное мнение медленно эволюционировало от огульного отрицания к сдержанному удивлению и, наконец, признанию основного принципа гипотезы. Стала ясной справедливость гениальной догадки о сущности одной из самых важных и запутанных проблем современной биохимии.

Еще в 30-е гг. советские биохимики В. А. Энгельгардт и В. А. Белицер показали, что аккумуляция полезной энергии в клетке при окислении питательных веществ происходит за счет сопряжения двух реакций: энергодающей (окисление) и потребляющей энергию (синтез аденозинтрифосфорной кислоты — АТФ). Сопряжение проявляется в том, что два этих процесса взаимосвязаны и не могут протекать независимо друг от друга:



где АН_2 и В — субстраты окислительно-восстановительной реакции; А и ВН_2 — ее продукты; АДФ — аденозиндифосфорная кислота.

В 50-е гг. выяснилось, что образование АТФ в процес-

се фотосинтеза описывается той же общей схемой (Д. Арнон, США).

Однако оставалась совершенно неясной природа сопряжения окисления и фосфорилирования. На пороге 60-х гг. возникло множество конкурирующих гипотез, претерпевших на решение проблемы сопряжения. Одной из них была схема Митчелла.

По Митчеллу, процессы окисления и фосфорилирования локализованы в биологической мембране и происходят таким образом, что субстраты и продукты реакции оказываются разделенными мембранным барьером (см. схему).

Согласно схеме, окислительная реакция образует ионы H^+ слева от мембраны и потребляет ионы H^+ справа от нее. Синтез АТФ также вызывает дисбаланс водородных ионов, однако противоположной направленности (выделение H^+ справа и поглощение слева). Если окислительная реакция сопровождается высвобождением энергии (реакция I), то эта энергия первично запасается в трансмембранной разности электрических потенциалов (поскольку электрон пересекает мембрану) и трансмембранной разности концентраций ионов H^+ . Затем энергия образованного таким образом электрохимического потенциала водородных ионов ($\Delta\mu\text{H}^+$) расходуется на синтез АТФ (реакция II).

Первые указания в пользу этой схемы были получены в США А. Т. Ягендорфом и Б. Прессманом и в СССР Е. А. Либманом и нашей группой (1966—1976 гг.), когда выяснились следующие два обстоятельства.

Во-первых, синтез АТФ может поддерживаться в отсутствие окислительной реакции за счет искусственно созданного электрического градиента или градиента рН. Во-вторых, вещества, повышающие протонную проводимость мембран, разобщают окисление и фосфорилирование, т. е. реакция окисления получает возможность протекать независимо от реакции фосфорилирования. Тем же коллективом в Совет-

¹ Mitchell P. Coupling of phosphorylation to electron and hydrogen transfer by a chemi-osmotic type of mechanism. — «Nature», 1961, v. 191, p. 144.

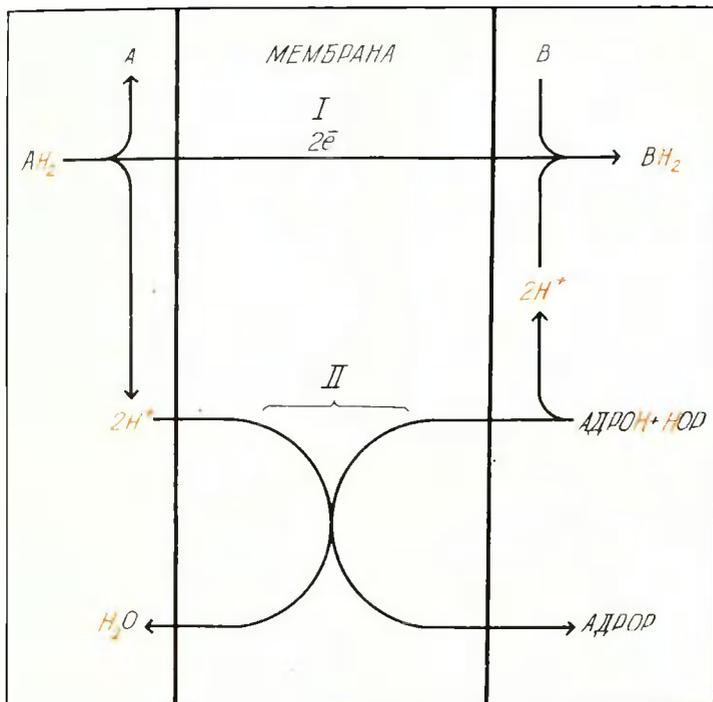


Схема Митчелла. NO_3^- — неорганический фосфат, АДФОН — аденозиндифосфорная кислота, АДФОР — аденозинтрифосфорная кислота, AN_2 и BH_2 — субстраты, а А и BH_2 — продукты окислительной реакции.

ском Союзе был обнаружен феномен электрофоретического транспорта синтетических

ионов через биологические мембраны. Самому П. Митчеллу и единственной постоянной сотруднице Глинновских лабораторий Дж. Мойл удалось выявить предсказанные гипотезой изменения рН в опытах с митохондриями и бактериями. Затем Э. Ракер и У. Стокениус в США показали, что синтез АТФ можно осуществить, используя вместо окисли-

тельной реакции транспорт ионов H^+ посредством особого белка — протонного насоса, названного бактериородопсином. Наконец, в нашей лаборатории Л. А. Драчевым с сотрудниками была прямо зарегистрирована разность электрических потенциалов, генерируемая очищенными ферментами окислительного и фотосинтетического фосфорилирования.

Эти наблюдения и ряд других, здесь не упомянутых, рассеяли всякие сомнения в правильности гипотезы Митчелла. Эксперименты подтвердили: окисление и фосфорилирование связаны между собой как два процесса, один из которых образует, а другой использует $\Delta\mu H^+$.

По существу, Митчеллом положено начало новой отрасли биологии, которую можно было бы определить как векторную биохимию. Эта наука исследует направленность биохимических реакций в пространстве относительно определенных внутриклеточных ориентиров. Если раньше считалось достаточным проследить путь взаимопревращений веществ на метаболической карте, то теперь ставится новый вопрос, в какую сторону (например, внутрь клетки или наружу) направлен изучаемый процесс.

Член-корреспондент АН СССР

В. П. Скулачев
Москва

По медицине — Д. Натанс, Г. Смит, В. Арбер

Нобелевская премия по медицине за 1978 г. присуждена двум американским исследователям Д. Натансу, Г. Смигу и швейцарскому исследователю В. Арберу за работы в области молекулярной генетики.

Даниель Натанс (Daniel Nathans) родился 30 октября 1928 г. в Уилмингтоне. В 1950 г. закончил Университет

штата Делавэр, в 1954 г. получил степень доктора медицины в Вашингтонском университете. С 1972 г. он — директор отдела микробиологии медицинского факультета Университета Джона Гопкинса.

Гамильтон Смит (Hamilton Smith) родился в Нью-Йорке 23 августа 1931 г. В 1952 г. окончил Калифорнийский университет (Беркли), степень док-

тора медицины получил в 1956 г. С 1970 г. — адъюнкт-профессор микробиологии медицинского факультета Университета Джона Гопкинса.

Вернер Арбер (Werner Arber) родился 3 июня 1929 г. Образование получил в Цюрихе, степень доктора биологических наук — в Женевском университете в 1958 г. В настоя-



Даниель Натанс

Фото АП-ТАСС.

Другими ферментами позволило добиться существенных успехов в исследовании структуры и функционирования генома малых вирусов. Эти работы проложили также дорогу для развития исследований ДНК различного происхождения.

Немногим более 25 лет назад известный вирусолог, лауреат Нобелевской премии С. Луриа с сотрудниками обнаружили новое явление: фаг, выращенный на одном бактериальном штамме, не развивался на другом штамме. Например, фаг лямбда, растущий на штамме кишечной палочки *E. coli* C, не размножался на штамме *E. coli* K 12. Известно, что природный хозяин фага лямбда — именно K 12. Поскольку фаг λ -C отличается от фага λ -K только специфичностью по отношению к хозяину, было ясно, что фаг λ -K не может быть генетическим мутантом фага λ -C. Однако суть феномена оставалась неясной до появления в 1962—1963 гг. работ В. Арбера и сотрудников. Арбер сформулировал принцип штаммоспецифичной рестрикции и модификации ДНК. Термин рестрикция имеет функциональный смысл: он означает, что бактериальная клетка (например, *E. coli* K-12) ограничивает функционирование фаговой ДНК (на пример, λ -C), не позволяя ей размножаться. Очевидно, что ограничивающий механизм (рестрикция) не срабатывал в отношении своего фага. В результате исследования различных штаммов кишечной палочки и соответствующих им фагов Арбер предположил, а затем доказал, что бактериальная клетка содержит два фермента. Один из них — специфическая эндонуклеаза, которая узнает в ДНК участок из нескольких пар нуклеотидов и расщепляет чужеродную двуцепочечную ДНК, вторгшуюся в клетку, осуществляя таким образом рестрикцию. Другой фермент — метилаза узнает точно ту же последовательность, что и эндонуклеаза, и метилирует ее. Модифицированный им участок ДНК становится недоступным для



Гамильтон Смит

Фото ЮПИ-ТАСС.

щее время — профессор биологического центра в Базельском университете.

В последние годы в недрах молекулярной биологии стремительно развилась новая область научных исследований — генетическая инженерия. Главная задача этого направления состоит в конструировании новых рекомбинантных молекул ДНК и, в конечном счете, использования их в практической деятельности.

Быстрое развитие генетической инженерии стало возможным благодаря успехам, достигнутым в нескольких областях молекулярной биологии. В первую очередь — это развитие энзимологии генетического аппарата клетки. В последние полтора десятилетия были открыты рестрикционные эндонуклеазы. Эти ферменты, обладая высокой специфичностью, узнают нуклеотидные последовательности строго определенного состава и «нарезают» молекулы ДНК на крупные фрагменты. Оказалось, что многие рестрикционные эндонуклеазы образуют при расщеплении молекул двуцепочечных ДНК неровные взаимодополнительные концы, что чрезвычайно облегчает создание новых рекомбинантных молекул.

Открытие рестрикционных эндонуклеаз сыграло решающую роль в развитии исследований структуры и функций ДНК. Применение этих эндонуклеаз в сочетании с

действия рестрикционной эндонуклеазы. Арбер сформулировал основные принципы действия такой рестрикционно-метилязной системы: оба фермента действуют только на двуцепочечную ДНК, узнаваемая последовательность состоит из нескольких пар нуклеотидов и имеет симметрию второго порядка (инверсионную), метилирование специфической метилазой хотя бы одной цепи ДНК предотвращает действие рестрикционного фермента. Действие обоих ферментов контролируется одним и тем же кофактором — S-аденозилметионином, донором метильных групп в метилазной системе. При исчерпании запасов S-аденозилметионина метилирование прекращается, однако ДНК хозяина при этом не страдает, поскольку одновременно останавливается действие и рестрикционной эндонуклеазы. Арбер — генетик, потому его интересовало явление изменчивости фага, контролируемой хозяином. В результате исследования этого явления он открыл ферменты рестрикции и модификации — новый класс ферментов специфически взаимодействующих с ДНК, действие которых направлено против чужеродной ДНК.

Открытие Арбера стимулировало поиски новых ферментов, участвующих в рестрикции и модификации. Пока объемом исследования оставалась кишечная палочка, было

открыто всего лишь несколько таких принципиально сходных ферментов. Главное сходство состояло в том, что они нуждались в S-аденозилметионе, узнавали определенный участок ДНК на молекуле чужеродной ДНК, но расщепляли ДНК не специфически, в участках далеко отстоящих от узнаваемой последовательности. Это ограничивало применение рестрикционных эндонуклеаз в экспериментах по исследованию ДНК.

Существенный успех был достигнут, когда Г. Смит с сотрудниками в 1970 г. обнаружили рестрикционную эндонуклеазу в другом микроорганизме *Neomorphilus influenzae* и исследовали ее свойства. Этот фермент, обозначенный по позднейшей номенклатуре Hind II, не нуждался в S-аденозилметионе, а главное, он узнавал и расщеплял один и тот же участок.

Эта группа исследователей заложила основы всей последующей работы с рестрикционными эндонуклеазами, подобными по свойствам Hind II. Ими были предложены методы очистки фермента и определения структуры узнаваемого участка. Эти методы, с некоторыми модификациями были использованы другими авторами для выделения и очистки рестрикционных эндонуклеаз из других источников. В 1975 г. число рестриктаз достигло примерно 50, а еще через два года 150. Все эти ферменты узнавали и расщепляли в ДНК определенный участок, состоящий из 4—6 пар нуклеотидов и обладающий симметрией второго порядка. Некоторые ферменты оказались изозимами, т. е. они узнавали и расщепляли одну и ту же последовательность. Открытые рестрикционные эндонуклеазы составили богатейшую коллекцию инструментов для расщепления ДНК, позволяющих разрезать эти молекулы в любых участках на фрагменты различной длины. Таким образом, появилась возможность выделять функциональные фрагменты ДНК, а также картировать их. Впервые такую работу провели Данна и Натанс в 1971 г.



Вerner Арбер

Фото ЮПИ-ТАСС.

Д. Натанс в течение ряда лет исследовал обезьяний вирус SV40, который не вызывает злокачественного перерождения клеток у приматов и человека, однако может трансформировать клетки грызунов. Для исследователя наиболее важно установить связь между структурой и функцией — в случае генома SV40 это означало установление места начала репликации, ход транскрипции, локализацию участка ДНК, ответственного за перерождение клетки, а также тех участков ДНК, которые отвечают за синтез белков оболочки самого вируса. В настоящее время ответы на эти вопросы получены, мало того, определена полная последовательность генома SV40 (более 5 тыс. пар нуклеотидов). Большая заслуга в успешном решении этого вопроса принадлежит Натансу с сотрудниками. Именно они впервые провели картирование ДНК вируса SV40 с помощью рестрикционных эндонуклеаз. В настоящее время на ДНК вируса SV40 определено положение участков узнавания 14 рестрикционных эндонуклеаз.

Натанс с сотрудниками установили, что репликация вируса SV40 начинается в одной точке генома и проходит с одинаковой скоростью в двух направлениях по обеим цепям ДНК. Транскрипция вируса SV40 начинается в той же или близкой точке, что и репликация, и проходит в двух направ-

лениях (также по обеим цепям ДНК), при этом синтезируются сначала ранняя мРНК и затем поздняя мРНК, ответственные за синтез различных белков вируса, в том числе белка Т-антигена, функция которого тесно связана с трансформацией нормальной клетки в раковую.

Нахождение участка генома вируса, ответственного за синтез Т-антигена, было наиболее волнующим этапом работы. С этой целью в лаборатории Натанса были получены разнообразными мутантами вируса SV40. Оказалось, что мутанты с частичными делециями (нехватками) обоих поздних генов, но с неповрежденным ранним участком генома, образуют Т-антиген в клетках хозяина, реплицируют свою ДНК и стимулируют включение тимидина в клеточную ДНК, и, что самое главное, такие мутанты трансформируют клетки мыши и хомяка. Таким образом, в геноме вируса была найдена область, ответственная за синтез Т-антигена.

Дальнейшие исследования Натанса были также направлены на установление связи между структурой и функцией вируса, его способностью к размножению, а также к трансформации клетки хозяина. С этой целью были получены так называемые эволюционные мутанты, а также гибриды SV40 с аденовирусом. Эти работы внесли существенный вклад в познание трансформирующей функции онкогенных вирусов.

Рестрикционные эндонуклеазы стали одним из основных орудий, применяемых для исследования структуры ДНК и создания гибридных молекул нуклеиновых кислот. Можно предвидеть, что в ближайшие годы методы генетической инженерии (картирование, рекомбинация, клонирование и определение структуры ДНК) позволят разрешить ряд задач онковирусологии и онкогенеза, иммунитета, строения и регуляции генома, т. е. злобные проблемы жизнедеятельности клетки.

О. Л. Поляновский,
доктор биологических наук

Москва

Космические исследования

Третий пилотируемый полет по программе «Интеркосмос»

26 августа 1978 г. в 17 час 51 мин по московскому времени в Советском Союзе стартовал космический корабль «Союз-31», на борту которого находился третий международный экипаж, запущенный по программе «Интеркосмос». Командир корабля — летчик-космонавт СССР В. Ф. Быковский, космонавт - исследователь — гражданин ГДР З. Йен¹. Ракета-носитель вывела корабль на начальную геоцентрическую орбиту; на исходе 26 августа был выполнен двухимпульсный корректирующий маневр дальнего сближения с орбитальным комплексом «Салют-6» — «Союз-29», в результате которого транспортный космический корабль «Союз-31» перешел на орбиту с параметрами: высота в перигее 271 км, в апогее — 326 км, наклонение 51,6°, период обращения 90,2 мин.

Во второй половине дня 27 августа «Союз-31» продолжил формирование монтажной орбиты: на 17-м витке был проведен второй двухимпульсный корректирующий маневр, который позволил уменьшить расстояние между кораблем и орбитальным комплексом до величины, начиная с которой дальнейшее сближение осуществлялось автоматически. В 19 ч 38 мин



Международный экипаж космического корабля «Союз-31»: командир корабля летчик-космонавт СССР, дважды Герой Советского Союза В. Ф. Быковский (вверху) и космонавт - исследователь, гражданин ГДР З. Йен.

Фото ТАСС.

по московскому времени 27 августа произошла стыковка «Союза-31» с орбитальным комплексом «Салют-6» — «Союз-29» к стыковочному узлу, расположенному на агрегатном отсеке станции; Быковский и Йен перешли в помещение станции «Салют-6». С этого момента на борту

научно - исследовательского комплекса «Салют-6» — «Союз-29» — «Союз-31» приступил к совместной работе международный экипаж в составе космонавтов В. В. Коваленка, А. С. Иванченкова, В. Ф. Быковского и З. Йена. Программа работ международного экипажа предусматривала проведение в течение семи дней научных исследований и экспериментов, ряд из которых был разработан совместно специалистами СССР и ГДР.

28 августа было начато комплексное обследование сердечно-сосудистой системы с помощью аппаратуры «Поли-

¹ Подробнее о полетах первого и второго международных экипажей и их работе на борту научно-исследовательского комплекса «Салют-6» — «Союз» см.: «Природа», 1978, № 6, с. 127; № 11, с. 124. О завершении полета на «Салюте-6» см. в следующем номере.

ном-2М», «Реограф», «Бета»; у членов экипажа регистрировались электрокардиограммы, реограммы, баллистокардиограммы и другие показатели. В тот же день космонавты приступили к выполнению медико-биологических экспериментов по изучению влияния факторов космического полета на развитие бактерий и культуры тканей, а также технологического эксперимента «Беролина» по космическому материаловедению на советских установках «Сплав» и «Кристалл».

В эксперименте «Беролина» (продолжение советско-чехословацкого эксперимента «Морава» и советско-польского эксперимента «Сирена») исследовалось влияние невесомости на ход технологических процессов и свойства получаемых материалов. Проводилось выращивание полупроводниковых монокристаллов «свинец-теллур» и «висмут-сурьма» и изготовление путем плавки и последующей кристаллизации оптического стекла со сложным составом. Специалисты ожидают, что в результате эксперимента «Беролина» будут получены материалы с более равномерным составом, совершенной структурой, а также новые данные, важные для технологии изготовления специальных стекол.

В эксперименте «Радуга-М» в целях изучения природных ресурсов Земли из космоса экипаж с помощью многозональной фотокамеры МКФ-6М провел фотосъемку отдельных районов земной поверхности и акватории Мирового океана, а также атмосферных явлений. Трудно переоценить значение экспериментов по изучению земной атмосферы и природных ресурсов Земли из космоса. Эти исследования уже сейчас приносят экономический эффект. Необычайно широка сфера их народнохозяйственного применения: обнаружение районов, перспективных для поиска полезных ископаемых, исследования в интересах сельского и лесного хозяйства, гидрологии, океанографии, метеорологии, изучение акваторий Мирового океана в целях повышения эффектив-

ности рыболовства и т. п. Исследования в этом направлении позволят также улучшить контроль за загрязнением окружающей среды.

К эксперименту «Радуга-М» привлекает подготовленный специалистами СССР и ГДР эксперимент «Биосфера» по визуально-инструментальному исследованию природной среды для получения информации о гео- и биосфере и о физических свойствах природных образований на земной поверхности. Космонавты проводили визуальные наблюдения, а также документирование путем съемки камерой «Пентакон» природных ландшафтов, пылевых и дымовых образований, исходящих из промышленных центров, интересных метеорологических явлений.

Обширной была программа медико-биологических исследований и экспериментов. Исследование порога вкусовой чувствительности человека в условиях космического полета проводилось в эксперименте «Вкус» с помощью прибора «Электругустомер», разработанного польскими специалистами. В экспериментах «Опрос» и «Досуг» изучалась эффективность воздействия зрелищно-музыкальных программ на работоспособность экипажа во время полета и психологические аспекты адаптации экипажа к необычным условиям космической среды обитания. Эксперименты «Речь» и «Аудио» были посвящены изучению речи и слуха космонавта в реальных условиях космического полета. Так, в эксперименте «Речь» З. Йен периодически произносил по-немецки число «226», что фиксировалось на магнитной ленте. Анализ частотных и амплитудно-временных характеристик его речи позволил оценить функциональное состояние космонавта.

Большой интерес представляет эксперимент «Время», в котором исследовалась динамика субъективного чувства времени у членов экипажа в условиях космического полета. Известно, что у человека в той или иной мере развита способность ориентиро-

ваться во времени без помощи контрольных приборов. Многочисленные данные наземных экспериментов свидетельствуют, что индивидуальное ощущение времени подвержено колебаниям в зависимости как от функционально-психологического состояния человека, так и от условий, в которых протекает его деятельность. Информация о динамике указанного ощущения в период адаптации космонавта к условиям невесомости представляется важной научной и практической задачей.

Эксперимент «Время» проводился с помощью электронного прибора «Рула» (разработанного специалистами ГДР) одновременно двумя членами экипажа, которые попеременно выступали то в роли экспериментатора, то — обследуемого. В ходе эксперимента, во-первых, определялась скорость зрительно-моторных реакций, когда обследуемый должен как можно скорее погасить индикатор, включенный экспериментатором; во-вторых, определялась точность психомоторного воспроизведения заданных временных интервалов: обследуемый должен был погасить включенный индикатор через 10 с, ориентируясь на собственные представления о времени, не прибегая к помощи хронометра; в-третьих, определялись пороги различия временных интервалов, когда обследуемый должен был сравнить предлагаемые «экспериментатором» попарно временные отрезки и указать, как они соотносятся между собой (больше, меньше, равны), ориентируясь при этом лишь на собственные представления.

Материалы, полученные в результате эксперимента «Время», позволяют оценить скорость адаптации космонавта к необычным условиям жизнедеятельности и будут полезны при выработке рекомендаций по совершенствованию режима труда и отдыха экипажей космических кораблей и орбитальных станций.

В экспериментах «Культура ткани», «Рост бактерий» и «Метаболизм бактерий», разработанных специалистами

СССР и ГДР, исследовалось влияние невесомости на обмен веществ, образование сложных клеточных структур и развитие клеток млекопитающих. Особенность этих экспериментов состояла в том, что исследователи на Земле в точности воспроизводили все аналогичные операции космонавтов и таким образом осуществляли контрольный эксперимент, результаты которого будут сопоставлены с данными исследований в невесомости.

Был также выполнен эксперимент «Поляризация», в ходе которого исследовалось влияние ландшафта и состояния атмосферы на точность наведения научной аппаратуры, а также эксперимент «Полярное сияние», во время которого космонавты наблюдали за этим необычным явлением в верхних слоях атмосферы.

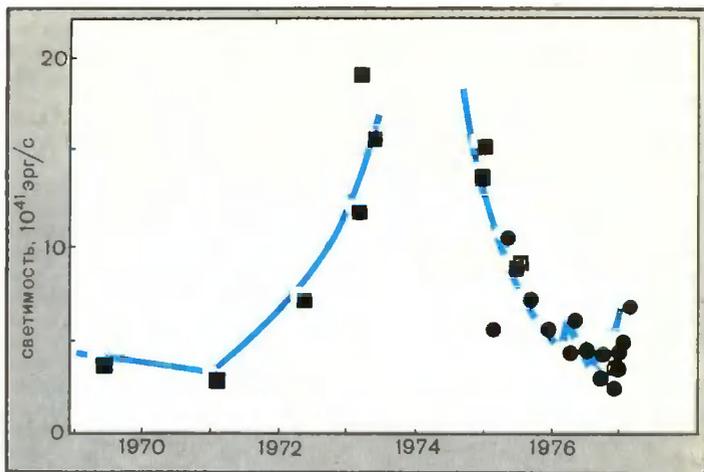
3 сентября 1978 г. после успешного завершения программы совместных работ на борту орбитального научно-исследовательского комплекса «Салют-6» — «Союз-29» — «Союз-31» космонавты В. Ф. Быковский и З. Йен благополучно возвратились на Землю. Посадка спускаемого аппарата корабля «Союз-29» произошла в заданном районе территории Советского Союза в 140 км юго-восточнее Джезказгана.

С. А. Никитин
Москва

Астрофизика

Переменное рентгеновское излучение ядер галактик

Ядро активной галактики NGC 5128 (Центавр А) излучает на частотах от 10^9 до 10^{26} Гц, т. е. является источником радио-, инфракрасного, рентгеновского и гамма-излучений (оптическое излучение сильно поглощается газопылевой межзвездной материей). По последним данным, угловой размер рентгеновского источника очень мал —



Изменение светимости ядра галактики NGC 5128 в рентгеновском диапазоне [2—8 кэВ].

меньше нескольких десятков секунд. Дж. Гриндли (Смитсоновский центр астрофизики, США) показал, что рентгеновское излучение ядра этой галактики переменное.

Недавно А. Лоуренс, Дж. Пай и М. Элвис (группа рентгеновской астрономии университета Лисистер, Великобритания) опубликовали результаты наблюдений этой активной галактики, проведенные с помощью специализированного рентгеновского спутника «Ариель-V», а также результаты других рентгеновских космических наблюдений. Получена достаточно полная кривая рентгеновского потока, подтверждающая переменное излучение: в 1972—1975 гг. зарегистрирована продолжительная рентгеновская вспышка ядра галактики, а также более быстрые (20—50 дней) изменения потока рентгеновского излучения.

Подобная картина наблюдалась и у других внегалактических объектов, например, у сейфертовской галактики NGC 4151, а также у ВЗ Ящерицы — прототипа объектов, называемых лацпертидами. Эти

две галактики излучают также в оптическом, инфракрасном и радиодиапазоне.

«Monthly Notices of the Royal Astronomical Society», 1977, v. 181, p. 93—99 (Великобритания).

Планетология

Вода в реголите Моря Кризисов

Принято считать, что в лунных породах нет минералов, содержащих воду, и что летучие соединения, в том числе вода, были потеряны Луной на самых ранних стадиях ее существования. Результаты анализов реголита, полученные М. В. Ахмановой (Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского АН СССР), Б. В. Демьянцевым и М. Н. Марковым (Физический институт им. П. Н. Лебедева АН СССР), позволяют усомниться в этих общепринятых представлениях.

В инфракрасных спектрах исследованных образцов лунного грунта, которые были доставлены автоматической межпланетной станцией «Луна-24», наблюдаются минимумы, соответствующие полосам поглощения воды. Концентрация воды в этих образцах оценивается примерно в 0,1 весового

процента. Методы инфракрасной спектроскопии (правда, в 2—3 раза менее чувствительные) применялись и раньше для исследования реголита, однако в образцах, доставленных «Луной-16, -20» и «Аполлоном-11, -12, -15», вода не была обнаружена.

Таким образом, для окончательного вывода о наличии воды в реголите Моря Кризисов необходимы дальнейшие исследования. Этот вопрос весьма актуален, поскольку преобладающее на сегодня мнение об отсутствии воды на Луне ставит совершенно обособленно проблему происхождения этой планеты.

«Геохимия», 1978, № 2, с. 285—288.

Планетология

Равнины и горы Венеры

Долгое время из-за отсутствия данных о рельефе поверхности природа крупных деталей Венеры, выделяемых, по картам отражательных свойств ее поверхности в радиодиапазоне, была лишь предметом догадок и предположений. Последние радиолокационные измерения высот на Венере, выполненные группой Р. Гольдштейна (Голдстоунская станция дальней космической связи, США), позволили провести анализ высотного положения светлых и темных радиолокационных деталей поверхности.

Р. Сондерс и М. Мэлин (Лаборатория реактивного движения, США) выделяют две обширные темные области округлой формы, которые на карте высот имеют вид низменностей. Меньшая из этих областей (поперечником ~450 км) расположена на 18° с. ш. и 273° з. д., большая имеет в поперечнике около 1300 км, а центр ее расположен в точке с координатами 20° ю. ш., 291° з. д. Эти области могли сформироваться в результате опускания поверхности при тектонических

процессах. Другой возможный механизм их образования — взрыв при падении гигантского метеорита. Предполагается, что подобные области должны иметь вид лунных морей — низменностей с относительно ровной поверхностью.

Светлые (на радиолокационной карте) области соответствуют высоким участкам; среди них — область Бета, которая, как предполагается, представляет собой гигантский вулкан¹ высотой 10 км. Другая светлая и расположенная высоко деталь находится на 18° ю. ш., 281° з. д. Сондерс и Мэлин считают, что аналогичные светлые образования, включая детали Альфа, Максвелл и находящуюся примерно в 1000 км к северу от Беты деталь Дельта, свидетельствуют об интенсивной вулканической активности планеты. Их высокая отражательная способность в радиодиапазоне может быть объяснена наличием на поверхности камней и маленьких крутых склонов, размеры которых сравнимы по величине с длинами волн, на которых проводится радиолокация Венеры (12,5 см). В качестве аналогичных образований на Земле подобным примером могут служить блоковые лавы, покрывающие склоны крупных вулканов, таких как Мауна Лоа на Гавайских о-вах.

«Geophysical Research Letters», 1977, v. 4, № 11, p. 547—550 (США).

Астрономия

Еще два приближающихся к Земле астероида

8 февраля 1978 г. среди звезд созвездия Гидры быстро двигался к северу еще неизвестный слабый астероид

(около 17-й звездной величины). Он был случайно сфотографирован во время работы с метровым телескопом Шмидта на Южной Европейской обсерватории в Чили, а затем обнаружен на снимке Г. Э. Шустером. По мере приближения астероид, получивший обозначение 1978 SA, становился все ярче, благодаря чему удалось получить серию фотографий, на основании которых Б. Марсден (Смитсоновский астрофизический центр, США) вычислил его орбиту.

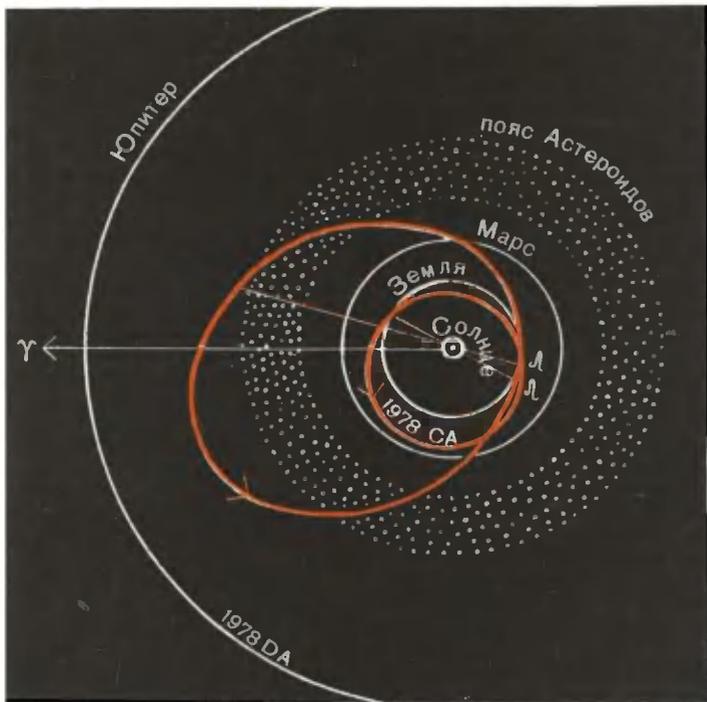
Астероид движется по слабо вытянутому эллипсу размером чуть больше орбиты Земли. Большая полуось его орбиты равна 1,12 а. е.; перигелий находится между орбитами Земли и Венеры (0,88 а. е.), а афелий — внутри орбиты Марса — 1,37 а. е. Период обращения вокруг Солнца — около 14 мес.

В момент открытия астероид приближался к Солнцу. 8 марта он прошел на расстоянии 0,127 а. е. от Земли, а 5 июня 1978 г. достиг перигелия своей орбиты и снова стал удаляться от Солнца.

В период сближения с Землей астероид имел 14-ю звездную величину и наблюдался на многих обсерваториях мира. Радиометрические наблюдения, проведенные Л. и М. Лебовскими в Лунной и планетной лаборатории (США) на 71-сантиметровом рефлекторе, снабженном фотозеленочной приставкой, позволили оценить размеры астероида и его альбедо. Астероид оказался крошкой, отражающей всего около 6% падающего на него солнечного света; его поперечник — около 2 км. У астероида весьма неправильная форма, о чем свидетельствуют значительные колебания блеска (на 0,8 звездной величины) с периодом в 3 ч 44 мин, зарегистрированные на обсерваториях в Иллинойсе, Аризоне и Чили.

Шустеру выпала редкая удача: 15 февраля с помощью того же инструмента от открыл второй астероид, получивший обозначение 1978 DA. Орбита этого астероида, также определенная Марсденом, существенно отличается от орбиты его

¹ «Природа», 1978, № 4, с. 136—137



Орбиты двух новых астероидов Солнечной системы 1978 SA и 1978 DA. γ — направление на точку весеннего равноденствия, λ — восходящие узлы орбит астероидов.

известно 50 объектов, которые время от времени приближаются к Земле на расстояние в несколько десятков миллионов километров, а иногда подходят и ближе.

«Sky and Telescope», 1978, v. 55, № 5, p. 383; IAU Circ. 3191 (США).

предшественника. Она больших размеров (большая полуось 2,48 а. е.) и более вытянута. В отличие от объекта 1978 SA этот астероид не проникает внутрь орбиты Земли: афелий лежит за пределами пояса астероидов, на расстоянии 3,9 а. е. от Солнца. Это один из самых мелких астероидов, открытых до сих пор: по наблюдениям в Аризоне, его поперечник оценивается всего в 1 км. Тем не менее у него удалось заметить колебания блеска, следующие с периодом около 8 ч.

Через месяц после открытия (15 марта 1978 г.) астероид 1978 DA прошел на расстоянии 0,087 а. е. от Земли, а спустя еще месяц (15 апреля) миновал перигелий своей орбиты.

Вместе с двумя вновь открытыми астероидами теперь

более плотными потоками лавы, поступающей из недр планеты.

Плотность этих образований еще больше увеличивается под действием эффекта отдачи, вызывающего подъем материала из мантии в районе коры, лежащем непосредственно под кратером. На Земле подобные события сравнительно редки, во всяком случае, трудно обнаружимы из-за продолжающихся активных процессов рельефообразования.

Маскон на Марсе был обнаружен в ходе анализа данных, полученных с борта орбитального отсека межпланетной станции «Викинг-2». В районе Равнины Исиды было зафиксировано значительное повышение силы тяготения и одновременно — понижение рельефа местности; присутствие маскона оказывает на подстилающие его породы «избыточное» давление, составляющее ~ 1000 кг см².

В Северном полушарии Марса, по крайней мере, в пределах 60° с. ш., которым ограничены имеющиеся пока данные, это, очевидно, единственный маскон.

«Science News», 1978, v. 113, № 17, p. 281 (США);

Физика

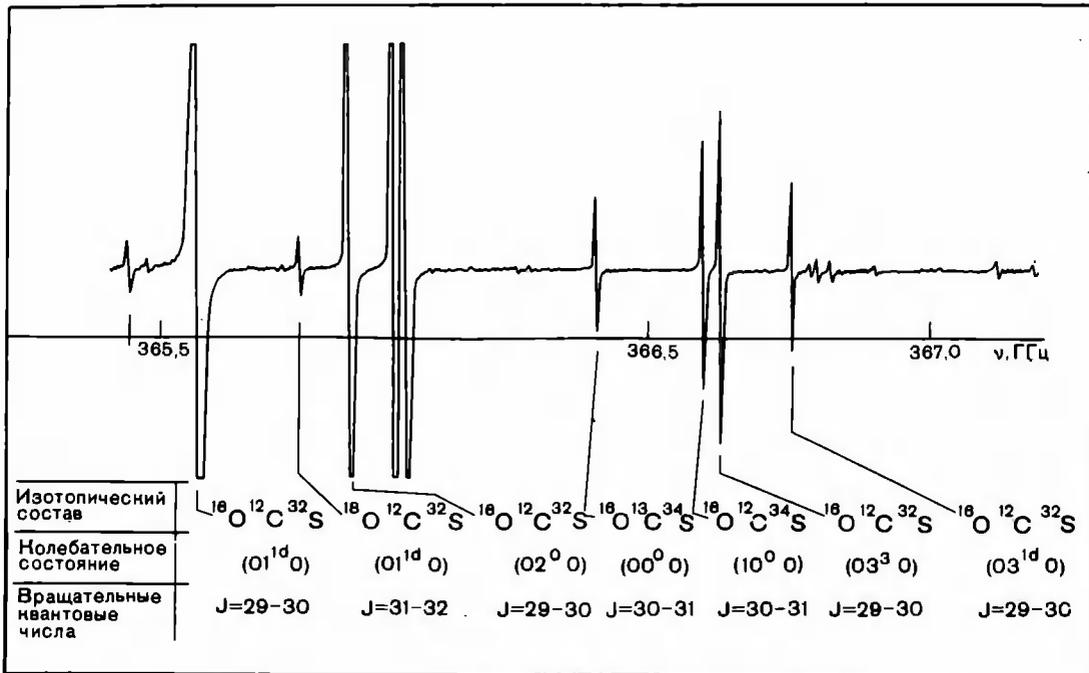
Новый субмиллиметровый спектрометр

В Институте прикладной физики АН СССР (Горький) создан уникальный субмиллиметровый спектрометр с акустическим детектором. Подобный прибор был крайне необходим исследователям, т. к. в субмиллиметровой области электромагнитных волн (10^{11} — 10^{12} Гц), именовавшейся до недавнего времени «спектроскопическим провалом», лежат вращательные и наиболее низкочастотные колебательные спектры молекул. Эти спектры содержат информацию о химическом и изотопном составе вещества, строении молекул, их электрических

Планетология

Маскон на Марсе

У. Сьорген (Лаборатория реактивного движения, США) сообщил об обнаружении на Марсе, вблизи Равнины Исиды (центр которой находится в точке с координатами 12° с. ш., 271° з. д.), концентрации масс, подобной уже известным на Луне масконам. Предполагается, что такие образования возникают при падении метеоритных тел на кору планеты, обладающую относительно низкой плотностью; создаются кратеры, которые затем заполняются бо-



Участок записи субмиллиметрового вращательного спектра молекул OCS, полученный с помощью субмиллиметрового спектрометра с лампой обратной волны и акустическим детектором. Зарегистрирована линия, соответствующая дважды изотопозамещенным молекулам $^{16}\text{O}^{13}\text{C}^{34}\text{S}$, естественная концентрация которых составляет $4 \cdot 10^{-4}$.

и магнитных свойствах, о внутри- и межмолекулярных взаимодействиях.

Источником когерентного микроволнового излучения спектрометра служит субмиллиметровый генератор — так называемая лампа обратной волны. Его излучение модулируется по интенсивности со звуковой частотой; кроме того, в некотором диапазоне осуществляется плавная перестройка длины волны (сканирование). Поступая в ячейку с исследуемым газом, излучение поглощается его молекулами, когда длина волны излучения соответствует длине волны, на которой может происходить поглощение. В ячейку помещен чув-

ствительный микрофон, который регистрирует колебания давления газа (с частотой модуляции микроволнового излучения), возникающего при поглощении и, следовательно, нагреве газа в ячейке. Вне линий поглощения такая система не реагирует на проходящее через ячейку излучение.

Применение субмиллиметрового спектрометра с акустическим детектором позволило получить и расшифровать спектры молекул OCS, NH_3 , SO_2 и др.

Чувствительность спектрометра по коэффициенту поглощения составляет 10^{-8} см^{-1} . Это наивысшая чувствительность спектрометров в субмиллиметровой области. Однако она может быть еще улучшена, если использовать, например, источники излучения большой мощности. Действительно, при увеличении мощности излучения растет и поглощенная газом мощность, т. е. величина полезного сигнала. Пределом здесь может служить такая мощность, при которой происходит насыщение линий поглощения. В экспериментах с использованием в качестве

генератора лазера на циклотронном резонансе была достигнута чувствительность 10^{-11} см^{-1} .

«Вестник Академии наук СССР», 1978, № 7, с. 18.

Физика

Ионные кольца для термояда

В настоящее время известно несколько способов «зажигания» реакции термоядерного синтеза в дейтерий-тритиевых таблетках: с помощью лазерных лучей, релятивистских электронных пучков легких и тяжелых ионов. Р. Н. Сьюден (лаборатория физики плазмы Корнеллского университета, США) предложил еще один способ: импульсный ионный пучок инжектируется в магнитную ловушку, в которой из него формируется ионное кольцо; затем производится магнитное сжатие этого кольца, в результате чего его энергия

Параметры ионного кольца	До сжатия	После сжатия
магнитное поле	1,8 Т	66 Т
энергия	3,2 кДж	3,0 МДж
большой радиус	18 см	3 см
малый радиус	4,1 см	0,6 см
скорость вращения относительно центральной оси	$0,5 \cdot 10^7$ об/с	$0,4 \cdot 10^8$ об/с

возрастает; сжатое ионное кольцо ускоряют в аксиальном направлении и «выстреливают» им в дейтерий-третиевую мишень.

Для сжатия ионного кольца потребуется частично сверхпроводящая магнитная система, создающая магнитное поле, нарастающее вдоль оси (от $1 \div 2$ Т до примерно 10 Т) и импульсное поле амплитудой $50 \div 100$ Т.

Сьюден провел расчет параметров ионного кольца из α -частиц, с помощью которого можно инициировать термоядерную реакцию в таблетке радиусом 3 мм (для этого требуется передать мишени энергию около 3 МДж за время порядка 20 нс; число α -частиц в кольце $6 \cdot 10^{17}$) (см. табл.).

Сьюден указывает на следующие достоинства нового способа: высокая энергетическая эффективность, связанная с тем, что энергия в основном черпается кольцом в процессе магнитного сжатия; отсутствие принципиальных технических трудностей (эксперименты по захвату и сжатию ионных колец уже ведутся в Корнеллском университете и в Исследовательской лаборатории ВМФ США); простота принципа; относительная легкость концентрации энергии в результате магнитного сжатия, чем путем фокусировки ионного пучка; кроме того, такая установка дешевле и меньше по размерам, чем ускорители тяжелых ионов.

«Physical Review Letters», 1978, в. 41, № 7, p. 476—480 (США).

Физика

Несохранение четности при неупругом рассеянии электронов

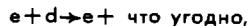
Группа американских и западноевропейских физиков под руководством Ч. Прескотта и Р. Тейлора сообщила о наблюдении эффекта несохранения четности в экспериментах по неупругому рассеянию электронов, выполненных на линейном ускорителе в Стэнфорде (Калифорния, США). Явление несохранения четности — следствие интерференции между электромагнитным и слабым взаимодействием, и любое наблюдение этого эффекта несет существенную информацию о природе элементарных частиц¹.

Цель станфордских опытов — измерить зависимость вероятности рассеяния электронов от ориентации их спинов. Вначале необходимо было создать интенсивный источник продольно поляризованных электронов. Для этого полупроводниковый кристалл GaAs облучался циркулярно поляризованными фотонами. Источником света служил лазер на красителе, работающий в режиме 120 имп/с при длительности импульса 15 мкс (длина волны излучения лазера 710 нм). Электроны, вырываемые с поверхности кристалла в результате фотоэмиссии,

согласно квантовомеханическим правилам отбора, оказывались продольно поляризованными. Средняя поляризация полученного пучка равнялась 0,37, а его интенсивность менялась в пределах $(1-4) \cdot 10^{11}$ электронов/имп. Для изменения направления спинов электронов достаточно было поменять поляризацию лазерного луча.

После ускорения до энергии порядка 20 ГэВ поляризованные электроны направлялись в систему контроля. Важно было добиться стабильности всех параметров электронного пучка при изменении ориентации спинов, так как даже небольшие различия в положении, интенсивности и энергии пучков электронов с разными спинами могли серьезно повлиять на результаты наблюдений. Разрешающая способность системы контроля позволила проводить измерения с точностью 10 мкм по положению пучка, 0,3 мкрад по углу, 0,01% по энергии и 0,02% по интенсивности.

Затем пучок направлялся на неполяризованную жидкую дейтериевую мишень. Электроны, неупруго рассеянные в результате реакции



анализировались в магнитном спектрометре и счетчиках. Измеренные таким образом сечения ed -рассеяния (при ориентации спинов налетающих электронов вдоль и против направления движения) использовались для нахождения параметра асимметрии A , равного отношению разности этих сечений к их сумме. Отличие A от нуля свидетельствует о нарушении четности в изучаемом процессе рассеяния. В станфордском эксперименте параметр A был найден в виде: $A = (-9,5 \pm 1,6) \cdot 10^{-5} Q^2$, где квадрат переданного рассеянному электрону импульса имеет значение $Q^2 \sim 1,6(\text{ГэВ}/c)^2$. Ряд экспериментов проведен на водородной мишени; в этом случае $A = (-9,7 \pm 2,7) \cdot 10^{-5} Q^2$. Ранее уже делались попытки обнаружить столь малый эффект в экспериментах с мюонами и электронами, однако эти измерения имели

¹ Об обнаружении несохранения четности при исследовании атомных переходов в спектре висмута см.: «Природа», 1978, № 11, с. 134.

меньшую, чем это необходимо, точность.

Результаты, полученные в Станфорде, имеют большое значение для физики слабых взаимодействий, современная теория которых была создана десять лет назад в работах С. Вайнберга, А. Салама и др. Модель Вайнберга — Салама (В — С) объединила слабые и электромагнитные взаимодействия и предсказала, в частности, существование нейтральных токов, открытых в 1973 г.² Идеи, лежащие в ее основе, оказались настолько привлекательными, что породили множество вариантов теорий, приводящих к более или менее различным предсказаниям по сравнению со стандартной моделью В — С. Так, в ряде работ, выполненных до 1973 г., с помощью искусственных приемов нейтральные токи исключались, но ценой введения в теорию новых лептонов, отличных от электрона и мюона. После открытия нейтральных токов популярность подобных моделей упала, хотя заряженный тяжелый лептон, T -лептон, был все-таки недавно экспериментально обнаружен³.

Таким образом, вплоть до последнего времени наряду с моделью В — С существовали и другие претенденты на роль теории, объединяющей электромагнитные и слабые взаимодействия. Данные станфордской группы вместе с результатами изучения нейтринных реакций практически исключают все конкурирующие модели. Для полного торжества теории В — С остается, правда, экспериментально обнаружить предсказанные ею три тяжелых векторных бозона с гигантскими массами 80—90 ГэВ. Эксперименты по их обнаружению намечено провести в начале следующего десятилетия.

«Preprint of Stanford Linear Accelerator Centre», 1978, SLAC-Pub-2148 (США).

² «Природа», 1974, № 2, с. 105.

³ «Природа», 1978, № 2, с. 145.

Успешная пересадка хромосом

А. Б. Макхери с сотрудниками (Национальный институт здоровья детей и развития человека, Бетесда, США), используя липосомы¹, провел пересадку метафазных хромосом из одного типа клеток в другой.

Метафазные хромосомы выделяли из культуры клеток млекопитающих, синтезирующих, в частности, ферменты гипоксантингуанилфосфорибозилтрансферазу, глюкозо-6-фосфатдегидрогеназу и фосфолипидаткиназу. Выделенные хромосомы обрабатывали смесью липидов (яичного лецитина и холестерина) таким образом, что хромосомы как бы обволакивались тонкой липидной оболочкой, предохраняющей их от разрушения нуклеазами, протеолитическими ферментами и т. п. Такие частицы Макхери предложил называть липохромосомами. При добавлении липохромосом к культуре клеток, не вырабатывающих гипоксантингуанилфосфорибозилтрансферазу, глюкозо-6-фосфатдегидрогеназу и фосфолипидаткиназу, в этих клетках начинался синтез перечисленных ферментов. Следовательно, происходил перенос хромосом из клеток-доноров в клетки-реципиенты, и такие перенесенные хромосомы сохранили свои функции. Свойства ферментов, синтезирующихся в клетках-реципиентах после переноса в них липохромосом, не отличаются от свойств этих ферментов из донорных клеток. Частота переноса составляла 1 на 10^5 клеток, что на несколько порядков превышает частоту переноса хромосом,

не заключенных в липидную оболочку.

При электронномикроскопическом исследовании в липидной оболочке липохромосом обнаружены отверстия, площадь которых составляет около 10% поверхности оболочки. Однако, для успешного переноса хромосомы внутрь ядра в неповрежденном состоянии, вполне достаточно, чтобы 90% ее поверхности были защищены.

«Proceedings of the National Academy of Science of the USA», 1978, v. 75, № 3, p. 1361—1365 (США).

Биохимия

Мембраны защищают клетку от мутагена

В условиях нарастающей загрязненности окружающей среды химическими соединениями встает проблема мутагенной опасности для генофонда человека. Один из путей защиты от этой опасности — поиск антимуtagenных соединений. В отделе цитобиохимии Московского научно-исследовательского института педиатрии и детской хирургии Министерства здравоохранения РСФСР проведены клинико-биохимические исследования, цель которых — установить роль клеточных мембран в функционировании клеток как в нормальных, так и в патологических условиях.

По нашему мнению, наиболее простой способ защиты генетического аппарата клетки¹ состоит в уменьшении проницаемости клеточных оболочек для мутагена. Эксперименты проводили на культивируемых лимфоцитах человека. В качестве мутагена использовали этиленминопроизводное соединение — тиофосфамид. (Производные этиленмина достаточно широко используются как в традиционных

¹ Липосомы — липидные пузырьки, в которых удавалось транспортировать в клетки и ткани разнообразные вещества: ферменты, лекарственные препараты, полинуклеотиды и т. п. Подробнее об этом см.: «Природа», 1977, № 3, с. 137.

¹ Вельтищев Ю. Е., Селезнев Ю. В. «Генетика», 1978, т. 14, № 7, с. 1276.

химических производствах, так и в самых новейших.) Как защитное средство против мутагена применяли мембраностабилизирующее соединение — оксизитилидендифосфат калия (ОЭДФ). Как показал цитогенетический анализ, введение в клеточную культуру ОЭДФ весьма эффективно защищало хромосомы от повреждающего действия тиофосфамида. В то же время антимиутаген сам не повреждал хромосомы и не снижал активного деления лимфоцитов.

Кроме того, в определенных концентрациях тиофосфамид — активное противоопухолевое соединение, а как известно, противоопухолевые препараты обладают малой цитостатической избирательностью: наряду с действием на опухолевые клетки, они подавляют также жизнедеятельность и других активно делящихся и размножающихся тканей (костного мозга, эпителия желудочно-кишечного тракта, волосных фолликул). В результате возникают многочисленные осложнения после применения противораковой химиотерапии, к которым относятся подавление функции кроветворения, желудочные кровотечения, выпадение волос и др. Наши эксперименты позволяют разработать методические подходы защиты здоровых тканей.

Ю. В. Селезнев,
кандидат медицинских наук
Москва

Биохимия

Что регулирует передвижение белков?

Каждый отдел клетки имеет специфический набор белков, причем особенно сильно различается состав белков ядра и цитоплазмы. Так, при микроинъекции в цитоплазму ооцитов африканской лягушки *Xenopus laevis* специфических ядерных белков, они через некоторое время обнаруживаются в ядре и там накапливаются¹. Чем же определяется передвижение ядерных белков

через цитоплазму и их накопление в ядре?

Дж. Гердон (лаборатория молекулярной биологии, Кембридж, Великобритания) вводил различные меченные радиоактивными изотопами белки, выделенные из одних ооцитов, в другие и следил за их передвижением. Оказалось, что проникали в ядро и накапливались там только ядерные белки. Белок актин, который находится и в ядре и в цитоплазме, проникал в ядро, но не накапливался, а белки цитоплазмы в ядре не обнаруживались. Проникновение в ядро и накопление там ядерных белков не зависело от их размера и заряда: одинаково проникали и накапливались кислые, нейтральные и щелочные белки с молекулярным весом, изменяющимся от 11000 до 35000D.

Аналогичные результаты получены японскими специалистами из Университета в Осака и Токийского института медицинских наук при инъекции хромосомных белков из печени крысы в клетки асцитной опухоли Эрлиха. По мнению авторов, ядерные белки имеют в своей структуре какую-то особенность («регулятор»), которая и определяет их передвижение через цитоплазму, проникновение в ядро и избирательное накопление там.

«Nature», 1978, v. 272, № 5650, p. 254—256 (Великобритания).

Физиология

Энкефалины и память

Известно, что гормон гипофиза β -липотрофин улучшает память крыс. Сходным действием обладает вещество, также выделяемое гипофизом, — так называемый АКГ-пептид 4-10. Химический анализ показал идентичность аминокислотных последовательностей пептидных компонентов этих двух соединений. Сходным

с этой белковой частью по химическому строению являются также природные пентапептиды — метионин-энкефалин и лейцин-энкефалин, выделенные из тканей мозга.

Х. Риггер (научно-исследовательская группа фирмы «Органон Интернейшнл», Нидерланды) исследовал влияние пентапептидов на процессы запоминания у крыс. Животных приучали выходить из освещенного ящика по определенному маршруту. Затем их отучали идти по этому маршруту, установив у выхода металлическую решетку, через которую пропускали электрический ток. Крысы, получив электрический удар, переставали избирать этот путь. Затем крыс заставляли «забывать» о наказании; для этого их помещали на время в атмосферу с повышенным содержанием CO_2 . (Ранее было установлено, что CO_2 каким-то образом влияет на процессы запоминания, подавляя их.) В результате действия CO_2 крысы контрольной группы «забывали» о наказании, ожидающем их при выходе из ящика, и упорно шли к месту, где получали электрический удар. В то же время животные, которым систематически вводили метионин- и лейцин-энкефалины, отказывались избирать путь, ведущий к месту наказания.

О конкретном механизме действия энкефалинов на процессы, связанные с памятью, пока ничего не известно, но результаты опытов однозначно указывают на участие энкефалинов в сложнейших нейрофизиологических процессах.

«Science», 1978, v. 200, № 4337, p. 83—84 (США).

Зоология

Противоядие в крови неотом

Распространенный на юго-западе США грызун *Neotoma ferruginea* (так называемая лесная крыса) нередко

¹ «Природа», 1977, № 9, с. 78.

поселяется в одной норе с гремучей змеей вида *Crotalus adamanteus*. До сих пор оставалось неизвестным, в чем состоит защитная система грызуна против укусов змей.

Американский биохимик Дж. Перес (Техасский агрономический и индустриальный университет в Кингсвилле) установил, что сосуществовать с гремучей змеей позволяет неотоме не специфика ее поведения, как полагали некоторые специалисты, а особый, свойственный этим грызунам состав крови.

Инъекция 2 мкл свежего яда гремучих змей в организм неотомы в лабораторных условиях приводила к гибели лишь половины подопытных животных. Между тем эта доза (в пересчете на вес животного) в 140 раз превышает дозу, необходимую в аналогичных опытах с обычными мышами.

В природных условиях максимальная доза яда, выделяемого гремучей змеей при укусе, иногда достигает 3 мкл. Таким образом, очень крупная змея может убить неотому, а змея средних размеров, как правило, не может.

Когда Перес с сотрудниками вводили 0,5 мкл сыворотки, изготовленной из крови неотомы, в организм мыши, ее иммунитет к этому яду возрастал в 3,6 раза.

Сейчас ведутся работы с целью выделить «защитный фактор», содержащийся в клетках крови грызуна. Предварительные результаты показывают, что это не просто антитела. Смешение сыворотки крови неотомы с ядом змеи не приводит к возникновению комплекса «антиген-антитело», как это бывает в обычных иммунных системах. Возможно, что «защитный фактор» представляет собой фермент, который быстро разлагает яд. В таком случае его обнаружение поможет созданию новых средств против укусов ядовитых змей.

«Science News», 1978, v. 112, № 25, p. 406—407 (США).

Энтомология

Подражает ли муха-пчеловидка домашней пчеле?

Ранее считали, что муха-пчеловидка (*Eristalis fepax*), как и все мухи, поедает пыльцу прямо с пыльников тычинок, а своим обликом подражает домашней пчеле (мимикрия) и имеет защитную окраску. Однако недавно Б. А. Холлоуэй (Департамент научных и промышленных исследований Новой Зеландии) установил, что пчеловидка на цветах пыльцу не поедает, а, подобно пчеле, сперва собирает ее¹.

Как и у пчелы, тело мухи покрыто ветвистыми, перистыми и волнистыми волосками, с помощью которых она собирает и удерживает пыльцу. Позднее пыльца вычесывается гребнями передних и задних голеней и концентрируется на спирально закрученных щетинках передних и задних лапок. Комочки пыльцы с передних лапок муха поедает прямо с них, а пыльца с задних лапок переносится пчеловидкой во время полета соскребающими движениями ног на передние лапки (у пчелы — в обратном направлении).

Виды мух рода *Eristalis* широко распространены в Европе и Северной Америке; они очень сходны по размеру, форме и окраске, хотя некоторые из видов встречаются в районах, где вовсе нет домашних пчел. Невольно возник вопрос: как могла появиться очевидная мимикрия в отсутствие модели? Предполагали, что пчелоподобный облик предковой формы рода *Eristalis* возник прежде, чем начался на территории Северной Америки процесс симпатрического видообразования пчеловидок и домашних пчел. Завоз пчел в районы, где встречались мухи-пчеловидки, возможно, способствовал тому, что возникшее в изоляции сходство

Eristalis с домашней пчелой стало усиливаться путем естественного отбора².

Новые данные позволяют сделать другой вывод: внешнее сходство мухи-пчеловидки и домашней пчелы — случайное; оно выработалось в процессе эволюции одновременно со сходным поведением при сборе пыльцы.

Значение коричневых и желтых пятен у обоих видов еще неясно, но, возможно, они способствуют регуляции температуры тела во время продолжительных полетов.

В. М. Емец,
кандидат биологических наук

Воронеж

Этология

Внутривидовая агрессивность шимпанзе

Приматолог Дж. Гудолл сообщила о собранных ею материалах, впервые указывающих на существование острой агрессивности между соседствующими группами шимпанзе. Наблюдения за жизнью шимпанзе в естественных условиях резервата Гомбе Стрим (Танзания), организованные Национальным географическим обществом США, Гудолл ведет с 1960 г.

В одной из групп шимпанзе сильно возросла численность самцов, что вызвало между ними весьма напряженные отношения. В 1972 г. 7 самцов и 3 самки отделились от первоначальной стаи и переселились в район к югу от нее. Отношения между обеими группами сразу стали «холодными». В 1974 г. впервые было замечено, как 11 самцов из первой группы напали на одного самца из второй. Обычно, как показывали прежние наблюдения, драки между шимпанзе продолжались в среднем около одной минуты. Эта же стычка длилась почти 20 мин и отличалась крайней жестокостью.

¹ Holloway B. A. «New Zealand Journal of Zoology», 1976, v. 3, p. 339—350.

² Brower J. V. Z., Brower L. P. «The American Naturalist», 1965, v. 99, p. 173—187.



Самка Мелисса со своими детенышами-близнецами. Рождение двойни у шимпанзе в естественных условиях впервые удалось наблюдать в резервате Гомбе Стрим (Танзания).

По существу, это было неспровоцированное преднамеренное убийство.

С тех пор исследователи зарегистрировали 5 случаев нападения старой стаи на представителей отделившейся. Во всех случаях они атаковали либо отдельного самца, либо самца с самкой, но никогда — двух самцов, находящихся рядом. В нападении чаще всего участвовали молодые самцы, пользовавшиеся в драке руками, ногами и зубами. В 1977 г. все 7 самцов из южной группы были истреблены.

В конце 1977 г. Гудолл впервые удалось наблюдать, как самка шимпанзе Мелисса принесла двойню. Детеныши этого вида питаются молоком матери до трехлетнего возраста, и обычно матери бывает нелегко совмещать заботу даже об одном детеныше с необходимостью постоянно передвигаться по лесу в поисках пищи. Исследовательница полагала, что близнецы Джир и Гимбл проживут не более недели, однако они благополучно перевалили через шестимесячный рубеж, хотя и отставали несколько в развитии от своих сверстников. В этом возрасте

один из них повредил себе ногу и требовал, чтобы мать чаще останавливалась и строила гнезда для отдыха. Время, которое теперь Мелисса могла уделять собственной кормежке, сократилось с восьмью часами в сутки до одного. Исследователи решили вмешаться и начали прикармливать Мелиссу бананами, в которых содержались антибиотики. Возможно, это не только подкрепило силы матери, но и способствовало заживлению раны у детеныша.

Было обнаружено, что в стаде имеются две самки (мать и дочь), которые при удобном случае похищают новорожденных у других шимпанзе и поедают их. За несколько лет их жертвами пало по меньшей мере 10 новорожденных обезьян. Наблюдательница попытка одной из этих «каннибалок» схватить близнецов Мелиссы, но мать сделала угрожающий выпад, и нападавшая отступила. По-видимому, в защите близнецов принимали участие и самцы, включая Сатану, который, очевидно, являлся их отцом. Гудолл наблюдала, как, впервые увидев этих детенышей, Сатана не отводил от них взгляда в течение 10 мин.

Что касается внутривидовой межгрупповой агрессии у шимпанзе, то и японские приматологи, ранее также работавшие в Танзании, наблюдали отдельные случаи подобных конфликтов, однако они никогда прежде не заканчивались гибелью участников.

«Science News», 1978, v. 117, № 17, p. 276 (США).

Геология

59-й рейс «Гломара Челленджера»

3 февраля 1978 г. из Японского порта Наха (о-в Окинава) отправилось в 59-й рейс научно-исследовательское буровое судно «Гломар Челленджер»¹. На борту находились специалисты Англии, Италии, СССР², США, Франции, ФРГ и Японии; воз-

главляли экспедицию ученые США Л. Кренке (Институт геофизики Гавайского университета) и Р. Скотт (Отделение геологии Техасского университета). Основная научная задача экспедиции — изучение особенностей строения и вопросов происхождения впадин и подводных хребтов центральной части Филиппинского моря.

Проблема образования окраинных морей — одна из наиболее существенных и привлекающих в геологии. Она теснейшим образом связана с фундаментальными проблемами эволюции активных континентальных окраин. Большинство окраинных морей расположено на северо-западе и западе Тихого океана: это Берингово, Охотское, Японское, Филиппинское, Южно-Китайское, Коралловое и другие моря. Со стороны океана они обычно ограничены островной дугой, а со стороны континента — либо системой внутренних желобов и островных дуг, либо субконтинентальными или континентальными областями. В настоящее время широко признано, что многие окраинные моря представляют собой новообразованные впадины, возникшие вследствие раздвигания блоков земной коры.

Чтобы познать причины и механизм образования окраинных морей, необходимо достоверно установить возраст и состав накопившихся в них осадочных образований, так же как и пород фундамента, на котором лежат эти осадки; время проявления и характер вулканизма, сопровождавшего образование впадин; связь этого процесса с эволюцией прилегающих крупных морфолого-тектонических единиц — глубоководных желобов, островных дуг и т. д.

Филиппинское море, в пределах которого совершал-

¹ «Geotimes», 1978, № 6.

² От Советского Союза в рейсе принимал участие автор этого сообщения. — Прим. ред.

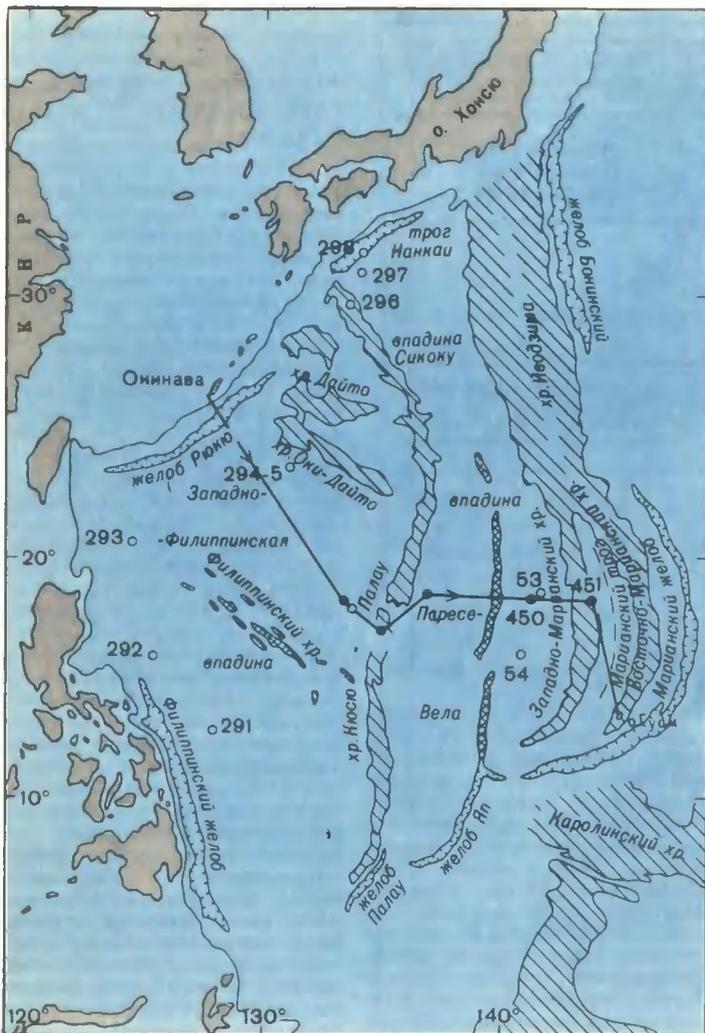


Схема расположения скважин, пробуренных научно-исследовательским судном «Гломар Челленджер» в Филиппинском море.

● скважины, пробуренные в 59-м рейсе [447А—451]

- области с континентальным типом коры
- глубоководные желоба
- современные и остаточные островные дуги
- зоны разломов
- скважины, пробуренные в 6-м [53, 54] и 31-м рейсах [290—298]

ся 59-й рейс, предоставляет возможности для успешного изучения многих из отмеченных проблем. В этом районе выделяются сейсмически активный Марианский трог, обладающий повышенной величиной теплового потока; неактивные поздне-ретритичные впадины Паресе-Вела и Сикоку; более древняя, раннетретичная Западно-Филиппинская

впадина. В центральных участках впадин расположены крупные зоны разломов, а сами впадины разделены протяженными меридиональными подводными хребтами — так называемыми остаточными островными дугами. Хребет Ксюю-Палау отделяет Западно-Филиппинскую впадину от впадин Сикоку на севере и Паресе-Вела — на юге, а эта последняя отделена Западно-Марианским хребтом от Марианского трога. Со стороны Тихого океана тектоно-морфологический ансамбль Филиппинского моря ограничивается системами Бонинской и Марианской островных дуг и одноименных глубоководных желобов, а со стороны Азиатского континента — внутренними желобами Нанкай, Рюкю и Филиппинским, а также расположенными за ними островными дугами Японской, Рюкю и Филиппинской.

В 59-м рейсе было пробурено 6 скважин, причем три из них — во впадинах: 447А¹ — в Западно-Филиппинской, а 449 и 450 — в Паресе-Вела. Как и предполагалось, скважины вскрыли типичный разрез океанической коры. Верхняя часть (1-й океанический слой) представлена осадочными образованиями — пелогическими глинами, неопланктоновыми и радиоляриевыми илами, мергелями, тонкозернистым вулканическим пеплом и туфами. Затем скважины проникли во 2-й океанический слой, состоящий из базальтов с массивной и подушечной текстурой (наиболее глубокая скважина рейса 59 прошла в этом слое 182 м). Верхний возрастной предел базальтов изменяется от среднего олигоцена (30—32 млн лет) до нижнего миоцена (15—17 млн лет), а структура и минеральный состав неотличимы от типичных глубоководных базальтов — толеитов. Существование геохимических отличий может быть выявлено лишь после детальных лабораторных исследований.

Согласно геофизическим данным, в пределах подводных хребтов, относящихся к погруженным «остаточным»

Скважины во впадинах

№ скважины	Глубина океана над устьем скважины, м	Глубина проникновения в базальты от устья скважины, м
447А	6040	113—295 (182)
449	4727	111—151 (40)
450	4727	330,5—340 (9,5)

Скважины на подводных хребтах— остаточных островных дугах

№ скважины	Глубина океана над устьем скважины, м	Глубина проникновения в вулканическую толщу базальтов и андезито-базальтов от устья скважины, м
448	3508	337—914 (577)
448А	3508	(577)
451	2091	290,5—930,5 (640)

островным дугам, 2-й океанический слой заметно утолщен и перекрыт мощным покровом вулканогенно-осадочных образований. Скважины, пробуренные на хребтах Кюсю-Палау (448 и 448А) и Западно-Марианском (451), впервые позволили исследовать подобные образования на большую глубину — до 1000 м. Выяснилось, что нижняя часть разреза в этих скважинах (~500 м) представляет собой вулканическую толщу из чередующихся вулкан-обломочных пород и покровов пузырчатых базальтовых и андезито-базальтовых лав. Особенности строения и состава образований, скрытых скважинами 448, 448А и 451, указывают, что вулканизм проявлялся в мелководных и субареальных условиях (т. е. резко отличных от океанских) и полностью соответствует условиям проявления вулканизма в пределах современных островных дуг (типа Бонинской, Марианской и т. д.).

Перекрывающие вулканическую толщу осадочные образования (~280—300 м) характеризуют период прекращения вулканизма и постепенного погружения этих палеоостровных дуг ниже уровня моря. Максимальная глубина

на погружения достигает 3—4 км.

Предварительный анализ данных, полученных в 59-м рейсе, позволяет утверждать, что формирование впадины Паресе-Вела началось позже (средний олигоцен), чем Западно-Филиппинской (палеоцен — средний эоцен), и что хребты Кюсю-Палау, Западно-Марианский и Восточно-Марианский примерно 30 млн лет назад составляли единое целое. Зарождение впадины Паресе-Вела и постепенное разраствание ее дна вызвало расщепление этого единого хребта; отделившийся от него хребет Кюсю-Палау прекратил свое развитие в качестве активной островной дуги примерно 30 млн лет назад и постепенно погружился под уровень моря до своего современного положения. Гораздо позже (3—5 млн лет назад) зарождение Марианского трога привело к аналогичному разделению Марианского хребта на Западный и Восточный.

Завершился 59-й рейс «Гломара Челленджера» 15 марта 1978 г. на о-ве Гуам (Марианские о-ва).

Г. С. Закаридзе,
кандидат геолого-минералогических наук
Тбилиси

Геология

Угленосные формации
глубоководных частей
океанов

В Атлантическом, Индийском и Тихом океанах в процессе бурения с научно-исследовательского бурового судна «Гломар Челленджер» были установлены угленосные и рудоносные отложения мелового и третичного возраста в глубоководных частях, за пределами континентального шельфа и склона. Эти формации, в особенности угленосные, могут свидетельствовать о том, что некоторые участки дна в отдельные промежутки мелового и третичного времени располагались выше уровня моря и представляли собой либо болота и мангровые заросли, где формировались торфяники, давшие начало лигнитам (незначительно углефицированная ископаемая древесина), либо сапропели (органико-минеральные отложения озерных водоемов), превратившиеся впоследствии в горючие сланцы. Характеристика этих угленосных и рудоносных отложений чрезвычайно интересна как с точки зрения петрографии и минералогии пород дна океанов, так и при обсуждении вопросов о составе и структуре земной коры под океанами, тектонической истории и возраста современных океанских котловин.

А. А. Пронин (Институт геологии и геохимии им. А. Н. Заварицкого Уральского научного центра АН СССР) проанализировал и обобщил первичную информацию различных авторов о результатах бурения с «Гломара Челленджера».

Угленосные образования раннемелового (апт-альбского) возраста установлены в Атлантическом океане не менее чем в восьми скважинах на обширном пространстве и на глубинах от шельфовых до абиссальных. Эта эпоха образования горючих ископаемых (каустобиолитов) хронологически соответствует австрийской фазе тектонической активности земной коры, которая в преде-

лах Атлантического океана выразилась в поднятии дна выше уровня моря.

Следующая эпоха накопления органического углерода каустобиолитов связана с поднятием дна Атлантического океана в ларамийскую фазу тектонической активности земной коры и датируется ранним кайнозойем. Лигниты этого возраста вскрыты в скважине на подводном плато Роколл. В Индийском океане на том же стратиграфическом уровне (координаты скважины 11°20,21' ю. ш. и 88°43,08' в. д., глубина океана 1655 м) также установлены лигниты. Приведенные авторами соответствующих отчетов характеристики петрографического типа угля в целом, в особенности же замечание об автохтонном происхождении лигнита из скважины в Индийском океане, по мнению Пронина, резко ограничивают попытки некоторых сторонников теории перманентности океанов и тектоники плит объяснять наличие каменных углей под дном океанов тем, что они были занесены туда «вездесущими» турбидитовыми потоками (сuspensionными, мутьевыми) без какого бы то ни было загрязнения материала углей в пути песком и илом.

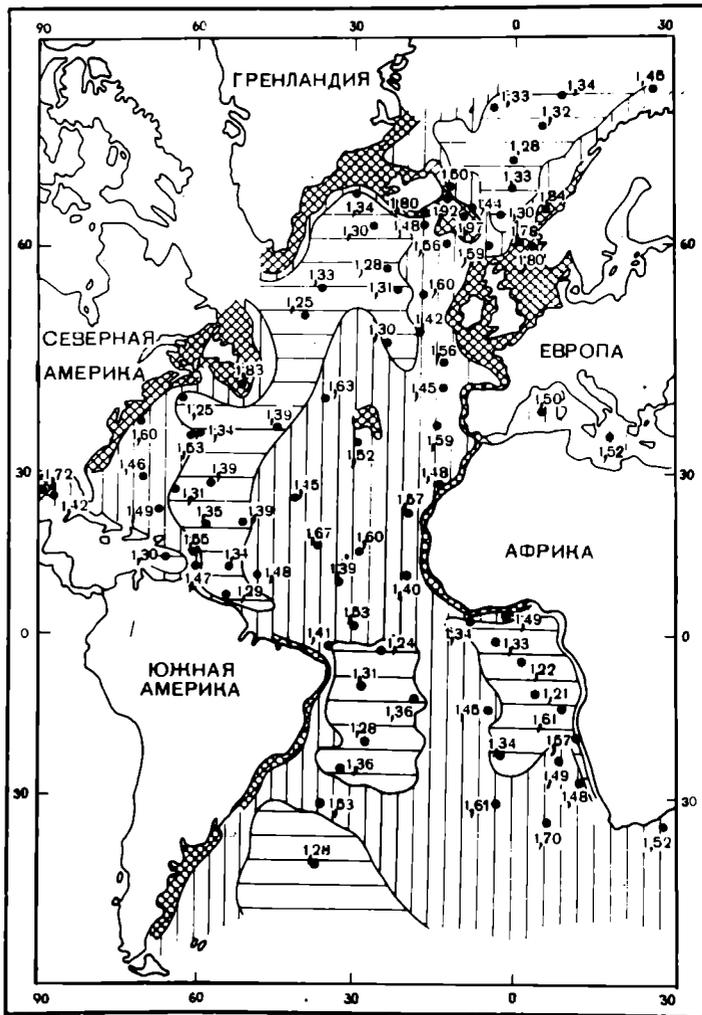
Самая молодая угленосная формация, соответствующая позднеальпийской фазе тектонической активности земной коры, также образовалась в период осушения отдельных участков поверхности океанического дна. Такая угленосная формация, датируемая ранним или началом среднего миоцена, установлена в скважинах, пробуренных на атолле Мидуэй в группе Гавайских о-вов Тихого океана.

«Доклады АН СССР», 1978, т. 241, № 6, с. 1406—1408.

Океанология

Плотность осадков Атлантического океана

В Институте океанологии им. П. П. Ширшова АН СССР



Карта плотности [г/см³] поверхностного слоя осадков дна Атлантического океана: области с густой штриховкой — >1,7; с вертикальной штриховкой — 1,4—1,7; с горизонтальной штриховкой — <1,4.

составлена новая карта плотности поверхностного слоя осадков дна Атлантического океана.

Плотность, или объемный вес, осадков относится к числу важнейших, так называемых массовых физических свойств, характеризующих осадок в целом. Первые сведения о плотности поверхностного слоя осадков в масштабе всего Ат-

лантического океана были представлены на карте, подготовленной в Акустическом институте АН СССР и опубликованной в 1975 г. Позднее А. В. Ильин, И. И. Шурко (Институт океанологии АН СССР), а также Е. М. Емельянов (Атлантическое отделение Института океанологии АН СССР), В. В. Орленок (Калининградский государственный университет), В. И. Мельник и В. Х. Геворкьян (Институт геологических наук АН УССР) получили новые данные о плотности осадков в Атлантическом океане примерно на 200 геологических станциях. Изучался слой осадков толщиной от 0—2 до 0—15 см (авто-

ры отмечают, что в указанном интервале плотность может изменяться с глубиной, как правило, возрастать, на 10% и более).

Главным итогом проведенного исследования и явилась новая карта, на которой выделяются три основных градации плотности: $< 1,4$; $1,4—1,7$; $> 1,7$ г/см³. Самые низкие значения приурочены ко дну глубоководных котловин, покрытых глинистыми и диатомовыми илами; средние соответствуют карбонатным и терригенным песчано-алевритовым отложениям материкового подножия, Срединно-Атлантического хребта и глубоководных поднятий; максимальные характерны для терригенных, вулканогенных и карбонатных осадков шельфа.

Если сопоставить карту плотностей с батиметрической картой дна Атлантического океана, между ними обнаруживаются существенные различия. Главное заключается в том, что карта плотностей имеет асимметричный вид относительно оси Срединно-Атлантического хребта. К западу от него полоса низких значений плотности простирается через весь океан, прерываясь лишь на положительных формах рельефа (шельф Исландии, возвышенность Демерера, палато Рио-Гранде). В восточной части океана отмечается только один обширный район низких плотностей, соответствующий Гвинейской и Ангольской котловинам. Небольшой участок сравнительно низких плотностей ($1,3—1,4$ г/см³) располагается также в глубоководной Западно-Европейской котловине.

Такую четкую географическую асимметрию распределения значений плотности (в общем, более плотные осадки характерны для восточной части океана, а менее плотные — для западной) авторы объясняют разными скоростями образования осадков, неравномерным распределением золотого материала и аморфного кремнезема.

Приведенные авторами данные характеризуют плотность лишь рыхлого осадочно-го материала (песчано-алеври-

то-пелитового состава), не затрагивая разнообразных включений в осадочную толщу (железо-марганцевых конкреций, материала ледового разноса, каменных обломков другого происхождения), — интегральная плотность донных осадков с этими включениями будет значительно выше.

«Доклады АН СССР», 1978, т. 241, № 6, с. 1432—1435.

Геология

Железо-марганцевые конкреции в осадках океана

С тех пор как огромные залежи железо-марганцевых конкреций найдены на поверхности океанического дна, специалисты не переставал заниматься вопросом о вероятности их нахождения в толще самих осадков. Многократно были описаны случаи обнаружения конкреций в пробах, взятых грунтовыми трубками на глубине 6 и более метров под поверхностью дна.

Как показывают радиоизотопные измерения¹, рост конкреций после погребения их осадками прекращается, поэтому все ныне погребенные конкреции могли сформироваться только на поверхности осадочных отложений. Сравнительно недавно было установлено, что скорость роста конкреции примерно в 1000 раз меньше, чем скорость накопления осадков, на которых они лежат². Это указывает на неизбежность погребения конкреции еще в начальных стадиях их формирования. Очевидно, так называемые красные океанические глины и металлоносные осадки, обогащенные микростяжениями железа и марганца, отражают ход этого процесса. Тем не менее на дне океанов известны целые поля конкреций, именуемые «марганцевыми мостовыми».

Обычно они приурочены к районам с сильными донными течениями, смывающими тонкодисперсный илистый осадок. Такие образования можно рассматривать как исключительное явление на фоне нормального процесса накопления осадков, при котором основная масса конкреций должна находиться в погребенном состоянии. Казалось бы, можно было признать реальность сделанного Г. Менардом³ предположения, что в осадках океана погребено в 7—8 раз больше конкреций, чем находится на поверхности дна. Однако это предположение не подтвердилось результатами исследований 370 скважин глубоководного бурения.

Обобщение данных, полученных в первых более чем 40 рейсах научно-исследовательского бурового судна «Гломар Челленджер», позволило установить⁴, что только в 51 из исследованных скважин (что составляет 14%) на различных горизонтах встречены железо-марганцевые конкреции. Даже если учесть, что ряд скважин был пробурен в районах, заведомо исключающих возможность образования конкреций из-за больших скоростей осадконакопления (континентальные шельфы, район Красного моря и т. д.), процент обнаружения конкреций все равно будет невысоким.

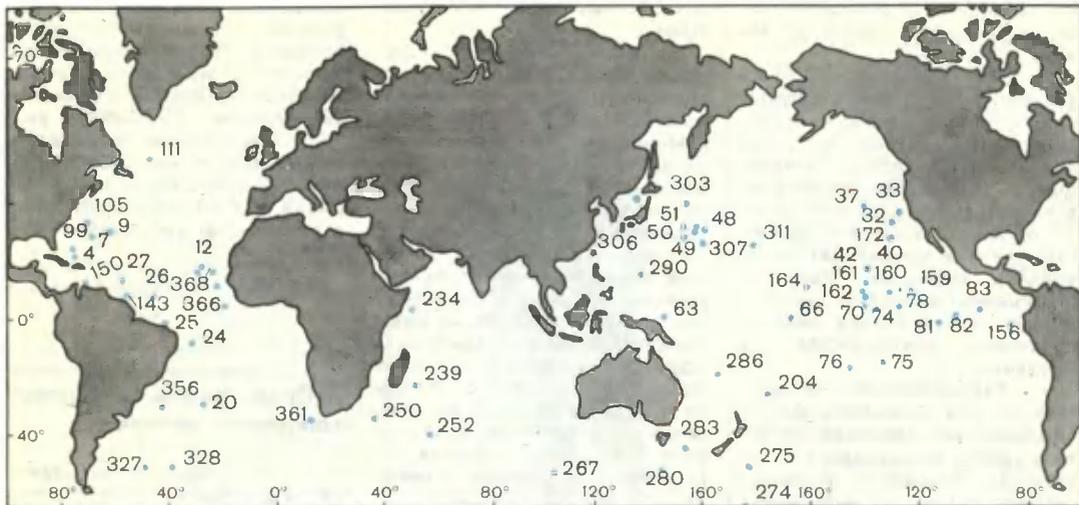
Наибольшее количество конкреций встречено в экваториальной и северной частях Тихого океана, в то же время неожиданно высокий процент отмечен в Атлантическом океане. Определение возраста осадков, вмещающих конкреции, показало, что 49% их относится к плейстоцену-плиоцену (до 11 млн лет), 43% — к миоцену-олигоцену-эоцену-палиоцену (до 67 млн лет), 8% образовалось в меловую и юрскую эпохи (100—150 млн лет). К ограниченному перио-

¹ Ku T. L., Broecker W. S. — «Deep-Sea Research», 1969, v. 16, p. 625—637.

² Там же.

³ Menard H. W. — «American Scientist», 1976, v. 64, No 5.

⁴ Glasby G. P. — «Marine Geology», 1978, v. 28, No 1/2.



Распространение железо-марганцевых конкреций в осадках Тихого океана. Показано местонахождение скважин, в которых встречены железо-марганцевые конкреции, микроконкреции и прочие стяжения.

ду времени — плейстоцену — относится 42% конкреций. Эти данные свидетельствуют, что конкреции больше характерны для современных геологических образований. Вероятно, процент этот несколько занижен, так как не всегда можно однозначно сопоставлять возраст конкреций с возрастом вмещающего осадка. Конкреции могут образовываться только в периоды перерыва в процессе осадконакопления и потому покориться на осадках, значительно более древних. Такие перерывы подтверждены результатами изучения керн глубоководного бурения: во многих скважинах фиксируется отсутствие процесса накопления осадков на протяжении значительных отрезков геологического времени.

Можно считать, что такая картина характерна для всей осадочной толщи океанов и связана с изменениями скоростей и направлений донных течений, с тектоническими движениями океанического дна. Например, на о-ве Тимор был

найден хорошо сохранившийся образец погребенной железо-марганцевой конкреции, приуроченной к глубоководным красным глинам мелового возраста. В это время Австралия и Антарктида были объединены и круговое Антарктическое течение проходило севернее Австралии, где и могли создаться условия, благоприятные для формирования конкреций. Тиморская конкреция — это, очевидно, аналог конкреций, залежи которых в виде «мостовых» расположены сейчас на юге Тасманова моря и на юго-востоке Индийского океана.

Сравнительно полный разрез осадочной толщи удалось получить в Аргентинской котловине в Атлантике (скважина 328). Судя по тому, что здесь с достаточно высокой частотой конкреции встречаются в осадках олигоценового возраста, можно предположить, что пролив Дрейка открылся раньше, чем началось отделение Австралии от Антарктиды. Находки конкреций в скважинах глубоководного бурения могут дать, таким образом, интересную информацию о геологическом прошлом Мирового океана, хотя основная их масса и приурочена к современным осадкам.

Е. С. Базилевская,
кандидат геолого-минералогических наук
Москва

Геофизика

Животные предупреждают о землетрясениях

Сотрудники Калифорнийского университета в Дейвисе — геолог-сейсмолог К. Л. Верозуб, зоологи Б. Л. Харт и Д. Л. Лотт и антрополог М. Хауэлл — прибыли через трое суток на место землетрясения, происшедшего 22 ноября 1977 г. в районе Уиллитса (примерно в 200 км к северо-западу от Сан-Франциско, Калифорния). Они в течение полутора месяцев опросили около 3 тыс. жителей окрестных населенных пунктов, не замечено ли теми каких-либо странностей в период, предшествовавший подземному толчку, интенсивность которого достигала 5,0 по шкале Рихтера.

В семнадцати из пятидесяти хозяйств были получены сведения о том, что домашние животные проявляли в это время различные признаки беспокойства. Например, скаковой конь арабской породы, обычно весьма спокойный, за 4 часа до землетрясения начал лгать ограду своего стойла, так что его пришлось перевести в открытый загон. (Остальные лошади вели себя в это время нормально.) Принадлежащий другой семье доберман-пинчер перед подземным толчком яв-

но нервничал, возбужденно лаял, отказывался отойти от хозьяв и т. д.

Для обеспечения объективности показаний исследователи никаких наводящих вопросов не задавали. Почти все владельцы животных, заявившие об отсутствии отклонений в их поведении, слышали прежде о наблюдавшихся в подобных случаях изменениях в поведении животных. Один из опрошенных даже был «разочарован», что его гуси никаких признаков беспокойства не проявили.

Распределение положительных или отрицательных сообщений оказалось неслучайным: почти все сведения о необычном поведении животных сосредоточены в небольшом районе к северо-востоку от Уиллитса, что указывает на присутствие именно здесь определенного физического фактора, вызвавшего отклонения в поведении животных. Однако точную оценку этих явлений пока дать трудно, так как эпицентр землетрясения, определенный по данным сейсмологов Калифорнийского университета, лежит в 8—10 км к северу от эпицентра, установленного по данным Управления геологической съемки США.

Цель подобных исследований — попытаться обнаружить те доступные чувствам животных физические факторы, которые могут быть объективно названы предшествующими землетрясениям.

«Science News», 1978, v. 113, № 17, p. 278 (США).

Океанология

Вихри в Средиземном море

Во время второго рейса научно-исследовательского судна Института океанологии АН СССР «Профессор Богоров», проходившего в январе — мае 1977 г., в западной части Средиземного моря с помощью системы буйковых станций зафиксированы вихре-

вые системы различных масштабов.

В центральной части бассейна обнаружен громадный циклонический вихрь поперечником около 250 км, простирающийся от поверхности моря до самого дна. На границах бассейна зафиксированы вихри меньшего масштаба — поперечником 75—150 км и сравнительно небольшой глубины. Под этими вихрями глубинные течения сохраняли направления средней циркуляции воды, переносящейся в Средиземном море в основном в направлении с запада на восток. И только у африканского и европейского побережья на всей глубине наблюдались течения, которые можно отнести к звеньям средней циркуляции.

«Доклады АН СССР», 1978, т. 239, № 6, с. 1453—1454.

Климатология

Впереди — малая ледниковая эпоха!

Английский палеопалинолог М. Келли (Отдел климатологических исследований Норвичского университета), изучая ископаемую пыльцу растений, взятую на Баффиновой Земле (Канадский Арктический архипелаг), обнаружил существование 200-летней цикличности в интенсивности ветров, переносящих пыльцу деревьев на Баффинову Землю с юга, где проходит граница леса. Расстояние от открытой тундрой Баффиновой Земли до ближайших лесных массивов составляет несколько сот километров. Предположение о существовании 200-летней цикличности в явлениях погоды делались некоторыми специалистами и ранее, например на основании изучения солнечной активности. Если заключение Келли подтвердится, в Великобритании около 2070 г. зимы должны стать морозными и многоснежными.

Сотрудник того же учреждения историк Д. Андерхилл собрал материалы, свидетельствующие, что картина погоды в текущем десятилетии весьма сходна с той, что на-

блюдалась в 1770-х годах (ему удалось проанализировать большое число дневниковых записей о погоде, сделанных многими сельскими священниками Англии в XVII—XVIII вв.).

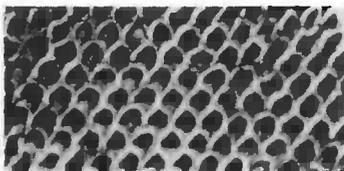
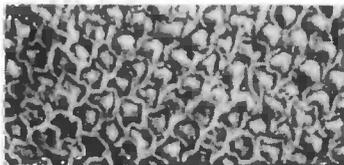
Упомянутые исследования указывают на возможность начала малого ледникового периода в Северном полушарии в ближайшие десятилетия¹.

«New Scientist», 1978, v. 79, № 1115, p. 405 (Великобритания).

Антропология

Зубная эмаль и происхождение человека

Зубы подчас оказываются единственным свидетельством строения ископаемых



Микрофотографии строения зубной эмали. Очертания призм у современного человека (верхний снимок), напоминающие замочную скважину, весьма сходны со строением призм у ископаемого рамапитека (снимок в середине). Округлые очертания призм у современных человекообразных обезьян (орангутанга) ясно видны на нижнем снимке.

¹ В данном прогнозе не учитывается антропогенное воздействие на климат с тенденцией на потепление (Прим. ред.)

гоминоидов, таких, например, как рамапитек. Однако морфологический анализ разрозненных находок подобного рода не всегда дает четкий ответ на вопросы, касающиеся адаптации и филогении организмов. Поэтому нередко одни и те же материалы приводят различных исследователей к разным выводам.

Новый аспект исследований в этой области связан с использованием электронной микроскопии для анализа строения зубной эмали. Американские антропологи Д. Дж. Гант (Университет им. Вашингтона в Сент-Луисе), Д. Пилбим (Йельский университет в Нью-Хейвене) и Г. П. Стюард (Южно-Иллинойский университет в Карбондейле) подвергли сравнительному изучению форму призм зубной эмали у *Homo sapiens*, рамапитека и различных человекообразных обезьян.

Особенно четким оказалось различие в очертаниях призм у современного человека (форма напоминает замочную скважину) и современных человекообразных обезьян (округлые очертания). С другой стороны, исследователи обнаружили удивительное сходство между строением призм зубной эмали человека и ископаемого рамапитека (*Ramapithecus punjabicus*) — древнейшего из известных нам гоминоидов. Это, очевидно, первая количественно различимая характеристика, применимая в данной области и прямо указывающая, что рамапитек является предком человека.

«Science News», 1977, v. 112, № 25, p. 405 (США).

Археология



Фигурка викинга в одежде XIII в. Дерево. Баффинова Земля [Канадский Арктический архипелаг].

режье Гудзонова пролива вещественные доказательства контактов между предками современных эскимосов и древними викингами.

При вскрытии затопленного грунтовыми водами пола землянки была найдена резная деревянная фигурка высотой 5,3 см, изготовленная, очевидно, из ели. До сих пор резные изделия древних эскимосов неоднократно встречали при раскопках в различных местах Гренландии; на территории же Северной Америки они обнаружены впервые.

Специалисты по древнескандинавской культуре Д. и Дж. Сабо, принимавшие участие в экспедиции, полагают, что эта фигурка изображает викинга. На человеке — длиннополая одежда с капюшоном и спереди со складкой от пояса до подола; на груди различим крест — такая одежда и убранство могли принадлежать только норманнам (викингам) XIII в.; позднее они уже отказались от подобного костюма.

В пользу этого утверждения говорит и тот факт, что

рядом с фигуркой обнаружено несколько предметов эскимосской материальной культуры, почти полностью идентичных ранее найденным в районе Туле (Гренландия) и уверенно датированных XIII в.

Таким образом, получено новое свидетельство ранних контактов между абorigенами Нового света и скандинавами.

«Science News», 1978, v. 113, № 9, p. 137 (США).

Организация науки

Награды за экологические работы

На VI Международном экологическом симпозиуме, состоявшемся в декабре 1977 г. в Ровигио (Италия), была высоко оценена деятельность Организации Объединенных Наций по вопросам образования, науки и культуры (ЮНЕСКО).

За проведение международной программы «Человек и биосфера» ЮНЕСКО вручена «Золотая медаль за экологию». Как сказано в почетном дипломе, она присуждена «в связи с незаурядным вкладом этой организации в познание экологии дельты крупнейшей рек мира» (составной части программы «Человек и биосфера»). В дипломе отмечается также важность разработанного при этом комплексного подхода к проблеме, включающего естественные и социальные аспекты как единое целое.

Двух других таких же медалей были удостоены главный редактор журнала «Экологист» Э. Голдсмит, автор нескольких книг по экологии, и научный корреспондент итальянской газеты «Коррьере делла сера» А. Седерна, неоднократно выступавший с проблемными статьями по вопросам экологии.

«Nature and Resources», 1978, v. XIV, № 1, p. 17 (Париж, ЮНЕСКО).

Контакты эскимосов с викингами

Антрополог М. С. Максвелл (Университет штата Мичиган в Ист-Лансинге), проводивший с коллегами исследования на о-ве Баффинова Земля (Канадский Арктический архипелаг), обнаружил на побе-

▼ В КОНЦЕ НОМЕРА

Герб Грегора Менделя

И. Сайнер,

доктор медицинских наук

Брно (Чехословакия)

Как известно, основоположник современного учения о наследственности Грегор Мендель был монахом. На основе многолетних опытов по гибридизации растений, проводившихся в тиши монастырских садов, ему удалось раскрыть основные закономерности наследственности [1865]. При жизни Грегора Менделя его замечательное открытие не обратило на себя внимания и не заслужило признания. Лишь спустя 16 лет после смерти Менделя, в 1900 г., рядом ученых одновременно была вновь обнаружена и экспериментально подтверждена его классическая работа. На основе вскрытых им закономерностей, получивших название менделизма, возникла и стала бурно развиваться генетика. Однако путь развития новой науки был сложным и ее основные положения неоднократно подвергались как нападкам, так и извращению. При этом часто использовалось то обстоятельство, что ее основоположник был духовным лицом.

Церковники всячески пытались доказать религиозность Менделя и утверждали, что его опыты были проведены для опровержения теории Дарвина. Наоборот, противники менделизма, в том числе и в нашей стране, при отрицании установленных Менделем закономерностей также нередко ссылались на принадлежность его к духовенству и на этом основании объявляли менделизм мракобесным, идеалистическим учением.

Между тем все, что известно о личности и взглядах Менделя, опровергает утверж-



Грегор Мендель [1822—1884].

дения и тех и других. Прежде всего, по признанию самого Менделя, он пошел в монахи из-за материальной нужды, не позволившей ему продолжить образование, чтобы стать учителем естествознания. Эту свою мечту Менделю удалось осуществить. Когда он получил сан священника, то вскоре был освобожден от исполнения церковных обязанностей и полностью перешел на преподавательскую работу в средних учебных заведениях. В течение 14 лет Мендель преподавал в реальном училище Брно физику и природоведение. Одновременно все свое свободное время он посвящал опытам по

гибридизации и селекции растений, а также пчеловодству и метеорологии. Лишь после избрания в 1868 г. настоятелем монастыря Менделю пришлось оставить преподавательскую работу, а свои научные эксперименты он продолжал урывками. В 1873 г. он писал К. Нэгли: «Я чувствую себя поистине несчастным оттого, что вынужден забросить мои растения и пчел».

Таким образом, все, что мы знаем о Менделе, рисует нам образ человека, преданного интересам науки. Это подтверждается и в публикуемой ниже статье И. Сайнера о гербе Менделя? Создавая свой герб, известный нам в двух вариантах — цветном и черно-белом, Мендель не соблазнился возможностью приукрасить его лишними рыцарскими и богословскими символами. Напротив, он вносит в него элементы, с помощью которых выражает свою приверженность к сельскому хозяйству и растениеводству. В этом смысле нам представляется интересным ознакомить читателей «Природы» с описанием герба Менделя, выполненным с большим знанием дела чешским историком из Университета им. Я. Э. Пуркине (Брно). Эта заметка (мы печатаем ее с небольшими сокращениями) была опубликована в ежегоднике Моравского музея в Брно «Folia Mendeliana» за 1974 г.

* По установившейся традиции каждый прелат обязан был иметь свой герб.

После своего избрания настоятелем (прелатом) августинского монастыря св. Томаша в Старом Брно (31 марта 1868 г.) Грегор Мендель распорядился сделать себе личный герб. Мендель основывался при этом на старом законе, по которому каждый настоятель имеет право сам выбрать себе герб, и поручил автору, имя которого неизвестно, изготовить его, по всей вероятности, в соответствии со своими собственными указаниями.

Цветной герб Менделя, украшающий потолок монастырской библиотеки, согласно правилам геральдики, можно описать следующим образом¹.

На квадратном щите, в верхнем правом голубом его поле изображена лилия, геральдически наклоненная вправо, с двумя листьями и двумя цветками, естественной окраски. В левом верхнем черном поле, в его нижней части изображен плуг, а в верхней части золотой крест с венцом из золотых лучей. В правом нижнем красном поле видны две руки в рукопожатии, со своеобразным положением указательного пальца правой руки. Над руками висит пылающее и пронзенное сердце. Все это изображено в натуральном цвете.

Над щитом находится щитодержатель, а также расположенная справа прелатская митра, слева — прелатский изогнутый посох, а на самом верху — черная прелатская шляпа, из днища которой спускается с двух сторон золотой шнур с шестью золотыми кистями. Под щитом находится золотая прелатская цепь с крестиком.

Черно-белый вариант герба Менделя отличается от цветного следующим образом. В правом верхнем поле находятся две лилии с цветками. В левом верхнем поле крест



Библиотека августинского монастыря св. Томаша в Старом Брно.

над плугом окружен не венцом из лучей, а лавровым венком. В правом нижнем поле изображена направленная вправо рука в белом облачении, держащая сердце. В левом нижнем поле между А и Ω находится не знак равенства (=), а двоеточие. Под щитом справа расположен командорский крест с цепью; слева — прелатская цепь с крестиком. Изображенные на щите щитодержатель, прелатская митра, прелатский посох и прелатская шляпа со шнуром и кистями в общем не отличаются от подобных же частей цветного герба.

Очевидно, это более поздний вариант герба. Мендель мог распорядиться изготовить его не ранее 1872 г. Как раз 21 марта 1872 г. император Франц Иосиф наградил Менделя командорским крестом «в знак признания заслуженных и патриотических деяний».

В пользу того, что изображенный в библиотеке монастыря герб является первоначальным, говорит то обстоятельство, что прелатская печать Менделя, которую он сразу же после своего избрания прелатом использовал в служебных делах, идентична этому гербу в своем начертании.

К описанию герба Менделя нужно прибавить, что это исключительно его личный герб. Так как Мендель происходил из крестьян, у него не могло быть семей-

¹ По правилам геральдики, т. е. по правилам составления и описания гербов, правая и левая сторона в гербе определяются от лица, несущего щит.



Цветной герб Менделя, изображенный на потолке библиотеки монастыря св. Томаша.

ного герба, и никто не мог получить его личный герб в наследство.

Лилии, по-видимому, указывали на связь Менделя с ботаникой. В религиозной символике лилии означали чистоту и целомудрие. Крест символизировал веру. Насколько мне известно, плуг не является религиозным символом. Можно полагать, что изображением плуга на своем гербе Мендель хотел показать свою принадлежность к земледельческому сословию, из которого он происходил, а также, возможно, подчеркнуть свою связь с сельскохозяйственной наукой. Две руки, соединенные в рукопожатии,— это символ постоянства, дружбы и верности. Своеобразное положение или прижатие указательного пальца правой руки могло быть интимным знаком принадлежности к одному из тайных обществ.

Плавающее сердце символизирует горячую любовь к богу. По-моему, оно не может означать принадлежности Менделя к ордену св. Августина, так как символом этого ордена было плавающее сердце, пронзенное стрелой, острие которой покоится на книге. Между A и Ω правильнее было бы поставить знак $+$ (плюс), а не знак равенства ($=$), как изображено на цветном гербе. Библейское выражение «Аз есмь альфа и омега» напоминает, что начало и конец всего сущего в боге. Рука, держащая крест, означает веру в Христа.

На принадлежность шляпы настоятелю ясно указывает ее черный цвет (в отличие от пурпурной кардинальской и зеленой епископской). Число золотых кистей соответствует рангу епископа. Прелатская митра и прелатский изогнутый посох (при том, что его изгиб направлен к оси цита, тогда как епископский посох должен быть изогнут к внешней стороне) явно свидетельствуют, что настоятель монастыря в Старом Брно, хотя и не является епископом, обладает его правами.

На вопрос, почему в черно-белом варианте герба на правом нижнем поле был изменен рисунок, можно ответить так. Первоначальный герб мог свидетельствовать о возможной причастности Менделя к одному из тайных обществ. Позднее ему показалось более разумным не выставить этого напоказ. Во время понтификата папы Пия XI (при котором была провозглашена непогрешимость



Черно-белый вариант герба Менделя.

папства) усилилась борьба Ватикана с масонством и другими подобными обществами. Понятно поэтому, что и Мендель, будучи представителем высшего сановного духовенства, должен был соблюдать в этом плане осторожность.

В пользу возможной принадлежности Менделя к одному из тайных обществ свидетельствуют два письма среди оставшихся после него бумаг. Мы имеем в виду письма доктора медицины Вильгельма Бесера, председателя Лейпцигского общества гармонической философии. Нет никаких оснований сомневаться, что эти письма, из которых явствует, что адресат «обнаружил интерес к гармонической философии»,— были адресованы Менделю.

Введение и перевод с немецкого
доктора биологических наук
А. Е. Гайсиновича

Художник П. Г. АБЕЛИН
Художественные редакторы:
Л. М. БОЯРСКАЯ, Д. И. СКЛЯР,
Корректоры:
Т. М. АФОНИНА, Т. Д. МИРЛИС
Адрес редакции: 117049
Москва, В-49, Мароноцкий пер.,
26. Тел. 237-50-30, 237-22-97.

Сдано в набор 10.XI-1978 г.
Подписано к печати 14.XII-1978 г.
Т-17570
Формат бумаги 70×100 1/16.
Офсет
Усл.-печ. л. 10,4. Уч.-изд. л. 14,9.
Бум. л. 4
Тираж 85 000 экз. Зак. 2596.

Чеховский полиграфический
комбинат Союзполиграфпрома
при Государственном комитете
СССР по делам издательства,
полиграфии и книжной торговли.
г. Чехов Московской области.



Цена 50 коп.
Индекс 70707

