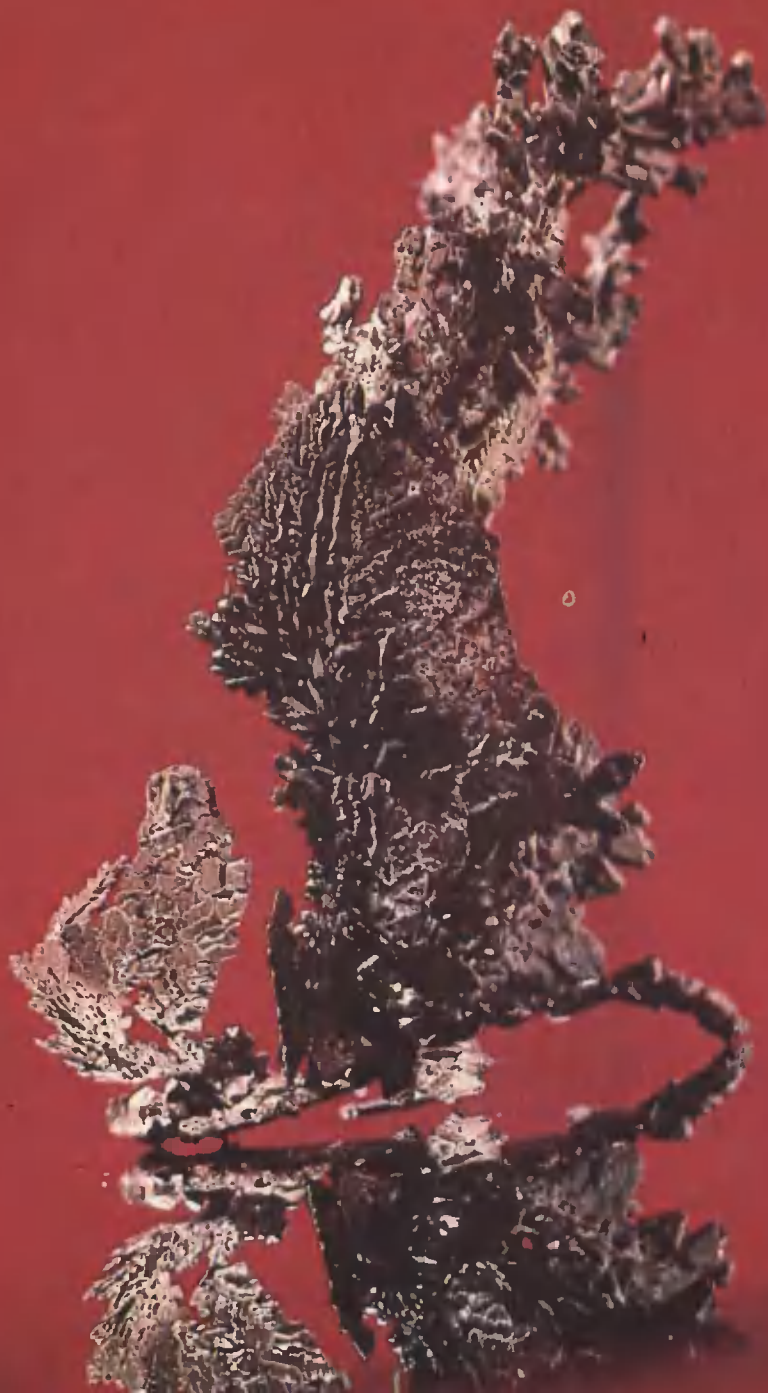


ISSN 0032-87X

# З. ПРИРОДА

1981



Ежемесячный  
популярный  
естественнонаучный  
журнал  
Академии наук СССР

Основан в 1912 году



## 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

Доктор биологических наук  
А. Л. БЫЗОВ

Заместитель главного редактора  
В. А. ГОНЧАРОВ

Доктор физико-математических наук  
С. П. КАПИЦА

Академик  
Б. М. КЕДРОВ

Доктор физико-математических наук  
И. Ю. КОБЗАРЕВ

Академик  
Н. К. КОЧЕТКОВ

Член-корреспондент АН СССР  
В. Л. КРЕТОВИЧ

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  
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. Подробно о программе см.: «Природа», 1979, № 1, с. 28.

На первой странице обложки. «Куст» самородной меди, состоящий из пластинчатых дендритов. См. в номере: Онищенко В. Я. Редкие формы самородной меди.

Фото Н. Н. Алексеева.

На четвертой странице обложки. Даурские лиственницы с подростом рододендрона в Сихотэ-Алинском заповеднике. См. в номере: Васильев Н. Г., Смирнов Е. Н., Подушко М. В. Сихотэ-Алинский биосферный заповедник.

Фото Г. М. Шаульского

Март 1981 года

## В НОМЕРЕ

**Антонов А. С.** Исследования биополимеров в систематике высших растений 2

**Бережинский В. С.** Вселенная в нейтринном свете 13

**Якуцени В. П.** Будущее ресурсов гелия 24

**Смирнов Е. Н., Подушко М. В., Васильев Н. Г.** Сихотэ-Алинский биосферный заповедник 32

**Юдин Н. И., Арсеньев А. А., Ручкина Ю. Р., Плотникова Л. Я.** Фосфаты в Тихоокеанском районе 46

**Назаренко Ю. И.** Влияние аномально холодной зимы в Белом море на размножение гренландского тюленя 50

**Онищенко В. Я.** Редкие формы самородной меди 52

**Иваницкий В. В.** Каменка-плясунья: поведение и жизнь в сообществе 54

### СЕРГЕЙ ИВАНОВИЧ ВАВИЛОВ

К 90-летию со дня рождения

**Марков М. А.** Из воспоминаний о С. И. Вавилове 64

**Синай Я. Г.** Случайность неслучайного 72

**Семаков В. В.** Микробные препараты в борьбе с мышевидными грызунами 81

**Бондарев Л. Г.** Роль растительности в миграции минеральных веществ в атмосфере 86

**Калашников Н. П.** Канализование и электромагнитное излучение канализованных частиц 91

**Мигдисов А. А.** Гидротермальный процесс в океане (70-й рейс «Гломара Челленджера») 100

## ЗАМЕТКИ, НАБЛЮДЕНИЯ

**Резанов А. Г.** Охотничье поведение сапсана на зимовке [103].  
**Григорьев О. В.** Брачные игры сибирского углозуба [104]

## НОВОСТИ НАУКИ

106

## КНИГИ, ЖУРНАЛЫ

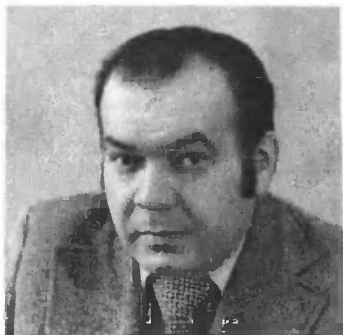
**Кобзарев И. Ю., Левин А. Е.** От осцилляторов к квантам: идеи, тексты, люди 121

## НОВЫЕ КНИГИ

126

## Исследования биополимеров в систематике высших растений

А. С. Антонов



Андрей Сергеевич Антонов, доктор биологических наук, заведует отделом эволюционной биохимии Межфакультетской проблемной лаборатории им. А. Н. Белозерского Московского государственного университета. Основные научные интересы — исследование эволюции биополимеров.

Среди множества проблем, волнующих умы современных биологов, особое положение занимает одна, древняя, как сама биология: каким образом возникло все разнообразие живого, каков был путь от гипотетических «праклеток» до ныне существующих видов живых существ, какие процессы лежали в основе их становления? Решением этой проблемы занимается, пожалуй, самая древняя из биологических дисциплин — систематика.

Развитие систематики, как и любой другой науки, в немалой степени зависело от ее методического арсенала. Исходный сравнительно-морфологический метод анализа многообразия организмов никогда не позволил бы достичь нынешнего уровня наших знаний об эволюции живого, если бы не был дополнен другими методами: сравнительно-палеонтологическим, эмбриологическим, цитологическим и генетическим. Именно использование новых методов в истории систематики не раз позволяло существенно уточнить филогенетическую историю таксонов, разработать более совершенные системы организмов.

Когда в прошлом веке в биологии появилась новая научная дисциплина — биохимия — ее методы вскоре были также использованы для сравнительного изучения различных организмов. Вначале успехи были весьма скромными, но уже к началу

нашего века эволюционная биохимия прочно стала на ноги. По мере развития биохимии и особенно с возникновением молекулярной биологии вклад биохимии в систематику становился все более весомым.

По причинам как историческим, так и чисто практическим (легкость анализа) в центре внимания исследователей долгое время были относительно низкомолекулярные вещества: липиды, углеводы, алкалоиды, пигменты и многие другие, так называемые вторичные вещества растительных клеток. Важная роль белков была понята давно, но их сравнительное изучение было сильно затруднено: молекулы белков устроены неизмеримо сложнее молекул вторичных соединений. Поэтому широкое применение нашли тогда косвенные методы сопоставления, например иммунологические.

Быстрое развитие аналитической биохимии и биофизики нуклеиновых кислот и белков, выяснение ключевой роли этих соединений в жизнедеятельности позволили за последние двадцать лет разработать ряд принципиально новых методов и направлений в эволюционной биохимии. Сегодня особое внимание исследователей привлекают именно нуклеиновые кислоты и белки — важнейшие биополимеры растительных клеток. Нуклеиновые кислоты играют центральную роль в процессах хра-

нения и передачи наследственной информации (ДНК) или на самых первых этапах ее реализации в онтогенезе (РНК). Белки, как и РНК,—это первичные продукты функционирования генов. Чтобы подчеркнуть тесную связь этих соединений с процессами хранения и преобразования наследственной информации, Ф. Цукеркандль и Л. Полинг предложили выделить их в особую группу «семантид» (от греч. *σημασία* — знак) и противопоставили их «эписемантидам», т. е. всем прочим, вторичным веществам растительной клетки, не связанным столь непосредственно с этими процессами (липиды, углеводы, пигменты, алкалоиды и пр.).

Первые результаты, полученные при изучении семантид новыми методами, позволяют считать, что такие исследования могут оказать на развитие систематики растений заметное влияние: таким путем можно прямо анализировать механизмы и пути эволюции генотипов растений, что очень нелегко делать «классическими» методами, т. е. через анализ их фенотипов.

Хотя важность сравнительных исследований семантид растений для систематики сегодня мало кто решается оспаривать, полученные результаты оценивают неодинаково. Согласно одной точке зрения, которую разделяет автор, сравнительный анализ генетического материала растений, их ДНК, т. е. исследования по геносистематике, представляет более перспективное направление, чем исследование генопродуктов (РНК и белков), но многие придерживаются противоположной позиции.

Данные, полученные в последние годы, позволяют все же считать более обоснованной первую из высказанных выше точек зрения. Анализ этих результатов и обсуждению перспектив развития биохимической систематики и посвящена эта статья.

#### СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ БЕЛКОВ

Большинство систематиков признает, что сопоставления аминокислотных последовательностей, свойств ферментов, а также результаты, полученные с помощью различных электрофоретических или иммунологических методов, уже дают ценную информацию о степени филогенетической близости тех или иных групп растений. К сожалению, далеко не каждая лаборатория может исследовать белки растений на современном уровне, так как

для этого нужны весьма сложные, дорогостоящие приборы. Успех таких экспериментов в немалой степени зависит и от уровня биохимической квалификации исследователя. Анализ большинства вторичных веществ проще, он требует меньших затрат сил и средств, и, наверное, поэтому основная масса современной литературы по хемосистематике посвящена обсуждению результатов изучения низкомолекулярных соединений. Между тем, по мнению А. Л. Тахтаджяна<sup>1</sup>, «сравнительные исследования первичных структур белков дают гораздо более объективные критерии истинной степени генетического родства ныне существующих организмов и несравненно более ценную информацию для эволюционной классификации...», чем исследования вторичных продуктов метаболизма, и эту точку зрения разделяют многие.

Возможности белковой таксономии ограничены еще несколькими обстоятельствами. Во-первых, этот метод — предел редуccionизма при анализе фенотипов растений, а чем дальше мы уходим от объекта исследования классической систематики, тем сложнее бывает обратный путь. Трактовка результатов в белковой таксономии — совсем не простая задача. Во-вторых, часто забывают, что реальный вклад в систематику возможен только после исследования структуры множества белков. Хотя современный уровень аналитической химии белка весьма высок, эту задачу нельзя решить за короткое время, так как препаративная химия (т. е. выделение и очистка растительных белков) заметно отстает.

Сегодня в белковой таксономии создалась любопытная ситуация. С одной стороны, есть методы, позволяющие с высокой точностью сопоставлять структуры некоторых хорошо изученных белков растений, определив их аминокислотные последовательности. С другой стороны, существует целый набор методов, менее точных с биохимической точки зрения, но позволяющих анализировать смеси белков, функциональная роль и биохимические свойства которых в большинстве случаев остаются неизвестными.

Казалось бы, здесь нет оснований для сомнений, и предпочтение нужно отдать

<sup>1</sup> Takhtajan A. L. The chemical approach to plant classification with special reference to the higher taxa of Magnoliophyta.— In: Chemistry in botanical classification. N. Y., L.: Acad. Press, 1974.

методу сравнительного изучения аминокислотных последовательностей белков растений, главным образом из-за возможности точных количественных сопоставлений. Когда этот метод применили для изучения белков животных (которые легче выделить в чистом виде), то за короткий срок с его помощью были получены очень интересные результаты. Вот, например, как выглядит филогенетическое древо одного из таких белков (рис. 1): видно, что степень сходства его структуры у разных видов очень хорошо согласуется с

представлениями зоологов о степени филогенетического родства этих животных. Результат поразительный, особенно если сопоставить время и усилия, затраченные на его получение, с той огромной работой, которая лежит в основе нынешних филогенетических построений зоологов.

Первые впечатляющие успехи нового направления позволяли надеяться, что и при работе с белками растений с помощью этого метода можно будет оценивать филогенетическое родство таксонов. К сожалению, ожидания эти оправдались

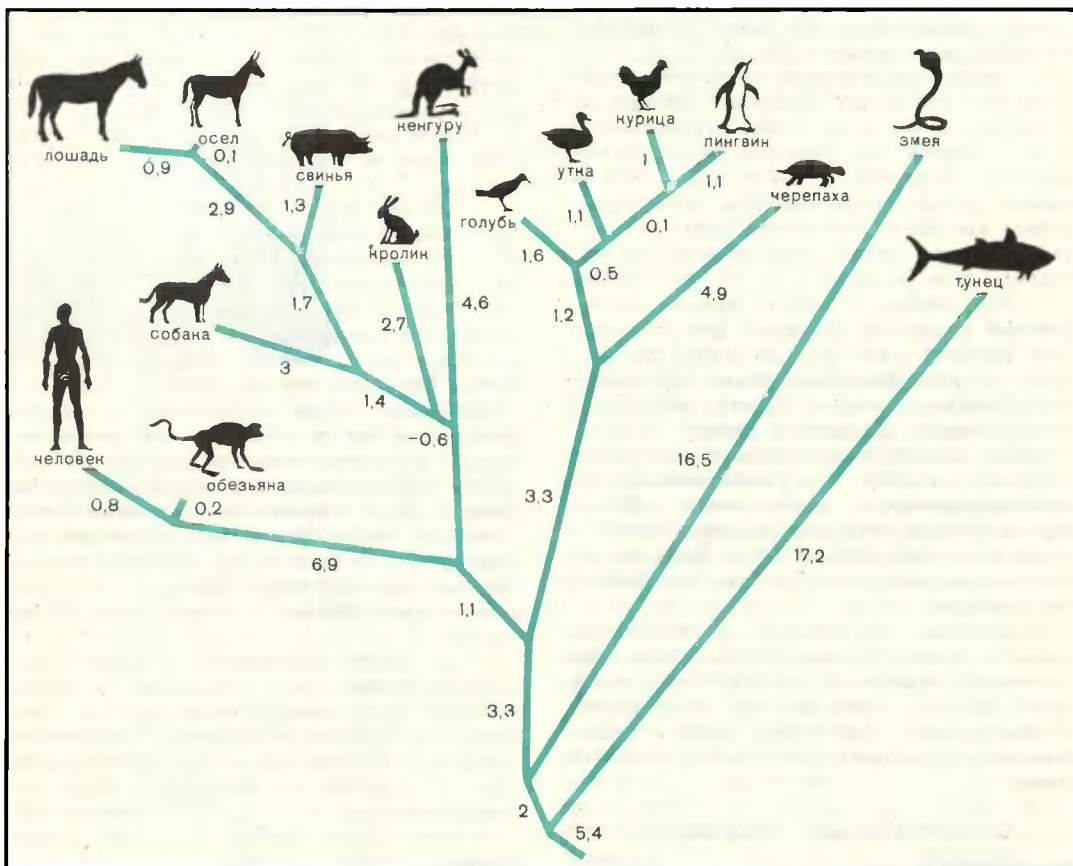


Рис. 1. Построенное с помощью компьютера филогенетическое древо для 15 видов позвоночных животных, основанное на результатах сопоставления первичной структуры цитохрома С. Цифры у ответвлений древа — минимальное число замен нуклеотидов в гене цитохрома С, которые могли бы обусловить возникновение обнаруженных различий в структуре сравниваемых белков, в % [по данным В. Фитча и Е. Марголиаш].

не полностью. Оказалось, что филогенетические древа аминокислотных последовательностей белков растений по многим важным деталям не согласуются с представлениями систематиков, что вызвало обоснованную критику и сомнения в возможностях метода<sup>2</sup>. В качестве иллюстрации рассмотрим филогенетическое древо

<sup>2</sup> Cronquist A. Brittonia, 1976, v. 28, p. 1.

(филему) пластоцианинов некоторых сложноцветных (рис. 2). Виды из одной и той же трибы<sup>3</sup> попали в разные, нередко далеко отстоящие ее ветви. Позднее, при сопоставлении этого же белка у растений из десяти разных семейств покрытосеменных также были получены результаты, которые не во всем соответствуют представлениям ботаников. Так, два вида фасоли оказались далеко отделенными от других семи видов из того же семейства. Не удалось сделать определенного вывода и о связях зонтичных, крестоцветных и

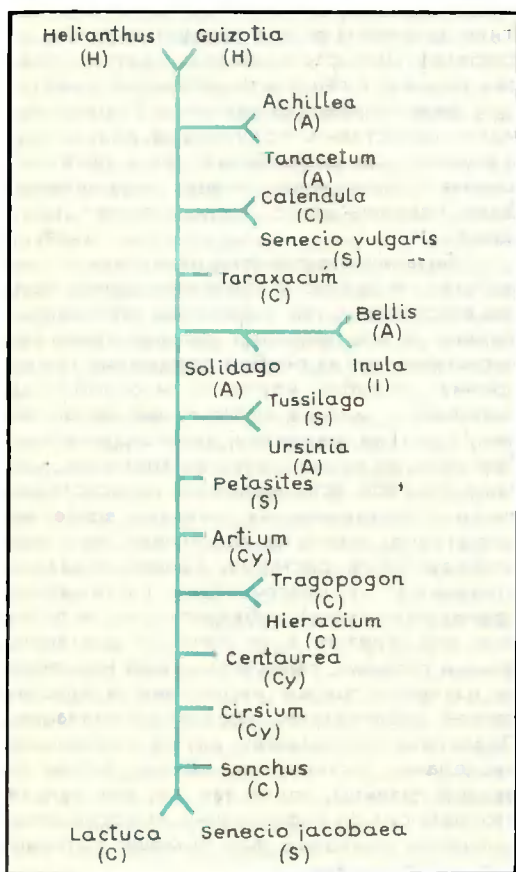


Рис. 2. Филема пластоцианинов сложноцветных [по данным Д. Боултера]. Грибы: Н — Heliantheae, А — Anthemideae, Сa — Calenduleae, S — Senecioneae, C — Cichorieae, I — Inuleae, Cy — Cynareae.

магнолиевых с другими изученными семействами. Случайны ли эти несоответствия? Быть может, все определяется неудачным выбором объекта исследования? Обратившись к результатам изучения аминокислотных последовательностей других белков растений, легко убедиться, что это не так. Так, филогенетическое древо цитохромов С растений также далеко не во всем согласуется с наиболее популярными филемами ботаников. Возникает вопрос: почему при анализе белков животных такие несоответствия встречаются гораздо реже?

А. Кронквист одним из первых попытался вскрыть причины этих несоответствий. Помимо очевидных причин (ошибки в определении последовательностей, при их сопоставлении и построении схем, возможность конвергенций и т. п.), он обратил внимание на важные различия в механизмах эволюции у высших растений и животных как на возможную причину нестабильности филем белков при увеличении числа изученных видов и их несоответствия представлениям систематиков. Примеры таких различий читатель найдет в любом пособии по генетике популяций.

Присоединяясь к выводам критического анализа А. Кронквиста, совершенно необходимо обратить внимание на один из аспектов этой проблемы, который не был им рассмотрен.

Как мне кажется, ахиллесовой пятой как метода сопоставления аминокислотных последовательностей, так и белковой таксономии вообще является недостаточность наших знаний о закономерностях эволюции ДНК растений, часть нуклеотидных последовательностей которых несет информацию о строении белков.

Между тем ведущие исследователи в этой области белковой таксономии склонны преувеличивать ее возможности. В качестве примера приведем цитату из Д. Боултера: «Данные об аминокислотных последовательностях белков у современных растений более предпочтительны (I — А.А.), чем морфологические признаки, поскольку они прямо отражают смысл генетической информации и могут быть обработаны при помощи компьютеров»<sup>4</sup>. (Я не могу не вспомнить здесь меткое замечание одного

<sup>3</sup> Таксономическая единица категории в систематике растений и животных, занимающая промежуточное положение между подсемейством и родом.

<sup>4</sup> Boulter D. Present status of the use of amino acid sequence data in plant phylogenetic studies. — In: Evolution of protein molecules. Tokyo: Jap. Sc. Press, 1978.

из моих коллег, который говорил, что ЭВМ не избавляют нас от возможности делать ошибки, скорее, они позволяют делать их в миллион раз быстрее.) «Однако, интерпретация этих результатов сталкивается с трудностями, хотя и не столь большими, как это бывает при работе с другими признаками существующих сейчас растений. С моей точки зрения, отсутствие подходящих способов обработки результатов, которые позволили бы различить конвергентное сходство и сходство по родству, является главным ограничением прогресса в этой области». Но в этом ли заключается главная беда белковой таксономии? Как будет ясно из дальнейшего изложения, мы сегодня не можем дать на этот вопрос положительного ответа.

В оправдание имеющихся расхождений специалисты в области биохимической систематики любят приводить такой довод: всегда ли несходство «химических» филем с построениями классиков говорит о недостоверности филем? Правомочно ли оценивать их исходя из того, насколько хорошо они согласуются со схемами и концепциями доминирующей школы систематиков? С моей точки зрения, неправильна сама постановка этого вопроса. Конечно, филемы классиков не есть истина в последней инстанции — они сами это признают, — но результаты анализов аминокислотных последовательностей белков нельзя сегодня использовать для их коррекции. Без знания основных принципов эволюции ДНК мы никогда не сможем высунуть закономерностей эволюции белков, а, стало быть, и отличить факт от артефакта в белковой таксономии. Многообразие механизмов эволюции генотипов растений может проявляться в непредсказуемых отклонениях скорости накопления изменений в структуре белков в отдельных филетических линиях. Именно это обстоятельство не позволяет однозначно трактовать результаты анализа аминокислотных последовательностей и накладывает серьезные ограничения на все прочие методы белковой таксономии. Как это ни парадоксально, но в настоящее время полезнее «менее количественные» методы (иммунохимия, электрофорез), так как они позволяют анализировать большие выборки видов из исследуемых таксонов. При этом легче сделать правильный вывод о родстве сопоставляемых групп растений, ибо случайные отклонения обычно не мешают уловить общую закономерность. История использования этих методов анализа белков растений в систематике описана неоднократно, и потому нет смысла заново перечислять их достоинства и недостатки.

Белковая таксономия пользуется сегодня успехом у представителей классической школы, хотя и стоит на зыбком фундаменте. Думается, что причина такой доверчивости классиков историческая: к этому направлению биохимической систематики ботаники привыкали не один десяток лет, а сомнения в его возможностях оформились лишь в последние годы.

## ИССЛЕДОВАНИЯ ДНК РАСТЕНИЙ

Если основы белковой таксономии были заложены еще в двадцатых годах, то строение ДНК растений стали изучать совсем недавно и геносистематика растений по сути дела только зарождается. Первые попытки сопоставить полученные результаты и оценить как достижения, так и потенциальные возможности нового направления были сделаны всего несколько лет тому назад.

Ботаники по-разному отнеслись к этим работам, и сейчас у геносистематики есть как сторонники, так и активные оппоненты. Далеко не все признают сегодня право геносистематики на особое положение среди прочих способов изучения многообразия растений, и многие видят в ней не более чем один из разделов хемосистематики. При этом не принимается во внимание, что само по себе использование геносистематиками биохимических методов вовсе не достаточно: важно не только как, но и что исследуется у растений. Геносистематика отличается от классической систематики (феносистематики) объектом исследования: это генотип, а не фенотип растений. Иными словами, геносистематика нацелена на изучение совсем иного, чем в классической систематике, уровня организации. Подчеркну, что между двумя основными разделами систематики нельзя провести резкой границы, точно так же, как нельзя оторвать смысл информации от последовательности символов, при помощи которых она закодирована.

Эта прописная истина упоминается здесь потому, что автору приходилось слышать из уст ботаников противоположное мнение, сформулированное следующим образом: «Исследования структур ДНК не есть исследования генотипов». Видимо, в понятие «генотип» в этом случае вкладывалось какое-то существенно отличающееся от общепринятого содержание. Если считать, что генотип — это созданная в процессе эволюции генетическая программа организма (по Э. Майру), а прог-



рамма такого рода не может существовать без некой материальной основы, то что же как не ДНК нужно исследовать для ее расшифровки?

Конечно, исследовать генотипы растений можно не только путем анализа ДНК, но и другими методами, но суть дела при этом не меняется. Так, определение первичных структур белков позволяет оценить кодирующую часть соответствующих структурных генов, т. е. небольшую часть генетического материала клетки. Такие оценки тоже могут быть использованы при сопоставлении генотипов растений, но ведущее положение в геносистематике все же занимают методы сравнительного изучения ДНК. Определяется это тем, что они к тому же свободны от многих ограничений, присущих другим подходам.

Главное достоинство геносистематики заключается в том, что конвергенция в эволюции ДНК — явление совершенно невероятное. Немаловажно также, что результаты сопоставления ДНК можно оценивать количественно. Из этого, однако, вовсе не следует, что возможности геносистематики безграничны и что она готова сказать свое слово при решении всех проблем систематики.

Поскольку изучение эволюции генотипов открыли перед систематикой принципиально новые возможности, трудно согласиться с мнением ботаника В. Н. Тихомирова, что «...расширение методического арсенала коснулось именно и только методов работы, но не повлияло на философскую и методологическую сущность систематики...»<sup>5</sup> Уместно спросить автора: а как же, по его мнению, сложилась эта сущность систематики? Не в результате ли использования в прошлом все новых и новых методов изучения многообразия растений? Если так, то почему он отказывает систематике в праве на эволюцию, основанную, среди прочих, и на достижениях геносистематики? Можно ли предполагать, что все задачи систематики уже сформулированы, а идеология ее окончательно оформилась? Позиция В. Н. Тихомирова по этому вопросу представляется недостаточно обоснованной, тем более что другие ботаники, обсуждающие проблему методологических основ современной систематики, ее не разделяют. Вот что пишет, например, А. А. Уранов: «Большие перспективы сулят ультраструктурные,

хромосомальные и биохимические, особенно ДНК-исследования, могущие перевести систематику на существенно новые рельсы»<sup>6</sup>. Наверное, ботаникам нужно сначала договориться, что же составляет суть систематики растений, а потом уже обсуждать место и роль новых направлений в ее развитии. Сегодня вряд ли стоит поэтому спорить о том, действительно ли активное развитие новых направлений «уже сказалось явно неблагоприятным образом на гармоничном развитии систематики...», как это считает В. Н. Тихомиров. Такие опасения уже высказывались: достаточно вспомнить дискуссию между А. А. Любищевым, Б. М. Медниковым и А. Н. Белозерским<sup>7</sup>.

В споре о геносистематике нередко употребляются важные для сути рассматриваемого вопроса термины, но без достаточной четкости в их определении. Вот, например, что пишет А. Л. Тахтаджян в уже цитированной статье в сборнике «Химия в ботанической классификации»: «Поскольку фенотипы являются результирующей взаимодействия генотипов и среды и сложным продуктом взаимодействия и взаимовлияния многих генов в длинной цепи эпигенетических процессов, они содержат гораздо больше эволюционной информации, чем макромолекулы, включая нуклеиновые кислоты. Часто высказываемая идея о «систематике генотипов» как конечной цели систематики поэтому в корне неверна».

Что автор понимает под информацией? Употребляется ли им этот термин в смысле «теории информации» или же как эквивалент понятия «сумма потенциально доступных сведений»? Ведь это не праздный вопрос.

Проблема взаимоотношения генотипа и фенотипа в понятиях теории информации наиболее наглядно проявляется в так называемом парадоксе Уоддингтона. По мнению его автора, с точки зрения здравого смысла вполне очевидно, что кролик, бегущий по полю, содержит значительно большее количество информации, чем только что оплодотворенная кроличья яйцеклетка. Откуда же могла взяться эта дополнительная информация? Единственное объяснение, кажущееся сомнительным как Ч. Уоддингто-

<sup>5</sup> Тихомиров В. Н. Хемосистематика и эволюционная биохимия высших растений. Тезисы докл. М., 1979.

<sup>6</sup> Уранов А. А. Методологические основы систематики (в их историческом развитии). М.: Изд-во МГПИ, 1979, с. 130—131.

<sup>7</sup> Любищев А. А. Значение и будущее систематики. — Природа, 1971, № 2, с. 15; Белозерский А. Н., Медников Б. М. Нуклеиновые кислоты и систематика организмов. — Природа, 1971, № 8, с. 9.

ну, так и геносистематикам, заключается в том, что взрослый кролик мог получить дополнительную, сверх содержащейся в зиготе информацию через траву, которую он ел.

Всякая упорядоченность, возникающая при становлении фенотипа, является по образному выражению Б. М. Медникова<sup>8</sup>, «доморощенной», и эту упорядоченность, негэнтропию, ни в коем случае нельзя отождествлять с информацией. Уместно привести здесь слова И. И. Шмальгаузена: «В пределе фенотипическое разнообразие форм определяется генотипическим разнообразием, причем количество фенотипической информации равно количеству наследственной информации... Вся система признаков фенотипа представляет собой конечный результат преобразования наследственной информации в процессе индивидуального развития»<sup>9</sup>.

Остается предположить, что А. Л. Тахтаджян использует термин «информация» вместо другого, приведенного выше более развернутого его варианта, но и в этом случае нет оснований для столь категорического суждения.

Сейчас уже известно, что лишь небольшая часть генетической информации прямо проявляется в фенотипе (по типу ген-признак): функции большей части ДНК нам пока неизвестны. Есть основания считать, что некоторая ее часть ответственна за регуляцию активности генов в эпигенетических процессах. Успехи в изучении структуры генов и организации ДНК в хромосомах позволяют надеяться, что функциональная роль различных фракций ДНК с каждым годом будет все яснее.

Вряд ли правильно исходить из предположения, что изучение эволюции этих фракций ДНК бесполезно для понимания путей филогенеза. Из этих рассуждений следует, что всесторонние исследования ДНК могут дать нам по меньшей мере такую же «эволюционную информацию», как и исследования фенотипов.

Замечу заодно, что идея о «систематике генотипов как конечной цели систематики» высказана была отнюдь не кем-то из геносистематиков, так что не стоит приписывать им чужие грехи. Эта цитата приведена А. Л. Тахтаджяном из статьи Ф. Добжанского, опубликованной в 1970 г. Я думаю,

что она отражает то состояние легкой эйфории, в котором находились многие под влиянием первых, но впечатляющих успехов молекулярной биологии. Сегодня преобладают более трезвые оценки роли исследований ДНК, основанные на следующей предпосылке: «... организмы обладают ... уникальным свойством, которое отличает их от неживых объектов: у них есть фенотип и генотип... Когда ... мы классифицируем организмы, классификация по фенотипу — это только первый шаг. В качестве второго шага мы пытаемся сделать заключение о генотипе — т. е. созданной в процессе эволюции генетической программе, которая имеет гораздо большую познавательную и прогностическую ценность, чем фенотип. Фенотипы могут обладать разного рода сходством, не относящимся к делу, и только анализ логически оцененного генотипа позволяет нам установить, какие сходные черты фенотипа обусловлены конвергенцией, а какие являются выражением генотипа предков»<sup>10</sup>.

Еще одна проблема, возникающая при оценке возможностей геносистематики, носит более частный характер, но также заслуживает упоминания. Речь идет о том, какова корреляция между степенью генотипического подобия, оцениваемого по сходству ДНК, и степенью фенотипического подобия. Насколько известно автору, для растений такие оценки никем не проводились, но для микроорганизмов коэффициент корреляции между степенью гомологичности ДНК и степенью фенотипического подобия, определенного методами так называемой численной или нумерической таксономии, оказался равным 0,92.

Поскольку генетический аппарат растений, особенно высших, устроен неизмеримо сложнее, чем геном бактерий, а механизм его эволюции до конца еще не понят, связь ген-признак осложнена и трудно ожидать для них столь тесной корреляции. Здесь комплексный филогенетический анализ становится особенно необходимым.

От разбора этих общих вопросов перейдем к рассмотрению некоторых итогов изучения ДНК растений.

О вкладе первых работ в систематику вряд ли здесь стоит говорить подробно. Эти результаты были рассмотрены нами ранее<sup>11</sup>. Несмотря на фрагментарность исходных данных, они позволили все же на-

<sup>8</sup> Медников Б. М. Онтогенез и теория информации. — Природа, 1971, № 7, с. 25.

<sup>9</sup> Шмальгаузен И. И. Кибернетические вопросы биологии. Новосибирск: Наука, 1968, с. 146.

<sup>10</sup> Майр Э. Принципы зоологической систематики. М.: Мир, 1971, с. 97.

<sup>11</sup> Антонов А. С. и др. Успехи современной биологии, 1972, т. 74, с. 247.

метить пути к решению ряда важных проблем, например проблемы эквивалентности таксонов. Исследования последних лет подтвердили, например, правильность сделанного тогда вывода о неравномасштабности таксонов одного ранга у покрытосеменных.

Систематики выделяют таксоны и присваивают им определенный ранг (например, род) исходя из результатов комплексного анализа генотипов. Оказалось, что сходство ДНК в пределах таксонов одного ранга (рода) у высших растений неодинаково. Думается, что такие данные полезны для решения споров систематиков-«объединителей», т. е. склонных присваивать ранг рода более крупным, чем род, таксонам, и «разъединителей», завышающих ранг. Мне представляется, однако, что по результатам этой серии исследований был сделан один несравненно более важный вывод: было четко показано, что скорость дивергентной эволюции ДНК высших растений была очень высокой.

Это следует как из результатов оценки вариаций состава ДНК растений, так и опытов по гибридизации их ДНК. В другой группе высших эвкарвиот сопоставимого эволюционного возраста и уровня, у млекопитающих, ДНК дивергировали несравненно меньше. Простое сравнение числа известных систематикам видов млекопитающих и покрытосеменных говорит о более высоких темпах видообразования у растений.

Это тем более удивительно, поскольку по ряду важных признаков генетического материала обе группы вполне сопоставимы: у их представителей ДНК образована уникальными и повторяющимися последовательностями нуклеотидов (у растений повторов обычно несколько больше), организованными сходным образом. Хотя у растений количество ДНК на гаплоидную клетку сильно колеблется, у диплоидных видов они содержат приблизительно столько же ДНК, что и клетки млекопитающих ( $\sim 10^{10}$  пар нуклеотидов). Нет оснований думать, что разные темпы эволюции ДНК обусловлены разным объемом генетической информации в геномах сопоставляемых групп.

Высшие растения устроены не менее сложно, чем позвоночные животные. Конечно, такие сравнения всегда поверхностны, но все же, например, по числу типов клеток, из которых они построены, они вполне сопоставимы. Это позволяет предполагать, что генетические механизмы, лежащие в основе эпигенеза растений и животных, не слишком отличаются по уровню еложности; отмечу заодно, что регуляторные механиз-

мы у растений могут быть даже более сложными, чем у животных. Не исключено, что эти обстоятельство и обуславливают различия в относительной доле уникальных и повторяющихся последовательностей нуклеотидов в их ДНК.

Как же можно понять причину кардинальных различий в темпах эволюции ДНК высших растений и животных? Как мне кажется, ответ надо искать, сравнивая надмолекулярные принципы организации их геномов и механизмы их эволюции.

Напомню один факт: у разных видов в ядрах растительных клеток содержание ДНК колеблется в очень широких пределах (у покрытосеменных — в 100 раз!), т. е. гораздо больше, чем у млекопитающих, да и других позвоночных. При сопоставлении диплоидных видов покрытосеменных отмечены шестидесятикратные различия. Даже в пределах одного рода диплоидные виды могут в несколько раз отличаться по содержанию ДНК в ядре<sup>12</sup>.

О механизмах возникновения этих различий мы сегодня знаем уже довольно много. Во-первых, это полиплоидизация (кратное увеличение числа хромосом) геномов, столь обычная у растений и столь редкая у позвоночных животных, во-вторых, это увеличение числа отдельных последовательностей ДНК (амплификация). Наконец, имеются данные, указывающие на полинемию хромосом большинства растений. Степень полинемизации хромосом может быть различной даже у видов одного рода. У животных, напротив, хромосомы, как правило, униемны, т. е. образованы одной молекулой ДНК.

Наряду с процессами, приводящими к увеличению содержания ДНК в ядре, в ходе эволюции часть генетического материала может теряться. Все это и дает в итоге то удивительное разнообразие в содержании ДНК, с которым мы сталкиваемся при изучении растений.

При увеличении числа копий генома (унигеномов) путем полиплоидизации или полинемизации создается любопытная ситуация. Давно известно, что эффект дозы гена у разных локусов проявляется неодинаково. Поэтому уже простое увеличение числа унигеномов на ядро может сказаться на фенотипе (при условии, что все унигеномы активны). Здесь мы сталкиваемся с первым, но не единственным потенциальным источником различий в оценках гено-

систематиков и феносистематиков. Полученный экспериментатором полиплоид по ДНК неотличим от исходной диплоидной формы, но, как это хорошо известно, обычно отличается от нее по фенотипическим признакам. С аналогичными случаями мы встречаемся и при изучении природных популяций растений.

В этой ситуации нас, однако, интересует больше другой ее аспект. Очевидно, что наличие исходно идентичных множественных копий генов у полиплоидов (или в полинеменной хромосоме) создает основу для их независимой эволюции. Многие изменения в структуре ДНК, невозможные у диплоидов из-за неблагоприятного влияния на фенотип, не будут в этом случае столь опасными и поэтому не будут сразу выбраковываться отбором. В пользу этих представлений говорят результаты исследований ДНК диплоидных и полиплоидных растений, которые были получены в нашей лаборатории Ю. Н. Яневой, К. М. Вальехо-Роман и Г. П. Кашеваровым: различия в последовательности нуклеотидов в ДНК диплоидных и полиплоидных растений из разных природных популяций одного вида нередко больше, чем в ДНК разных видов одного рода.

Еще в конце 20-х годов Л. Стадлер показал, что частота возникновения мутаций у природных полиплоидов при прочих равных условиях ниже, чем у диплоидов. Эти наблюдения подтвердились при изучении влияния ионизирующих излучений и других мутагенных факторов. На основании этих результатов возникло представление о существовании «полиплоидной защиты»; в настоящее время этот феномен находит объяснения и в терминах молекулярной организации геномов растений.

Суть полиплоидной защиты заключается в увеличении размера мишени для мутагена. Поскольку не все изменения в ДНК при этом будут столь же строго оцениваться отбором, как у диплоидов, внутригеномная изменчивость множественных гомологичных генов у полиплоидов может сильно возрастать. Судя по имеющимся данным, это довольно быстрый процесс, который по крайней мере частично может определять высокую скорость эволюции ДНК у цветковых растений.

Когда для оценки генетической разнородности природных популяций растений применили метод электрофореза белков, оказалось, что количество гетерологичных локусов на индивид у них втрое больше, чем у позвоночных животных. Об этом же говорят и некоторые результаты

изучения первичных структур их белков: так, эволюция цитохрома С у растений шла в несколько раз быстрее, чем у животных. Иные истолкования этих данных находятся в противоречии с палеонтологией цветковых растений<sup>13</sup>.

Внутригеномные рекомбинации и отбор, происходящие на фоне изменяющегося содержания ДНК в ядре, с неизбежностью будут приводить к периодическим изменениям в темпе эволюции нуклеотидных последовательностей отдельных генов, в том числе и структурных, кодирующих белки. Надо специально отметить, что при дупликациях (амплификациях) такие изменения могут быть лишь у части генов.

Таким образом, скорость молекулярной эволюции в той или иной группе растений могла зависеть от действия многих факторов, реальный вклад каждого из которых мы не можем восстановить. В то же время, мы вправе предположить, что в разные моменты эволюционной истории каждой конкретной группы он не был одинаковым, как неодинакова, например, сегодня доля полиплоидных форм в разных группах высших растений: известно, что они обычны среди покрытосеменных и реже встречаются у голосеменных. Скорость видообразования у покрытосеменных при этом наибольшая, особенно у травянистых растений. Отмечено, что в этой группе и у кустарников она прямо коррелирует со степенью изменчивости кариотипов<sup>14</sup>.

#### О ПЕРСПЕКТИВАХ БИОХИМИЧЕСКОЙ СИСТЕМАТИКИ

Итак, процессы эволюции генетического материала растений чрезвычайно сложны и многообразны. Мы всегда должны помнить, что результаты анализов семян (не говоря уже об эписемантидах) могут быть использованы систематиками только с учетом конкретных механизмов эволюционного становления изучаемой группы растений. Если «молекулярные часы» позвоночных животных шли более или менее точно и скорость накопления аминокислотных замен в отдельных белках была у них в большинстве случаев довольно постоянной, то у растений мы сталкиваемся с совсем другой ситуацией. Во-первых, изменения в белках растений накапливались

<sup>13</sup> Ramshaw L. A. M. et al. *New Phytol.*, 1972, v. 71, p. 773.

<sup>14</sup> Levin D. A., Wilson A. C. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 1976, v. 73, № 6, p. 2086.

быстрее, и во-вторых, в разных филетических линиях процесс этот мог идти с неодинаковой скоростью. В этом, как мне кажется, заключается одна из главных причин неудач при использовании результатов анализа аминокислотных последовательностей белков в систематике растений. Поскольку иммунологические, электрофоретические и другие свойства белков являются производными по отношению к его аминокислотной последовательности, использование большинства методов белковой таксономии также осложнено этими обстоятельствами.

Неодинаковой может быть и скорость эволюции различных «признаков» белков: т. е. замена одной аминокислоты может сказаться на электрофоретической подвижности белка, но не изменит его антигенных свойств, другая, напротив, может иметь диаметрально противоположное влияние.

Логично задать вопрос: нельзя ли сказанное о белках отнести и к ДНК растений? В какой-то мере, безусловно, да. Но здесь особенно ярко проявляется главное преимущество геносистематики: она имеет дело с интегральными характеристиками

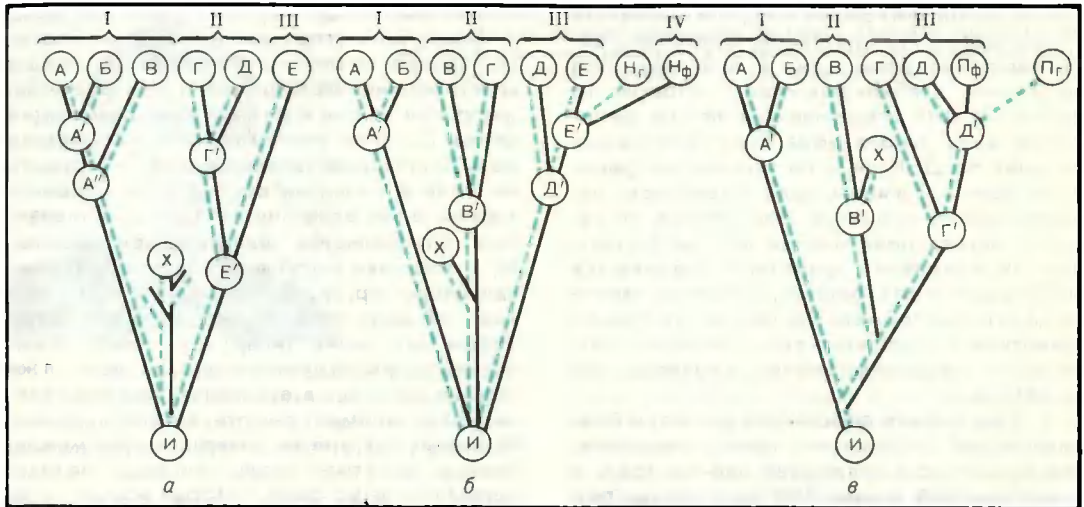


Рис. 3. Филемы генотипов (пунктир) и фенотипов (сплошная линия) удовлетворительно описывают эволюционную историю позвоночных и отдельных групп цветковых растений. Угол отклонения отдельной веточки филемы от вертикали пропорционален скорости ее дивергентной эволюции. Для этого типа филем средняя скорость эволюции фенотипов и генотипов близка. А, Б, В, Г, Д, Е — ныне существующие виды; А', А'', Г', Б' — промежуточные формы; Х — вымершая группа; И — исходная форма для рассматриваемой ветви «большой» филемы; а — филема, отражающая эволюционный процесс, основанный главным образом на малых изменениях в структуре ДНК (точечные мутации, мелкие хромосомные перестройки и т. п.). Степень дивергенции фенотипов приблизительно пропорциональна расстоянию между видами [А—Е] по горизонтали. Взаиморасположение на схеме видов В и Г может быть примером результата конвергентной эволюции фенотипов. Степень генотипической дивергенции оценивается величиной «генетического пути» (Антонов, 1974); например для видов А и В он равен А—А'—А''—В, а для видов В и Г—В—А''—И—Е'—Г'—Г. Принадлежность видов В и Г к разным таксонам легко устанавливается при сопоставлении их ДНК с ДНК видов А, Б и Д. б — в точке Е' филемы по механизму неогенеза началось образование вида НФ, который по своим фенотипическим признакам сегодня отличается от филетически близкого вида Е существенно больше, чем по генотипу [И,]. в — в точке Д' филемы в пределах существовав-

шего вида Д произошло образование полиплоидной популяции, которая впоследствии эволюционировала в виде ПФ. Эволюция вида Д шла на уровне диплоидного генома. В результате уровень фенотипического сходства между видами Д и ПФ остался высоким, а их геномы заметно дивергировали (П, дальше от Д, чем ПФ).

материала. Например, при сопоставлении свойств фракции уникальных последовательностей, включающей все структурные гены и многие другие, с неизвестной нам пока функцией, отклонения в скорости эволюции отдельных структурных генов не могут сказаться принципиально на конечном результате, потому что таких генов в ДНК растений много тысячами, а отклонения случайны.

Конечно, правильные заключения о степени филогенетической близости видов на основе сравнения их ДНК, как и при работе с белками, возможны только при учете

всех тех факторов, о которых шла речь выше. При этом мы неизбежно будем сталкиваться со случаями, когда результаты исследований классическими методами будут расходиться с итогами геносистематического анализа не потому, что один из подходов неверен, а потому, что филемпы фенотипов и генотипов не всегда совпадают (рис. 3).

Именно с такой ситуацией мы столкнулись при сравнительном изучении ДНК у видов из столь филогенетически отдаленных родов высших растений, таких как тысячелистники из сем. Сложноцветных, ирисы из сем. Касатиковых, лилии из сем. Лилейных и еще нескольких родов из других семейств покрытосеменных растений. Оказалось, если эволюция рода идет в основном под действием стабилизирующего отбора, то эволюция ДНК опережает эволюцию фенотипов: виды такого рода будут отличаться сильнее по ДНК, чем по признакам фенотипа. Если мы имеем дело с таксоном, находящимся в процессе становления, то генотипическая цена иногда весьма существенных изменений фенотипа оказывается небольшой, и по строению ДНК виды такого рода отличаются меньше, чем по признакам фенотипа. Совершенно сходные результаты были получены и при изучении позвоночных животных.

При оценке перспектив развития биохимической систематики нужно учитывать, что буквально в последние два-три года в аналитической химии ДНК был сделан ряд крупных открытий, особенно при разработке методов определения последовательностей нуклеотидов. Уже прочитаны последовательности из многих тысяч нуклеотидов. Будущее белковой таксономии не кажется теперь радужным даже с чисто технической точки зрения. Сегодня проще и быстрее определить нуклеотидную последовательность гена, чем кодируемого им белка. Успехи генной инженерии позволяют видеть главную дорогу биохимической систематики растений в сравнительных исследованиях их ДНК.

Подведем итоги сказанному. И исследование белков, и исследования нуклеиновых кислот позволяют с новых позиций оценивать пути и механизмы эволюции растений. Анализируя свойства белков, мы прежде всего углубляем наши знания о фенотипе растений и, косвенно, о небольшой части их генотипа; анализируя ДНК, мы получаем гораздо более полную информацию о молекулярной основе их генотипов. Именно поэтому нельзя ставить знак равенства при

оценке значимости получаемых в ходе этих исследований результатов: существует множество методов анализа фенотипов, и работа с белками растений, нужная и полезная, качественно не отличается от классических методов систематики растений. Используя методы белковой таксономии, всегда нужно помнить о том, что из-за большой сложности и разнообразия эволюционных процессов у растений трактовка полученных результатов затруднена и при нынешнем уровне знаний об эволюции ДНК попытки использования такого рода данных для уточнения филогенетических связей различных таксонов растений вряд ли могут быть успешными: у нас нет способа отличать исключение от правила. Только всесторонние исследования ДНК растений дадут нам ключи к разгадке тайн эволюции белка. Попытки приписать геносистематике роль поставщика частных фактов и отрицать ее роль в развитии систематики неправомерны, даже если они исходят от признанных специалистов классической школы. И классики могут ошибаться: вот что писал, например, Ж. Фабр в книге «Жизнь мухи»: «Я веду свои наблюдения под синим небом под пение цикад; вы ставите химические опыты на клетке и протоплазме, я же изучаю инстинкт в его тончайших проявлениях; вас занимает смерть, а меня — жизнь. И почему бы мне не завершить эту мысль: свиньи замутили воду чистого потока; естественная история, которая всегда привлекала молодежь, в результате манипуляций с клетками стала презренным и отталкивающим занятием. Я пишу это для людей науки, философов, которые когда-нибудь попытаются решить сложную проблему инстинкта, но прежде всего я обращаюсь к молодым ученым. Я хочу привить им любовь к естественной истории, которую они сейчас вынуждены ненавидеть...»<sup>15</sup>

Сегодня нам ясно, как ошибался Ж. Фабр, оценивая новые направления: целостность и эстетическая сторона биологии не пострадали от развития биохимии и цитологии, напротив, само ее развитие в немалой степени определялось успехами этих наук.

В систематике растений проверка гармонии существующих построений алгеброй количественных подходов — геносистематики может иметь такое же значение. Добавлю, что и в самой алгебре специалисты находят внутреннюю гармонию.

<sup>15</sup> Fabre J. H. The life of the fly. L.: Hodder and Stoughton, 1947, p. 14.

## Вселенная в нейтринном свете

В. С. Березинский



Вениамин Сергеевич Березинский, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник Института ядерных исследований АН СССР. Основные работы — в области слабых взаимодействий элементарных частиц и астрофизики. Автор ряда научно-популярных книг.

В течение многих столетий единственным источником информации о Вселенной оставалось электромагнитное излучение. Долгое время это было только оптическое излучение, и лишь с середины нашего века удалось использовать радио-, инфракрасное, ультрафиолетовое, рентгеновское и  $\gamma$ -излучения.

При наблюдении в каждом из этих излучений менялся вид Вселенной. Слабые «звездочки», едва различимые в телескоп, «вспыхивали» яркими радиоисточниками. В субмиллиметровом диапазоне Вселенная оказалась залитой морем излучения, испущенным первичной горячей плазмой задолго до образования первых галактик. Вид нашей Галактики в рентгеновском излучении отличается от ее «оптического образа» не менее, чем рентгеновский снимок Брижит Бардо от ее цветной фотографии.

Новые объекты, увиденные в неоптических диапазонах электромагнитного излучения, оказались сюрпризом для астрофизиков. Большинство из них (в том числе квазары и пульсары) не предсказывались даже в ранних теоретических работах по астрофизике, которым трудно отказать в фантазии или обвинить в робости перед фундаментальными физическими законами. Кстати говоря, начиная с Ньютона, который одним из первых предположил, что

небесные тела подчиняются обычным «земным» законам механики и тяготения, и до наших дней мы неизменно убеждаемся в непоколебимости этих законов в масштабах Вселенной. Просто природа оказалась изобретательнее человека в конструировании объектов, подчиняющихся известным физическим законам.

А как будет выглядеть Вселенная в нейтринном свете?

Возможно, и здесь нас ожидают сюрпризы, но вот что говорит теория.

Нейтринная астрономия может использовать два диапазона энергий, соответствующие различным физическим процессам испускания нейтрино и их регистрации на Земле. Энергии<sup>1</sup> 0,5—50 МэВ принадлежат астрономии низких энергий. Здесь трудна регистрация нейтрино, но велики их потоки. Вторая область — нейтринная астрономия высоких энергий начинается с энергий выше 50—100 ГэВ. Ожидаемые потоки нейтрино таких энергий от космических источников невелики, зато значительно лучше возможности их детектирования.

<sup>1</sup> Мы будем пользоваться следующими единицами измерения энергии: 1 эВ =  $1,6 \cdot 10^{-12}$  эрг, 1 МэВ =  $10^6$  эВ, 1 ГэВ =  $10^9$  эВ и 1 ТэВ =  $10^{12}$  эВ.

Источники космических нейтрино низких энергий — это ядерные реакции и слабые взаимодействия элементарных частиц в недрах звезд. Генерация энергии в обычных звездах типа нашего Солнца происходит в результате ядерных реакций, протекающих в горячем центре звезды ( $\sim 15$  млн град.), объем которого составляет 0,01—0,05% полного ее объема. Почти вся эта энергия переизлучается с поверхности звезды в виде теплового излучения. Но чтобы достичь этой поверхности, электромагнитное излучение «пробирается» в течение 30 млн лет сквозь колоссальную толщу звездного вещества. Поэтому естественно, что тепловое излучение звезд содержит мало информации о деталях процесса освобождения ядерной энергии в их центре.

Совсем иначе обстоит дело с нейтрино. Рождаемые непосредственно в центре звезды в результате ядерных реакций, нейтрино беспрепятственно проходят всю толщу звездного вещества, неся информацию об этих реакциях и условиях их протекания.

Наибольший поток таких нейтрино попадает на Землю с ближайшей к нам звезды — Солнца. Характерные энергии солнечных нейтрино заключены в пределах от 0,2 до 14 МэВ. Идея о возможности детектирования солнечных нейтрино с помощью реакции  $\nu_e + {}^{37}\text{Cl} \rightarrow {}^{37}\text{Ar} + e^-$  была предложена в 1946 г. Б. М. Понтекорво. Этот процесс используется сейчас для регистрации солнечных нейтрино в эксперименте, который осуществлен в США Р. Дэвисом с сотрудниками<sup>2</sup>. Измеренное произведение потока нейтрино на сечение его взаимодействия с хлором составляет  $2,2 \pm 0,4 \text{ SNU}$  (при фоне в  $0,4 \text{ SNU}$ , вызванном в основном мюонами космических лучей)<sup>3</sup>, что заметно меньше значения, предсказываемого теоретически ( $7,8 \pm 1,5 \text{ SNU}$ ) на основании так называемой стандартной солнечной модели. В течение последнего десятилетия было предпринято немало попыток объяснить результаты опыта Дэвиса, и в их свете, пожалуй, стало еще более очевидным, что в решении проблемы солнечных нейтрино нельзя обойтись без новых экспериментов.

Такие эксперименты, в частности, готовятся под руководством Г. Т. Зацепина на Нейтринной обсерватории Института ядерных исследований АН СССР.

На карте нашей Галактики обозначить Солнце и Землю двумя различными точками труднее, чем на обычном глобусе Москву и Малаховку. Ближайшая к нам звезда Проксима Центавра удалена от Солнца на расстояние 4,3 световых года, в то время как луч света от Солнца приходит к нам всего за 8 мин. Если Проксима Центавра испускает столько же нейтрино, как и Солнце, то их поток, падающий на Землю, должен быть в 100 млрд раз меньше потока солнечных нейтрино.

Казалось бы, вся нейтринная астрономия низких энергий должна ограничиться изучением Солнца. На самом же деле, как впервые было указано Я. Б. Зельдовичем, должны существовать гораздо более мощные источники нейтрино — массивные звезды в «предсмертной» фазе их эволюции. При выжигании ядерного горючего в центре звезды с массой в 20—30 солнечных масс<sup>4</sup>, образуется ядро из железа, дальнейшее ядерное горение которого не может дать выделения энергии. Это железное ядро начинает быстро сжиматься, коллапсировать, высвобождая гравитационную энергию. При этом электроны «вдавливаются» в протоны, превращая их в нейтроны, а температура в центре повышается до  $10^{12}$  град. При такой температуре почти вся выделяемая энергия ( $5 \cdot 10^{53}$  эрг, т. е. 15% энергии покоя звездного ядра) уносится нейтрино примерно в течение 20 с, а ядро превращается, скорее всего, в нейтронную звезду. Средняя энергия нейтрино, испущенных при коллапсе, должна составлять 10—15 МэВ.

Если этот процесс представляет собой механизм взрыва сверхновой, то нейтринные вспышки в нашей Галактике должны происходить с частотой появления сверхновых, т. е., согласно наблюдениям, один раз в 8—30 лет.

Перейдем теперь к нейтринной астрономии высоких энергий.

Нейтрино с энергией  $E_\nu > 50$ —100 ГэВ рождаются в результате взаимодействия ускоренных частиц высоких энергий, существующих в космических объектах, с газом или электромагнитным излучением. На возможность исследования астрономических

<sup>2</sup> Об этом эксперименте см.: Микаэлян Л. А. Нейтрино.— Природа, 1979, № 6, с. 20.

<sup>3</sup> SNU (solar neutrino unit) — единица скорости счета солнечных нейтрино. Она соответствует образованию одного атома  ${}^{37}\text{Ar}$  в 1 с в мишени, содержащей  $10^{37}$  атомов  ${}^{37}\text{Cl}$ .

<sup>4</sup> Масса солнца ( $M_\odot$ ) равна  $2 \cdot 10^{33}$  г; температура в центре Солнца  $\sim 1,4 \cdot 10^7$  град.



Таблица

Два механизма образования нейтрино

pp-механизм	pγ-механизм
$p + p \rightarrow \pi^\pm + \text{адроны}$ $\downarrow$ $\mu^\pm + \nu_\mu (\bar{\nu}_\mu)$ $\downarrow$ $\rightarrow e^\pm + \nu_\mu (\nu_\mu) + \nu_e (\bar{\nu}_e)$	$p + \gamma \rightarrow \pi^\pm + \text{адроны}$ $\downarrow$ $\mu^\pm + \nu_\mu (\bar{\nu}_\mu)$ $\downarrow$ $\rightarrow e^\pm + \bar{\nu}_\mu (\nu_\mu) + \nu_e (\bar{\nu}_e)$

объектов с помощью такого нейтринного излучения указал в 1960 г. М. А. Марков; им же был предложен широко обсуждающийся в настоящее время глубоководный метод регистрации нейтрино высоких энергий, когда слой воды на большой глубине в океане служит естественным детектором космических нейтрино.

Нейтринная астрономия высоких энергий предоставляет нам уникальные, по сравнению с рентгеновской или γ-астрономией, возможности для исследования космических объектов. Это связано с колоссальной проникающей способностью нейтрино, благодаря которой мы можем заглянуть в глубины плотных источников, непрозрачных для рентгеновского и γ-излучения («скрытые» источники), и исследовать отдаленные космологические эпохи, единственными свидетелями которых из всех частиц высокой энергии остаются нейтрино.

Как экспериментальная наука, нейтринная астрономия высоких энергий только начинается: под руководством А. Е. Чудакова осуществлен пуск нейтринного телескопа Института ядерных исследований АН СССР на Кавказе<sup>5</sup>; в США в сотрудничестве с учеными разных стран разрабатывается проект гигантского, массой 10<sup>9</sup> т, глубоководного детектора ДЮМАНД<sup>6</sup>; проводятся лабораторные исследования возможностей оптического и акустического детектирования космических нейтрино.

Проблемам нейтринной астрономии высоких энергий посвящена эта статья.

КАК РОЖДАЮТСЯ КОСМИЧЕСКИЕ НЕЙТРИНО ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

Чтобы астрофизический объект был источником нейтрино высоких энергий,

он должен содержать ускоренные до высокой энергии протоны или ядра (ядерную компоненту космических лучей) и плотную мишень в виде газа или фотонов низких энергий.

Проходя через толщу газа, космические лучи сталкиваются с атомными ядрами и рождают заряженные пионы, распад которых приводит к появлению нейтрино — их называют pp-нейтрино (см. табл.). Каждое нейтрино уносит в среднем около 5% энергии налетающего протона. Энергетические спектры космических лучей в источниках обычно имеют степенную форму, т. е. число частиц с данной энергией убывает с ростом энергии как E<sup>-(γ+1)</sup> (величину γ называют интегральным показателем спектра). Понятно поэтому, что с уменьшением энергии растет поток излучаемых нейтрино. На Земле pp-нейтрино регистрируют по мюонам, рождающимся в реакции ν<sub>μ</sub> + N → μ + адроны. При энергии нейтрино E<sub>ν</sub> ≤ 50 — 100 ГэВ сечение этой реакции и пробег мюона в грунте или воде пропорциональны энергии E<sub>ν</sub>, поэтому при γ < 2 число мюонов, регистрируемых подземным детектором, возрастает с энергией. Это обстоятельство, а также тот факт, что при энергии E<sub>ν</sub> ≥ 50—100 ГэВ мюон вылетает практически в направлении движения нейтрино, указывая тем самым направление на источник, определяют диапазон энергий от 50 до 1000 ГэВ как область нейтринной астрономии высоких энергий.

Существует и несколько иной механизм генерации нейтрино. Из наблюдений известно, что вблизи многих источников имеется высокая плотность инфракрасного, оптического, а иногда и рентгеновского излучений. Плотность фотонов может быть столь велика, что ускоренный протон растрачивает в столкновениях почти всю свою энергию. При этом (см. табл.) также рождаются пионы, а в их распадах pγ-нейтрино. Как и в pp-столкновениях, протон передает нейтрино около 4—5% своей энергии.

<sup>5</sup> О пуске этого телескопа см.: Природа, 1978, № 4, с. 137.

<sup>6</sup> Березинский В. С. Проект «ДЮМАНД». — Природа, 1976, № 11, с. 28.

Особенностью  $\gamma$ -механизма является генерация нейтрино в основном с энергией выше некоторого порогового значения. Это становится понятно, если, рассматривая столкновение протона, имеющего большой лоренц-фактор  $\Gamma = E/m_p c^2$  (где  $E$  — энергия протона, а  $m_p$  — его масса), с низкоэнергетическим фотоном энергии  $\epsilon$ , мы перейдем в систему отсчета, где протон покоится. В этой системе мы увидим, что на неподвижный протон налетает фотон с энергией  $\Gamma \epsilon$ . Чтобы образовался пион, она должна быть больше его энергии покоя  $\mu c^2$ , а это означает, что  $\Gamma$  должен быть больше  $\mu c^2/\epsilon$ . Вспоминая, что нейтрино уносит 4—5% энергии  $\Gamma m_p c^2$  протона, получаем  $E_\nu \gg (4 \div 5) \cdot 10^{-2} (\mu c^2) (m_p c^2)/\epsilon$ . Например, для оптических фотонов с энергией  $\epsilon \sim 1$  эВ пороговая энергия нейтрино, согласно приведенной выше формуле, составляет примерно  $5 \cdot 10^6$  ГэВ. Любопытно, что эта величина как порог рождения нейтрино появляется для наиболее важных внегалактических источников нейтрино, таких как активные ядра галактик и молодые галактики в яркой фазе их эволюции (см. ниже). Это позволяет определить энергии, превышающие  $5 \cdot 10^6$  ГэВ, как область нейтринной астрономии сверхвысокой энергии.

Говоря о нейтринной астрономии, необходимо помнить, что рождение нейтрино в описываемых процессах неизбежно сопровождается генерацией  $\gamma$ -излучения как через рождение и распад  $\pi^0$ -мезонов, так и через излучение электронов, образующихся в распадах заряженных пионов. Нейтринный поиск особенно интересен в тех случаях, когда источник непрозрачен для  $\gamma$ -лучей или удален от нашей Галактики на столь большое расстояние, что  $\gamma$ -лучи поглощаются в окружающем межгалактическом пространстве. Однако нейтринная и  $\gamma$ -астрономия несомненно дополняют друг друга при исследовании космических объектов.

## УСКОРЕНИЕ ЧАСТИЦ В ИСТОЧНИКАХ

Итак, чтобы «увидеть» источник в нейтринном излучении высокой энергии, необходимо, прежде всего, чтобы он ускорял космические лучи. В каких случаях это происходит?

Наблюдения показывают, что практически не существует сколько-нибудь активных космических объектов, которые не ускоряли бы частиц. Они ускоряются в межзвездной и межпланетной среде, на Солнце, в магнитосфере Юпитера и даже в

магнитосфере нашей планеты. В активных галактических ядрах и пульсарах эффективность ускорения столь велика, что на фоне излучения ускоренных частиц трудно заметить собственное тепловое излучение этих объектов.

Обратимся сначала к нашей Галактике. За год на  $1 \text{ км}^2$  атмосферы Земли падает около 600 частиц с энергией, превышающей  $10^9$  ГэВ. Это и очень мало, и очень много. Мало с точки зрения экспериментатора, регистрирующего эти частицы на Земле, много с точки зрения астрофизика, пытающегося объяснить наблюдаемую интенсивность какими-либо источниками, известными в нашей Галактике. Существует единое мнение, что наблюдаемые частицы с энергией, меньшей  $(3-10) \cdot 10^9$  ГэВ, ускоряются в пределах нашей Галактики, в то время как частицы с большей энергией заполняют весь колоссальный объем Местного Сверхскопления галактик — область, характерный размер которой около 60 млн световых лет. Это означает, что наша Галактика не уникальна в производстве частиц сверхвысоких энергий — заключение, в котором, впрочем, не приходится сомневаться и с теоретической точки зрения.

Если верить феноменологическому выводу о том, что частицы с энергиями, по крайней мере не превышающими  $10^9$  ГэВ, генерируются в пределах нашей Галактики, то их источники можно указать почти однозначно — это сверхновые. Ибо нет в Галактике других объектов, которые могли бы ускорять частицы до таких энергий и одновременно иметь мощность, необходимую для заполнения всей Галактики частицами сверхвысоких энергий с наблюдаемой плотностью. Ускоряться до сверхвысоких энергий, вплоть до  $10^{10}$  ГэВ, частицы, вообще говоря, могут в молодых пульсарах, образовавшихся при взрыве сверхновой, в ударной волне, сопровождающей взрыв сверхновой, и при многократном пересечении частицей фронта ударных волн. Однако количественно описать ускорение частиц до  $10^8-10^9$  ГэВ пока не удалось ни в одном из трех перечисленных вариантов, причем наиболее серьезные сомнения вызывают два последних.

Рассмотрим пульсар — вращающуюся с угловой скоростью  $\Omega$  нейтронную звезду радиуса  $R$  с сильным магнитным полем  $B_s$  на поверхности — и попробуем выяснить, каким образом вблизи него могут ускоряться частицы. На поверхности пульсара благодаря его вращению создается электрическое поле напряженностью  $\vec{E} = -\vec{V} \times \vec{B}_s/c$ , где  $\vec{V} = \Omega \times \vec{R}$  — линейная скорость

на поверхности пульсара. Разность потенциалов между двумя любыми точками поверхности равна

$$\varphi_A - \varphi_B = \int_A^B \vec{E} dl,$$

причем контур интегрирования лежит на поверхности пульсара, и  $\varphi_A - \varphi_B$  не зависит от условий вне пульсара, т. е. от модели его магнитосферы. Если точку  $A$  выбрать на полюсе, а  $B$  — на экваторе, то  $\varphi_B - \varphi_A = V_S \Omega R^2 / c$ , а максимальная величина потенциала поверхности, отсчитываемого от бесконечно удаленной точки, составит

$$\varphi_m > \frac{1}{2} V_S \Omega R^2 / c.$$

Однако частица с зарядом  $e$ , уходя с поверхности пульсара на бесконечность, не может приобрести энергию  $e\varphi_m$ . Дело в том, что в сильном магнитном поле частицы высокой энергии движутся строго по магнитным силовым линиям, так как составляющая скорости, перпендикулярная силовой линии, вызывает сильное синхротронное излучение и почти мгновенно затухает. Уйти далеко от пульсара частицы могут только по так называемым открытым силовым линиям, т. е. силовым линиям, которые не замыкаются на пульсар в пределах светового цилиндра — поверхности, находящейся на расстоянии  $R_c = c\Omega^{-1}$  от оси вращения пульсара. Учет только той части поверхности пульсара, от которой исходят открытые силовые линии, приводит к уменьшению разности потенциалов, реально наблюдаемой частицей, в  $c/\Omega R$  раз:

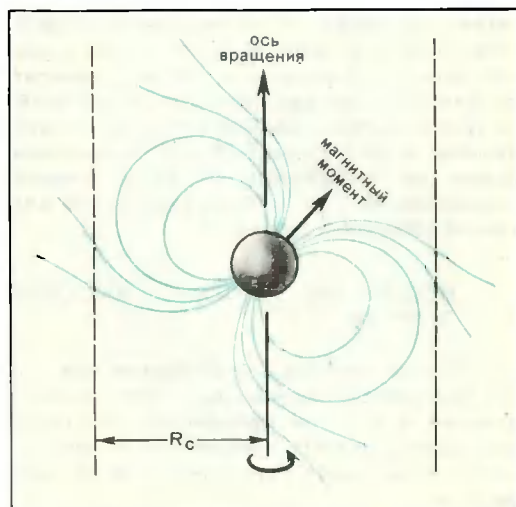
$$\varphi_{\text{уск}} = V_S \Omega^2 R^3 / 2c^2.$$

Подставляя в эту формулу параметры молодого пульсара ( $R=10$  км,  $V_S = 10^{13}$  Гс и  $\Omega = 10^3$  с<sup>-1</sup>), получаем  $\varphi_{\text{уск}} = 1,7 \cdot 10^{18}$  В.

Хотя, как мы убедились, потенциал  $\varphi_{\text{уск}}$  определяется исключительно условиями на поверхности пульсара и не зависит от модели магнитосферы, энергия, приобретаемая ускоренной частицей, критическим образом зависит от состояния магнитосферы. В частности, для достаточно старого пульсара с железом на поверхности и относительно низкой поверхностной температурой, истечения ионов с поверхности почти не происходит: вблизи нее возникает вакуумный зазор с сильным электрическим полем, рождающим электронно-позитронную плазму, которая заполняет магнитосферу пульсара. Для молодого пульсара с высокой температурой и гелием

на поверхности истечение ионов, по-видимому, возможно, и в некоторых моделях магнитосферы частица приобретает конечную энергию  $E \sim e\varphi_{\text{уск}}$ .

Таким образом, хотя мы и имеем серьезные экспериментальные указания, что наблюдаемые в Галактике частицы, очень высокой энергии генерируются пульсарами, теоретические модели ускорения еще весьма далеки от определенных заключений. Наблюдение нейтринного излучения при очередном рождении молодого пульсара в нашей Галактике — вот



Магнитосфера наклонного магнитного ротора [пульсара или магнитона]. Заряженные частицы движутся вдоль магнитных силовых линий (показаны в этом) и уйти из магнитосферы могут, лишь двигаясь вдоль открытых силовых линий, т. е. линий, пересекающих так называемый световой цилиндр: поверхность, на которой линейная скорость вращения  $V = \Omega R_c$  равна скорости света (показана пунктиром).

что в создавшейся ситуации могло бы разрешить все сомнения.

Изучая ускорение частиц в нашей Галактике, нельзя забывать, что мы имеем дело с довольно старым объектом, в котором большая часть газа уже превратилась в звезды, а процессы звездообразования, и в частности вспышки сверхновых, происходят не столь интенсивно, как в молодых галактиках. Активная генерация частиц сверхвысоких энергий в этих галактиках связана как с увеличенной частотой вспышек сверхновых, так и с более эффективным действием других механизмов ускорения. Например, ускорение на

фронтах ударных волн в условиях молодой галактики может приводить к ускорению до сверхвысоких энергий.

Кроме того, в активных галактиках (например, в квазарах и сейфертовских галактиках) должны действовать качественно новые механизмы ускорения, связанные с процессами в ядрах этих галактик. Согласно современным представлениям, в центре галактического ядра находится черная дыра большой массы или намагниченное вращающееся плазменное тело (магнитоид). В обоих случаях вращение при наличии магнитного поля создает высокий электрический потенциал в центральной области галактического ядра, аналогично тому, как это происходит в случае пульсара. Аналогия особенно сильна для магнитоида, который, по существу, представляет собой гигантский пульсар с радиусом  $10^{16}$  см, магнитным полем на поверхности  $10^6$  Гс и угловой скоростью  $10^{-7}$  с $^{-1}$ . Легко видеть, что для такого объекта  $\Phi_{\text{уск}} \sim 10^{21}$  В.

## ИСТОЧНИКИ НЕЙТРИНО ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

После того как мы выяснили, где могут ускоряться частицы до очень высоких энергий и как они производят нейтрино, мы можем указать ожидаемые источники нейтрино в нашей Галактике и за ее пределами.

Хотя «газ» космических лучей является очень распространенной формой космической материи, большие потоки нейтрино генерируются источниками далеко не всегда. Они возникают, только если источник космических лучей окружен толстым слоем мишени — обычным газом или «газом» фотонов низких энергий. Наиболее интересны при этом скрытые источники, не пропускающие  $\gamma$ -излучения высокой энергии, для которых нейтринный поток является единственным «зондом» исследования.

В этом разделе мы попытаемся указать именно такие особые источники, галактические и внегалактические, поток нейтрино от которых может дать уникальную информацию.

**Источники в нашей Галактике.** Наиболее волнующие наше воображение галактические проблемы — образование большинства химических элементов, производство космических лучей, рождение пульсаров и, наконец, некоторые особенности нашей Солнечной системы — мы связываем со взрывами сверхновых. Человечест-

во хранит в своих хрониках скудную информацию о семи вспышках сверхновых в нашей Галактике, последняя из которых наблюдалась в 1604 г. И. Кеплером. На долю современного астронома, вооруженного новейшими телескопами и спутниками с детекторами рентгеновского и  $\gamma$ -излучением, не пришлось ни одной видимой вспышки сверхновой в Галактике. И хотя в других галактиках подобные вспышки наблюдаются часто, их отдаленность не позволяет пока детектировать никакие другие виды излучений, кроме оптического.

Науке нужна вспышка сверхновой в нашей Галактике.

Однако не надо торопиться с выводом, что такие события происходят раз в 300 лет. Согласно оценкам, основанным на положении и времени пяти вспышек сверхновых, информация о которых наиболее надежна, интервал между вспышками, происходящими в нашей Галактике, составляет всего лишь 8—30 лет. Все дело в том, что центральные области Галактики, где происходит большинство вспышек, недоступны для наблюдений в оптическом излучении из-за галактической пыли. Наблюдение возможно в рентгеновском и  $\gamma$ -излучениях, но многолетнее непрерывное слежение за «подозрительной» частью неба со спутников требует больших денежных затрат и пока не осуществляется. Зато уже функционирует система нейтринного детектирования вспышек сверхновых в нашей Галактике. Нейтринные детекторы могут не только регистрировать частицы с энергией 10—20 МэВ, рожденные непосредственно при коллапсе, но и нейтрино с энергией, превышающей несколько десятков ГэВ, которые генерируются в плотной оболочке сверхновой.

Генерация такого излучения происходит по следующему сценарию.

В результате взрыва сверхновой центральное звездное ядро превращается в нейтронную звезду-пульсар, а внешняя оболочка сбрасывается и со скоростью  $\sim 10^8$ — $10^9$  см/с удаляется от пульсара. Низкочастотное магнитодипольное излучение пульсара «выметает» газ из его магнитосферы, образуя разреженную полость между пульсаром и удаляющейся оболочкой. Космические лучи, ускоряемые в этой полости пульсаром, «впрыскиваются» в оболочку и создают там в результате ядерных столкновений поток  $pp$ -нейтрино. Помимо этого, космические лучи могут ускоряться и непосредственно в оболочке. В начале своего расширения оболочка остается очень плотной и в течение первого месяца

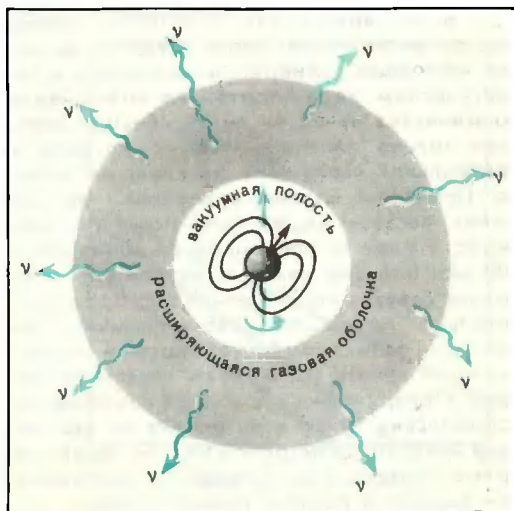
непрозрачной для  $\gamma$ -излучения, так что нейтрино оказываются единственным типом мощного излучения образовавшейся звезды. Нейтринная фаза длится приблизительно 5 месяцев (для оболочки с массой около  $M_{\odot}$ ), а затем плотность оболочки уменьшается и поток нейтрино начинает быстро падать. За это время оболочка должна излучить до  $3 \cdot 10^{48}$  нейтрино с энергиями выше 100 ГэВ. При этом, если вспышка произойдет в центре нашей Галактики, Баксанский нейтринный телескоп ИЯИ АН СССР регистрирует за 5 месяцев активной нейтринной фазы около 1000 мюонов, образованных в реакциях  $\nu_{\mu}(\bar{\nu}_{\mu}) + N \rightarrow \mu^{\pm} + \text{адроны}$ .

Существуют ли в нашей Галактике другие дискретные источники с мощным нейтринным излучением, помимо сверхновых? Быть может и нет, ибо, вообще говоря, такие источники уже обнаружили бы себя  $\gamma$ -излучением. Однако здесь надо сделать существенные оговорки в попытке предусмотреть сюрпризы природы. Например, в Галактике могут существовать звезды, испускающие мощный поток нейтрино высоких энергий, но при наблюдении во всех видах электромагнитного излучения неотличимые от обычных сверхгигантов.

Сверхгиганты — это массивные звезды в 10 или даже в 50 раз тяжелее Солнца, со светимостью, достигающей  $2 \cdot 10^5$  его светимости. В течение долгого времени сверхгигант описывали как одиночную звезду, в центре которой в результате выгорания водорода образовалось гелиевое ядро, а горение водорода во внешней оболочке привело к «разбуханию» звезды. Однако в последние годы были проведены расчеты для моделей, в которых сверхгиганты описывались как двойные звезды. Согласно одной из таких моделей, внутри общей оболочки находятся вращающиеся друг относительно друга пульсар и гелиевое ядро массивной звезды, похожее на белый карлик. Такая система могла бы образоваться при вспышке сверхновой в двойной системе. Космические лучи должны ускоряться в магнитосфере пульсара и создавать в толстой (около  $10^5$  г/см<sup>2</sup>), но разреженной оболочке гиганта нейтринное излучение, в то время как ни  $\gamma$ -, ни рентгеновское излучения не могут пройти сквозь оболочку. Такая звезда может генерировать в секунду до  $10^{35}$ — $10^{36}$  нейтрино с энергиями выше 1 ТэВ. Описанная модель представляет собой пример «скрытого» источника: если бы не нейтринное излучение, мы не могли бы отличить такую систе-

му от обычного одиночного гиганта с гелиевым ядром.

Можно ожидать, что в галактиках существуют скрытые источники и других типов. Ими могут быть, например, пульсар с протяженной внешней оболочкой, пульсары или черные дыры в газово-пылевых коконах, из которых развивается празвезда и другие подобные источники. Однако для нашей Галактики существование таких источников маловероятно, а обнаружить их в других галактиках нельзя из-за слишком больших расстояний.



Генерация нейтринного излучения в расширяющейся оболочке сверхновой. Ускоряясь в магнитосфере пульсара, космические лучи «впрыскиваются» в газовую оболочку и производят там поток  $\bar{\nu}$ -нейтрино. Если вспышка сверхновой произошла в центре нашей Галактики и молодой пульсар образовался с параметрами, необходимыми для поддержания потока космических лучей в Галактике (начальная светимость  $L_0 \approx 10^{43}$  эрг/с, характерное время торможения  $t \approx 10$  лет, полная энергия космических лучей  $W \approx 10^{50}$  эрг, показатель интегрального спектра генерации  $\gamma \approx 1,3$ , масса сброшенной оболочки  $\sim M_{\odot}$ , начальная скорость ее расширения  $V \sim 10^9$  см/с), то Баксанский нейтринный телескоп ИЯИ АН СССР регистрирует за 5 мес около 1000 мюонов с энергией, превышающей 100 ГэВ.

**Активные ядра галактик как источники нейтрино.** В наблюдательной астрономии нет явления более удивительного и грандиозного, чем излучение активных галактических ядер: квазаров, лацертидов, ядер сейфертовских и радио-галактик. Огромная энергия, от  $10^{44}$  до  $10^{48}$  эрг, в виде инфракрасного, оптического, радио-, рентгеновского и  $\gamma$ -излучений испускается

за одну секунду областью, размер которой не превышает  $10^{18}$  см. Более того, можно считать надежно установленным, что все наблюдаемое выделение энергии происходит в «ядрышке» — ядре с радиусом не более  $10^{16}$  см.

Замечательной особенностью активных галактических ядер являются степенные, а значит нетепловые спектры излучения. Это излучение генерируется ускоренными электронами, и присутствие ускоренных протонов, необходимых для генерации нейтринного излучения, представляется практически несомненным.

В то время как электроны очень быстро высвечивают свою энергию, вызывая настоящий фейерверк излучения в галактическом ядре, протонная компонента космических лучей — почти «бесшумная», если только плотность газа и фотонов в центральной части ядра не слишком велика. При этом вполне возможно, как это имеет место в нашей Галактике, что светимость ядра в протонной компоненте в 100 раз больше, чем в электронной, т. е. полная светимость галактических ядер значительно превышает наблюдаемую. Такой факт, если бы он был обнаружен, не мог бы не повлиять на модели галактических ядер. Обнаружение протонной компоненты космических лучей в источнике — это задача нейтринной астрономии, ибо нейтрино прямо связано с ускоренными протонами или ядрами и притом только с ними.

Каким же образом может генерироваться нейтринное излучение в галактических ядрах?

В настоящее время существуют две наиболее правдоподобные модели, объясняющие активность галактических ядер.

Согласно первой из них, в центре ядра галактики находится массивная черная дыра, и выделение энергии происходит в результате падения окружающего газа на черную дыру. Он может падать на нее равномерно со всех направлений (сферическая аккреция) или образовывать вращающийся вокруг черной дыры диск (дисковая аккреция). Характерные расстояния, на которых происходит трансформация гравитационной энергии падающего газа в кинетическую, составляют  $10^{14}$ — $10^{15}$  см для черной дыры в квазаре. Такие аккреционные модели для галактических ядер были впервые предложены Л. Линден-Беллом и М. Рисом (Англия).

Альтернативой является модель магнитоида. Она рассматривалась в работах Ф. Моррисона (США), В. Л. Гинзбурга, Л. М. Озерного и других. Предполагается,

что в центре галактики находится вращающееся намагниченное тело, напоминающее гигантский пульсар радиусом  $10^{16}$  см.

В. Л. Гинзбургом и автором этой статьи обсуждалось, каким образом в обеих моделях может возникать нейтринное излучение и как отличаются эти модели по генерируемым нейтринным потокам.

В модели черной дыры космические лучи могут ускоряться на небольших расстояниях от центра (около  $10^{14}$ — $10^{15}$  см) в сильно турбулентной среде или больших электрических полях, создаваемых вращающимся замагниченным диском аккрецирующего вещества. Здесь велика плотность газа и фотонов с энергиями вплоть до рентгеновского диапазона. Поэтому в модели черной дыры можно ожидать больших потоков нейтрино, сопровождаемых слабым  $\gamma$ -излучением высокой энергии. Предельной моделью такого рода является черная дыра в газовом коконе, когда давление излучения и космических лучей создает разреженную полость вокруг черной дыры с плотной газовой оболочкой на ее внешней границе. В этом случае  $\gamma$ -излучение будет поглощаться в оболочке, а нейтрино — генерироваться в ней и свободно выходить наружу.

Для модели магнитоида ситуация существенно иная.

Протоны здесь могут ускоряться только за радиусом магнитоида, т. е. на расстояниях от центра, превышающих  $10^{16}$  см, где, как известно из наблюдений, толща газа заведомо невелика и источник прозрачен для  $\gamma$ -излучения. В результате нейтринный поток обязательно сопровождается значительным потоком  $\gamma$ -излучения, что является характерным «автографом» модели магнитоида. Наиболее эффективно в этой модели генерируются нейтрино с энергией выше  $5 \cdot 10^6$  ГэВ в процессе  $p\gamma$ -столкновений с оптическими фотонами.

Ожидаемые потоки нейтрино от активных галактических ядер вызовут в планируемой глубоководной установке ДЮМАНД объемом  $10^9$  м<sup>3</sup> всего лишь несколько событий в год. Для надежной регистрации предсказываемых потоков требуется гигантская подводная установка объемом  $3 \cdot 10^{11}$  м<sup>3</sup>, которая доступна лишь при акустическом детектировании нейтрино.

**Нейтрино от яркой фазы галактик.** В истории горячей Вселенной был переломный момент, когда реликтовое излучение перестало взаимодействовать с веществом,

«оторвалось» от него<sup>7</sup>. Это случилось через  $2 \div 6 \cdot 10^5$  лет после начала расширения Вселенной, или, более точно, в эпоху с красным смещением  $z \approx 1400$ . К этому времени температура упала примерно до 4 тыс. град. и началась рекомбинация водородной плазмы, т. е. превращение электронов и протонов в нейтральные атомы водорода, с которыми реликтовые фотоны практически перестали взаимодействовать. Лишенный давления теплового излучения, газ стал гравитационно неустойчив, тем самым получив возможность свободно падать на случайно возникающие собственные уплотнения.

К этой эпохе относят образование первых гравитационно связанных объектов во Вселенной — празвезд. Ими могли быть массивные ( $M \approx 10^5 M_{\odot}$ ) взрывающиеся празвезды (А. Г. Дорошкевич, Я. Б. Зельдович и И. Д. Новиков) или звезды с  $M \sim M_{\odot}$ , которые к настоящему времени превратились в черные дыры или холодные звезды, составляющие скрытую массу Вселенной (П. Дикки и Р. Пиблз, США, и М. Рис, Англия). Любой из этих процессов должен был сопровождаться вспышкой космических лучей и рождением  $\nu\bar{\nu}$ -нейтрино, образующихся в результате столкновений протонов с реликтовыми фотонами.

В настоящее время ( $z=0$ ) температура реликтового излучения равна 2,9 К, что соответствует средней энергии реликтовых фотонов  $6,8 \cdot 10^{-4}$  эВ и их пространственной плотности около 500 фотонов/см<sup>3</sup>. Протоны с энергией, превышающей  $E_0 = 6,1 \cdot 10^{10}$  ГэВ, испытывают во Вселенной сильное торможение вследствие столкновений с реликтовыми фотонами ( $p + \gamma_{\text{рел}} \rightarrow \pi + N$ , где N — это протон или нейтрон).

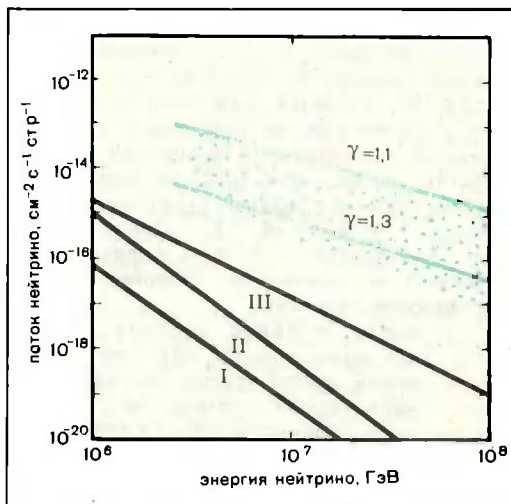
В эпоху с красным смещением  $z$  торможение протонов происходило гораздо эффективнее, так как энергия реликтовых фотонов и их пространственная плотность были, соответственно, в  $(1+z)$  и  $(1+z)^3$  раз больше, чем сейчас. Образование пионов приводит к рождению нейтрино, энергетический спектр которых должен иметь максимум из-за порогового характера образования пионов. Энергию  $E_m$  в максимуме спектра легко найти, если учесть,

что протон в  $\nu\bar{\nu}$ -столкновении передает 4% своей энергии нейтрино, а затем, вследствие красного смещения, энергия нейтрино уменьшается в  $(1+z)$  раз:

$$E_m \approx 0,04 \frac{E_0}{(1+z)^2} \approx \frac{2,4 \cdot 10^9}{(1+z)^2} \text{ ГэВ.}$$

Таким образом, определять космологическую эпоху, в которую произошла вспышка генерации протонов, можно по максимуму в энергетическом спектре нейтрино.

Интересно отметить, что ранние эпохи Вселенной скрыты от нас «пеленой»



Диффузные потоки нейтрино (потоки, более или менее равномерно приходящие со всех направлений и в которых неразличимы отдельные источники). На графике изображены интегральные энергетические спектры, дающие число нейтрино с энергией выше данной. Потоки нейтрино, генерированные первичными космическими лучами в атмосфере Земли, описываются линиями I (вертикальный поток нейтрино, образующийся при распаде  $\bar{L}$ - и  $K$ -мезонов), II [такой же поток в горизонтальном направлении] и III [поток «прямых» нейтрино, образующихся при распаде короткоживущих частиц]. Пунктирные линии дают диффузный поток нейтрино, которые рождаются в столкновениях галактических космических лучей с галактическим газом, в направлении на Галактический центр; цветные линии — поток, ожидаемый от яркой фазы галактик, при красном смещении  $z=20$  и двух значениях показателя интегрального спектра  $\gamma$  (величины этих потоков взяты из работы Л. М. Озерного и автора).

реликтового излучения, которая не пропускает никаких частиц высокой энергии, кроме нейтрино: электроны, фотоны, протоны и атомные ядра высоких энергий — все они сильно тормозятся или поглощаются при столкновении с реликтовыми фотонами. Если же говорить об эпохах с красным смещением  $z > 300$ , то тогда,

<sup>7</sup> Подробнее о реликтовом излучении см.: Зельдович Я. Б., Сюняев Р. А. Нобелевская премия 1978 г. по физике — А. Пензиасу и Р. Вильсону. — Природа, 1979, № 1, с. 101.

помимо поглощения частиц высоких энергий реликтовым излучением, должно было происходить еще и поглощение в газе частиц меньших энергий. И в этом случае нейтрино высоких энергий оказываются для нас единственным каналом связи с этими эпохами.

Описанную выше гипотетическую вспышку активности Вселенной на стадии рекомбинации водорода можно назвать догалактической яркой фазой Вселенной.

С большей определенностью мы можем говорить о другой яркой фазе, связанной с образованием галактик и массивных звезд первого поколения. С теоретической точки зрения, эпоха галактической яркой фазы могла иметь место при красных смещениях в интервале от  $z=3+4$  до  $z=100$ . Имеется довольно обширная, хотя и косвенная, аргументация в пользу активных галактических процессов в эпохи с достаточно большим красным смещением ( $z \geq 10$ ), однако, с другой стороны, адиабатическая теория А. Г. Дорошкевича, Я. Б. Зельдовича и Р. А. Сюняева предсказывает относительно позднее ( $z < 10$ ) образование галактик.

И вновь нейтрино высоких энергий могут дать возможность прямого поиска галактической яркой фазы, так как генерация нейтринного потока и энергия максимума нейтринного спектра здесь остаются теми же, что и для рассмотренной выше догалактической яркой фазы. Однако следует подчеркнуть, что по мере уменьшения  $z$  эффективность нейтринного поиска яркой фазы снижается, а при  $z \leq 5$  этот метод, по-видимому, вообще не сможет быть использован.

## ДЕТЕКТИРОВАНИЕ

Во взаимодействии нейтрино высоких энергий с веществом существуют три эффекта, которые можно использовать для регистрации этих частиц.

Первый из них связан с образованием мюонов высоких энергий в реакции  $\nu_\mu(\bar{\nu}_\mu) + N \rightarrow \mu^\pm + \text{адроны}$ . При высоких энергиях мюоны имеют очень большие пробеги в веществе. Так, в воде при энергии 100 ГэВ пробег мюона составляет около 400 м, а при энергии 1 ТэВ — почти 3 км. Поэтому при регистрации мюонов в подземных или подводных экспериментах нейтринной мишенью служит сама окружающая среда, а детектор должен лишь регистрировать поток образовавшихся мюонов. Важная особенность метода — это возможность определять направление на источник, так как

мюон высокой энергии сохраняет направление движения нейтрино.

Второй эффект заключается в том, что нейтрино при взаимодействии с веществом в самом детекторе рождает адроны (в реакции  $\nu_i(\bar{\nu}_i) + N \rightarrow l + \text{адроны}$ , где  $l$  — это электрон или мюон), которые дают начало ядерно-электромагнитному ливню. Если первым способом можно зарегистрировать исключительно мюонные нейтрино, то второй более эффективен для электронных нейтрино, вся энергия которых (через электрон и адроны) переходит в ядерно-электромагнитный каскад.

И, наконец, третий эффект относится только к электронным антинейтрино ( $\bar{\nu}_e$ ) очень высоких энергий ( $\sim 6 \cdot 10^6$  ГэВ) и заключается в резонансном рождении промежуточного  $W$ -бозона в реакции  $\bar{\nu}_e + e^- \rightarrow W^- \rightarrow \text{адроны}$ . В сечении взаимодействия  $\bar{\nu}_e$ -нейтрино с электроном имеется резкий пик при энергии нейтрино в лабораторной системе  $E_0 = m_w^2/2m_e \approx 6 \cdot 10^6$  ГэВ, где  $m_w \approx 80$  ГэВ — масса  $W$ -бозона в модели Вайнберга — Салама, а  $m_e$  — масса электрона. Он отвечает энергии, равной массе  $W$ -бозона в системе центра инерции сталкивающихся частиц. Если мы будем измерять ядерно-электромагнитные ливни, вызываемые адронами глубоко под водой, то в частоте их появления мы должны обнаружить резкий пик при энергии  $E_0 \approx 6 \cdot 10^6$  ГэВ, соответствующий резонансному пику в сечении  $\bar{\nu}_e + e^- \rightarrow W^- \rightarrow \text{адроны}$ . Для потока  $\Phi_{\nu_e}$  ( $> E_0$ ) электронного антинейтрино, изотропно падающего на Землю и имеющего степенной энергетический спектр  $E^{-(\gamma+1)}$ , число ливней с полной энергией  $E$ , вызываемых  $\bar{\nu}_e$ -нейтрино в единицу времени в объеме с числом электронов  $N_e$ , равно

$$\nu_{\text{рез}} \approx 2\pi N_e \sigma_{\text{эф}} \gamma \Phi_{\nu_e} (> E_0).$$

Сечение  $\sigma_{\text{эф}}$ , входящее в эту формулу, представляет собой сечение в резонансном пике, «размазанное» по всем  $\bar{\nu}_e$ -нейтрино с энергией, большей  $E_0$ ; оно равно  $3 \cdot 10^{-32}$  см<sup>2</sup>, что в 30 раз превышает сечение рассеяния нейтрино на нуклоне при той же энергии. Поэтому при  $E \geq E_0$  большая часть ливней рождается за счет резонансного  $\bar{\nu}_e e^-$ -взаимодействия.

На основе описанных здесь эффектов созданы и планируются установки по детектированию космических нейтрино.

С 1979 г. начал свою патрульную службу нейтринный телескоп Института ядерных исследований АН СССР на Северном Кавказе. В задачу телескопа входит



регистрация нейтрино низких (10—20 МэВ) и высоких ( $\geq 100$  ГэВ) энергий от вспышек сверхновых.

Ожидается, что это будет происходить следующим образом. Сначала телескоп регистрирует короткую (длительностью около 20 с) вспышку электронных анти-нейтрино низких энергий от коллапса по реакции  $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$ , происходящей непосредственно в сцинтилляционных детекторах. По данным об этой вспышке нельзя установить направление на источник. Нейтрино высоких энергий ( $E_\nu \geq 100$  ГэВ), испускаемые оболочкой сверхновой, начнут приходить на Землю не ранее, чем через несколько часов после этого. Установка обнаружит их появление по мюонам высокой энергии, которые рождаются в грунте около детектора и пересекают его по прямолинейным траекториям, направленным на сверхновую. Фаза излучения нейтрино высоких энергий должна продолжаться около полугода. Большое достоинство нейтринного телескопа — возможность одновременного обзора большой части небесной сферы, причем центральные области Галактики, где и происходят невидимые вспышки сверхновых, просматриваются телескопом через всю толщу земного шара, которую атмосферные мюоны не могут преодолеть.

Перейдем теперь к другой установке, которая пока находится в стадии проектирования и лабораторных исследований, — ДЮМАНД. Проект этой установки разрабатывается несколькими американскими университетами при участии физиков из других стран — СССР, Японии и ФРГ.

В этом эксперименте в качестве детектора планируется использовать около  $10^9$  м<sup>3</sup> океанской воды на глубине 5 км. Наружные слои воды должны служить защитой от фоновых излучений. В объеме детектора предполагается разместить около 7 тыс. модулей, которые будут детектировать черенковское излучение от ядерно-электромагнитных ливней и мюонов, рожденных атмосферными и космическими нейтрино с энергиями выше 1 ТэВ. Точность определения траектории мюона, пересекающего всю установку, составит около 1°, следовательно, установка ДЮМАНД будет работать как нейтринный телескоп с хорошим угловым разрешением. Его обзор будет в основном ограничен пределами нашей Галактики, а внегалактические источники смогут вызвать в объеме ДЮМАНД лишь единичные события.

Дальнейшие перспективы развития нейтринной астрофизики связывают прежде всего с многообещающим методом акустического детектирования нейтрино<sup>8</sup>. Он был предложен в 1976 г. Г. А. Аскарьяном и Б. А. Долгошеиным, а также Т. Боуэном в США. Акустический метод, в принципе, позволяет использовать большие объемы океанской воды в качестве детектора, так как, в отличие от света, звуковой сигнал распространяется в воде без заметного поглощения на расстояние порядка 1 км и детектировать его можно относительно дешевыми гидрофонами. По оценкам Аскарьяна и Долгошеина, установка из 100 тыс. гидрофонов позволяет «прослушивать» 100 км<sup>3</sup> воды, при этом пороговая энергия регистрируемых нейтрино составит  $10^7$  ГэВ, т. е. окажется вблизи  $\bar{\nu}_e$ -e-резонанса с его большим сечением. Громадный объем акустического детектора делает его внегалактическим нейтринным телескопом: он может регистрировать как наиболее мощные или близкие активные галактические ядра, так и поток от яркой фазы.

Экспериментальная нейтринная астрономия сделала свои первые робкие шаги. Горизонт ее телескопов пока ограничен пределами Галактики, но автор уверен, что в обозримом будущем с помощью гигантских подводных телескопов исследователи увидят небо, сияющее «нейтринными звездами».

<sup>8</sup> Об акустическом методе регистрации нейтрино см.: Долгошеин Б. А. Звук от нейтрино. — Природа, 1978, № 8, с. 84.

#### РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Марков М. А. НЕЙТРИНО. М.: Наука, 1964.

Березинский В. С., Зацепин Г. Т. ВОЗМОЖНОСТИ ЭКСПЕРИМЕНТОВ С КОСМИЧЕСКИМИ НЕЙТРИНО ОЧЕНЬ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ: ПРОЕКТ ДЮМАНД. — Успехи физических наук, 1977, т. 122, с. 3.

Berezinsky V. S., Ginzburg V. L. ON HIGH ENERGY NEUTRINO RADIATION OF QUASARS AND ACTIVE GALACTIC NUCLEI. — Monthly Notices of Royal Astronomical Society, 1981, v. 194, p. 3.

Berezinsky V. S. EXTRATERRESTRIAL NEUTRINO SOURCES AND HIGH ENERGY NEUTRINO ASTROPHYSICS. — Proceedings of Int. Conf. «Neutrino-77». М., 1978, p. 177.

Eichler D., Schramm D. N. HIGH ENERGY NEUTRINO ASTROPHYSICS. — Nature, 1979, v. 275, p. 704.

## Будущее ресурсов гелия

В. П. Якуцени



Вера Прокофьевна Якуцени, доктор геолого-минералогических наук, заведующая лабораторией геологии природных газов Института геологии Коми филиала АН СССР. Специалист по геологии гелия.

Если мы попытаемся оценить, какой из элементов «самый, самый...», то невольно приходит на память гелий. Оригинальна даже история его открытия: вначале гелий обнаружили на Солнце и лишь много лет спустя — на Земле. Гелий — самый инертный элемент. Он обладает крайне высокими диффузионными свойствами и теплопроводностью. Легче его лишь водород. Гелий диамагнитен, не подвержен радиации; он единственный из газов не переходит в жидкое состояние до крайне низких температур (4,2 К). Гелий — единственный элемент, который в жидком состоянии не отвердевает при нормальном давлении, как бы глубоко его ни охлаждали. В области температур, близких к абсолютному нулю (2,2 К), гелий приобретает весьма необычные физические свойства — резко теряет вязкость, становясь сверхтекучей жидкостью; его теплопроводность увеличивается в  $10^8$  раз, увеличивается скорость распространения в нем звука и т. п.

Этот далеко не полный перечень свойств гелия предопределяет совершенно особое внимание к нему со стороны технического применения. Без гелия невозможно приблизиться к абсолютному нулю. Он — безопасный переносчик тепла в ядерных реакторах. Применение сверхпрово-

дящих систем с охлаждением жидким гелием открывает новые горизонты в дальней передаче электроэнергии без потерь, создании генераторов, моторов, мощных сверхпроводящих магнитов для самых разных промышленных нужд, в том числе и для термоядерных реакторов. Его свойством высокой проницаемости пользуются при испытаниях герметичных систем, а совершенной инертностью — при получении сверхчистых и полупроводниковых материалов. Он незаменим и в воздухоплавательной технике.

Но пока в лабораториях и институтах выявляют все новые и новые области применения гелия, его весьма ограниченные ресурсы интенсивно и безвозвратно истощаются, переходя в атмосферу при утилизации природного газа — единственного источника промышленного получения гелия.

В значительных масштабах гелий накапливается лишь в природных газах, причем только в качестве примеси. Свободных скоплений не создает. Являясь попутным компонентом в газах, гелий при их сжигании переходит в атмосферу и здесь безвозвратно теряется. На сей раз вступают в силу уникальные геохимические особенности гелия: он не накапливается в атмосфере в отличие от других инертных га-

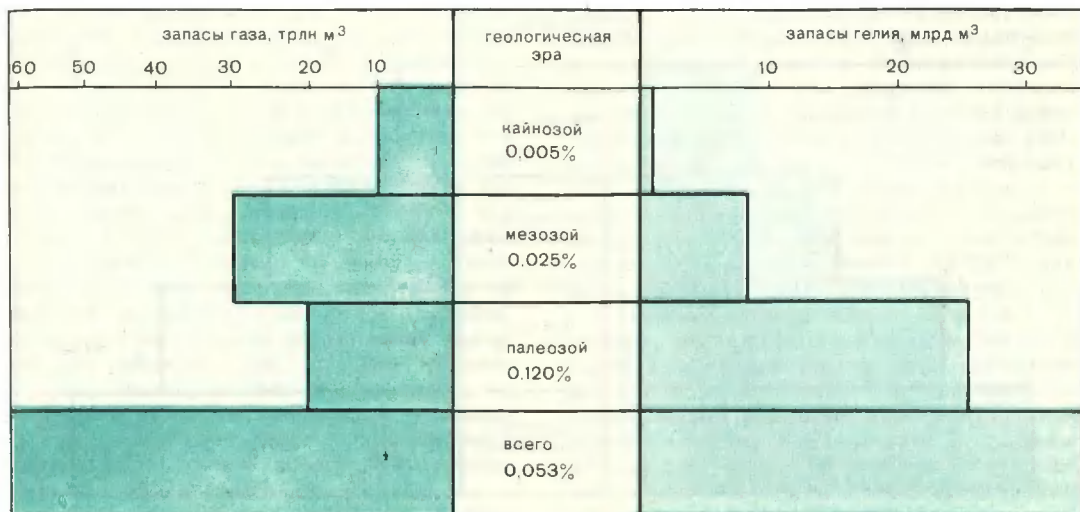
зов — аргона, неона, криптона и ксенона, а, будучи крайне легким и подвижным, улетучивается из воздушной оболочки Земли. В гелиево-водородном шлейфе, который влечет за собой и рассеивает по космической орбите наша планета, содержится не только гелий, который теряется ею в геологических процессах, но и тот, что ежегодно вылетает, в прямом смысле слова, в трубу при сгорании природных газов.

Если учесть, что в 1980 г. во всем мире добыто 1,4—1,6 трлн м<sup>3</sup> газа, содержащего в среднем 0,04% гелия, то только

Так в цифрах выглядит судьба гелия — уникального и нередко незаменимого промышленного сырья.

### ИСТОЧНИКИ ПРОМЫШЛЕННОГО ПОЛУЧЕНИЯ ГЕЛИЯ

В первую мировую войну, когда впервые понадобился гелий в больших объемах для наполнения дирижаблей, его брали из залежей природных газов, из естественных газовых струй подземных источников и даже из монацитовых песков,



Распределение разведанных запасов свободных газов и гелия по геологическим эрам. В процентах выражена концентрация гелия по отношению к запасам газа.

обогащенных гелием за счет процессов  $\alpha$ -распада тория. Но по мере роста объемов промышленного потребления гелия круг объектов, пригодных для его извлечения, постепенно сужался, и в настоящее время единственным источником рентабельного получения гелия служат природные газы.

Как и к любому иному виду полезного ископаемого, к источнику промышленного получения гелия предъявляются два главных требования — сравнительно высокое содержание его в исходном сырье и техническая доступность извлечения.

Современное промышленное получение гелия из газов основано на его способности сохранять газообразное состояние при низких температурах. Производится оно путем «вымораживания» при температуре примерно —190°С всех остальных газов — углеводородов, азота, аргона и др. Разработан и диффузионный способ извлечения гелия, суть которого сводится к пропусканию гелиеносного газа по изби-

в этом году оказались уничтожены 560—640 млн м<sup>3</sup> гелия. Для оценки масштабов этих потерь укажем, что за год Земля за счет ядерных процессов, и в том числе процессов  $\alpha$ -распада радиоактивных элементов, способна образовать лишь около 30 млн м<sup>3</sup> гелия, что за счет естественной планетарной диссипации (утекания) гелия из атмосферы теряется ежегодно только 2—5 млн м<sup>3</sup> гелия<sup>1</sup> и что промышленное потребление гелия в том же 1980 г. во всем мире вряд ли превысило 25 млн м<sup>3</sup>.

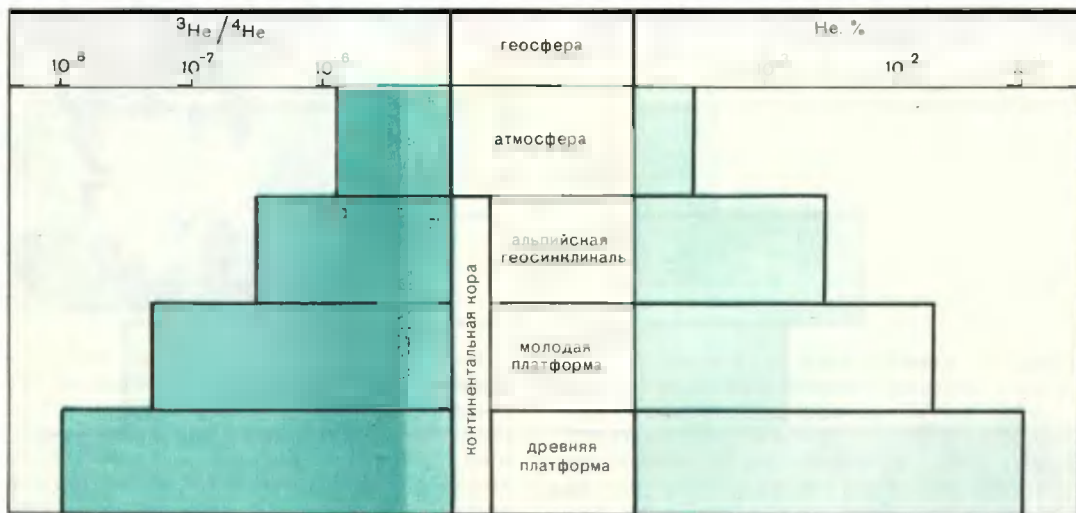
<sup>1</sup> Якуцени В. П. Геология гелия. Л.: Недра, 1968.

рательно проницаемым для гелия газопроводящим системам.

В атмосферном воздухе гелия мало — на каждую 1000 м<sup>3</sup> воздуха приходится всего 5,24 л гелия. При этом количество его над землей, океанами и городами удивительно постоянно —  $5,24 \cdot 10^{-4} \%$ .

В природных газах гелий содержится в качестве примеси в самых разных количествах — от следов до 8—10% и даже до 16—18% в водорастворенных газах. Чистых скоплений гелия в недрах не образуется

режим с помощью собственных ресурсов. Вот поэтому затруднительно назвать концентрации гелия в газах, которые были бы кондиционными для всех стран. Но экономическое мерило — стоимость — всегда сохраняется, и оно выглядит достаточно убедительно при оценке качества гелиевого газового сырья любой страны. По расчетам американских специалистов, себестоимость извлечения 1 м<sup>3</sup> гелия составляет примерно 0,4—0,5 долл. при концентрации гелия в газах 0,5%; 5,0 долл. — при



Взаимная зависимость средних величин отношений  ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$  и содержания гелия в геосфере.

0,1%; 15—17 долл. — при 0,01% и 35—125 долл. — при 0,0005% (такова концентрация гелия в атмосферном воздухе).

То есть, выбор достаточно очевиден, хотя и не для всех возможен. Именно поэтому отдельные страны Западной Европы извлекают гелий из газов, содержащих всего 0,05% гелия, а США сжигают без его извлечения газы, содержащие 0,3—0,4% гелия.

Но естественно, что запасы полезных ископаемых и их качество определяются не конъюнктурными соображениями, а геолого-технологическими, и при таком подходе оценка любого газового месторождения в качестве гелиевого значительно упрощается.

#### ИСТОЧНИКИ ГЕЛИЯ В ПРИРОДНЫХ ГАЗАХ ОСАДОЧНОЙ ТОЛЩИ

Среди всех элементов Вселенной резко преобладают легчайшие газы — водород и гелий. По данным Г. Зюсса и Г. Юри,

в силу его крайне высокой способности рассеиваться.

Естественно, что не каждое газовое скопление является гелиевым месторождением, а лишь то, концентрация гелия в газах которого достаточно велика. Каждая страна определяет промышленно пригодную концентрацию в соответствии со своими ресурсными и техническими возможностями, а также потребностью в гелии. Международный рынок гелия — понятие весьма неустойчивое в связи с преимущественно стратегическим значением отраслей промышленности, его потребляющих. Поэтому еще с первой мировой войны США, являющиеся основным производителем гелия в капиталистическом мире, резко ограничили его экспорт, и это положение сохранилось и поныне. Страны, заинтересованные в гелии, преодолевают этот жесткий

на каждый атом кремния в мировом веществе приходится  $3,08 \cdot 10^3$  атомов гелия. И хотя в земной коре гелия существенно меньше — всего  $2,16 \cdot 10^{-7}$  атомов гелия на атом кремния, но все же его распространенность не так уж и мала. Во всяком случае его здесь не меньше, чем золота, теллура, иридия, ртути. Он широко распространен в коре, но рассеян.

Основным источником образования гелия на Земле являются процессы радиоактивного распада. Каждый акт  $\alpha$ -распада приводит к образованию одного тяжелого атома гелия —  $^4\text{He}$ . Легкий изотоп гелия —  $^3\text{He}$  также образуется при ядерных реакциях, но в существенно меньших количествах.

В изотопном составе как космического, так и земного гелия преобладает тяжелый изотоп  $^4\text{He}$ . Но если в космическом гелии отношение концентраций  $^3\text{He}/^4\text{He}$  составляет, например, для метеоритов 0,2, то в атмосферном гелии —  $1,4 \cdot 10^{-6}$ , а в гелии из природных газов земной коры еще ниже — порядка  $10^{-7}$ — $10^{-8}$ . Такая разница в распространенности изотопов гелия в космосе и на Земле вызвана, во-первых, постоянной диссипацией значительных объемов  $^3\text{He}$  на всех стадиях истории Земли, особенно на ранних, и, во-вторых, столь же постоянной генерацией  $^4\text{He}$  в ходе процессов радиоактивного распада в количествах, несопоставимо больших, чем образование  $^3\text{He}$ .

Еще недавно принято было считать, что легкий изотоп гелия ( $^3\text{He}$ ) был полностью утрачен на стадии формирования нашей планеты и современный гелий — результат ядерного распада за время существования Земли. Однако исследования изотопного состава гелия в вулканических газах, а также в зонах возможного поступления ювенильных газов (в рифтах, планетарных разломах) показали, что в глубинных газах доля  $^3\text{He}$  существенно выше, чем в газах земной коры. Отношение  $^3\text{He}/^4\text{He}$  в них достигает порядка  $10^{-5}$ , т. е. иногда выше, чем даже в атмосферном гелии ( $1,4 \cdot 10^{-6}$ ). Таким образом<sup>2</sup>, была выявлена не только относительно высокая сохранность в глубинных геосферах легкого изотопа гелия, но также появилась объек-

тивная изотопно-гелиевая метка для диагностики мантийных флюидов в земной коре.

Широкие исследования изотопного состава гелия в природных газах показали интереснейшую закономерность в изменении в них величины изотопно-гелиевого отношения. Чем древнее и стабильнее блок земной коры с продуцирующим газ осадочным чехлом, тем ниже величина  $^3\text{He}/^4\text{He}$  в газах, а чем подвижнее кора и моложе осадочная газоносная толща — тем она выше<sup>3</sup>. Так, гелий в газах осадочных отложений стабильных частей древних платформ характеризуется отношениями  $^3\text{He}/^4\text{He}$  примерно  $1 \cdot 10^{-8}$ , а в осадочных отложениях кайнозоя в геосинклинальных областях  $5 \cdot 10^{-7}$ . Газы осадков молодых платформ, а также подвижных частей древних платформ характеризуются промежуточными величинами  $^3\text{He}/^4\text{He}$  порядка  $10^{-8}$ — $10^{-7}$ . Все зоны, проницаемые для мантийных флюидов, отличаются существенно большими значениями изотопно-гелиевых отношений, вплоть до  $10^{-5}$  для зон с вулканическими проявлениями.

Изменение содержания гелия в природных газах осадочной толщ является почти зеркальным отражением изменения его изотопного состава. Так, в осадочных отложениях стабильных участков древних платформ в газах содержится в среднем 0,05—0,20% гелия, на молодых платформах — 0,01—0,05% и в геосинклинальных областях — 0,001—0,01%<sup>4</sup>. То есть, чем древнее и стабильнее кора и перекрывающий ее чехол, тем больше имеется времени для накопления радиогенного тяжелого изотопа гелия и тем благоприятнее условия его сохранения. Отсюда следует естественный вывод, что накопление  $^4\text{He}$ , образующегося при радиоактивном распаде, регулирует как величину отношения  $^3\text{He}/^4\text{He}$ , так и концентрацию гелия в газах коры и чехла.

Если принять во внимание, что основное количество радиоактивных элементов сосредоточено в верхней геосфере Земли, преимущественно в континентальной гранитной части коры, то логичным становится вывод, что основные количества гелия

<sup>2</sup> Каменский И. Л., Якуцени В. П., Мамырин Б. А., Ануфриев С. Г., Толстихин И. Н. — Геохимия, 1971, № 8, с. 121; Мамырин Б. А., Толстихин И. Н. Солнечный гелий в недрах земли. — Природа, 1980, № 1, с. 2.

<sup>3</sup> Поляк Б. Г., Толстихин И. Н., Якуцени В. П. — Геотектоника, 1979, № 5, с. 281.

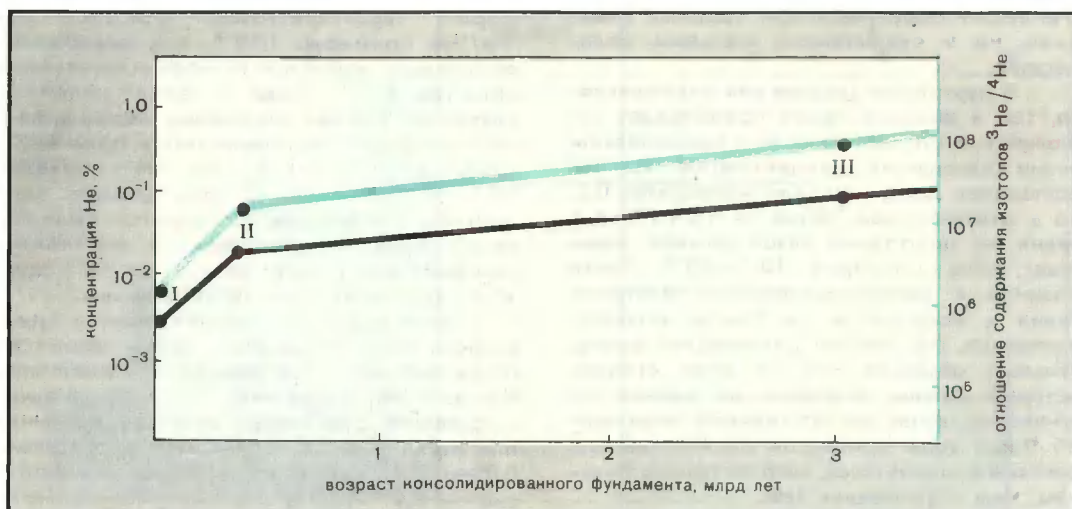
<sup>4</sup> Воронов А. Н., Тихомиров В. В., Якуцени В. П. — Советская геология, 1974, № 1, с. 9.

концентрируются в породах наиболее древних блоков земной коры<sup>5</sup>.

Дальнейшее решение проблемы источника гелия в природных газах кажется достаточно простым. Гелий образуется всюду в соответствии с содержанием рассеянных радиоактивных элементов. Накапливается в кристаллических решетках минералов в количествах, отвечающих их возрасту, частично сохраняется в них, а частично, в силу своей высокой миграционной способности, рассеивается. Накапливаясь в трещинно-поровом пространстве

валяется гелия. Именно таким условиям и отвечают в наибольшей мере древние платформы. В тех блоках коры и чехла, где вследствие процессов интенсивной газогенерации начинается дегазация, т. е. выделение газов в свободную фазу<sup>6</sup>, к ним присоединяется и гелий в равновесных по растворимостям количествах. Физическая сущность этого процесса была изучена еще в 1935—1950 гг. В. П. Савченко и А. П. Козловым.

Следовательно, первичная гелиеносность сформировавшейся в недрах газовой



Синхронное изменение средних концентраций гелия в природных газах осадочного чехла и обогащенности этих газов тяжелым изотопом гелия —  $^3\text{He}$  в зависимости от возраста участков земной коры: современных глубоких прогибов [I], молодых [II] и древних [III] платформ.

пород коры и чехла, он создает некоторый, пусть небольшой, но заметный фон собственного присутствия. Естественно, что чем стабильнее участок коры в масштабах геологического времени и больше в нем рассеяно радиоактивных элементов, тем больше в нем генерируется и накапли-

фазы определяется как количеством гелия в газоносных отложениях, способным перейти в нее, так и интенсивностью процесса газогенерации, ибо чем больше выделится газа, тем, естественно, труднее заметить в нем примесь гелия. Именно поэтому во впадинах древних платформ, заполненных мощным чехлом осадков с повышенной газогенерационной способностью, содержание гелия в газах существенно ниже, чем в зонах чехла с меньшей мощностью осадков.

Дальнейшая судьба свободной газовой фазы в недрах определяет и ее конечную гелиеносность, которую мы обнаруживаем в газовых месторождениях. Если газ длительно мигрировал по коллекторам, на-

<sup>5</sup> Безошибочность этого утверждения контролируется фактическими значениями теплового потока. Если предположить, что в глубоких геосферах Земли содержится такое количество урана и тория, как и в гранитной коре, то тепловый поток, соответствующий этому значительному количеству радиоактивных элементов, расплавило бы кору, чего нет в действительности.

<sup>6</sup> Состав газа-носителя при этом может быть любым:  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ . Имеет значение лишь тот факт, что азотные газы интенсивнее обогащаются гелием, достигая самых больших его содержаний, но доля запасов азотных газов в недрах несоизмеримо меньше углеводородных.

сыщенным гелиеносными водами, извлекая из них дополнительный гелий и, в конечном итоге, попав в ловушку, сформировал в ней залежь, то мы вскрываем тот самый сравнительно богатый гелием газ (0,05—0,20%), который так характерен для древних платформ всего мира.

Понятой при этом становится и низкая гелиеносность газов в осадочных отложениях альпийских геосинклинальных областей. В них все геологически молодо. Кора, претерпев катаклизмы складчатых эпох и прогрева, потеряла ранее имевшийся гелий и не успела накопить новый. Совсем юн и осадочный чехол, к тому же поменьше в нем и радиоактивных элементов. В результате не много гелия удается прихватить из отложений кайнозойского природным газам при выделении их в свободную фазу. Поэтому столь однообразно и безнадежно бедны гелием газы в отложениях кайнозой молодых геосинклиналей по всему миру — 0,001—0,01%. В полном соответствии с этой схемой промежуточные место занимают газы мезозойского осадочного чехла молодых платформ; в них содержится 0,01—0,05% гелия.

Эта в целом простая и ясная схема формирования гелиеносности природных газов осадочного чехла в целом довольно неплохо согласуется с обширным фактическим материалом, накопленным за многие годы работы автором совместно с А. Н. Вороновым, В. В. Тихомировым и другими геологами. Согласуется, но все же неполностью и не повсеместно. Причем исключения характерны как раз для наиболее богатых гелием газов, т. е. лучших гелиевых месторождений.

### ГЕЛИЕВОЕ МЕСТОРОЖДЕНИЕ — УНИКАЛЬНОЕ ЯВЛЕНИЕ ПРИРОДЫ

Если считать высококачественным гелиевым месторождением среднее по запасам газовое месторождение (10—50 млрд/м<sup>3</sup>) с концентрацией гелия выше 0,5%<sup>7</sup>, то таких месторождений мы сможем насчитать лишь несколько десятков из более чем 11 тысяч выявленных на сегодня месторождений газа. Так что их уникальность очевидна даже чисто статистически, а геологически она как раз и складывается из сочетания многих исключительных усло-

вий, которые, собственно, и создают факты, требующие объяснений.

Суть главного противоречия состоит в том, что есть газовые залежи, преимущественно азотного состава, количество гелия в которых столь велико (7—10%), что если его накопление вызвано только радиоактивным распадом, то, ориентируясь даже на сравнительно высокую обогащенность отложений радиоактивными элементами, потребуется время, большее чем возраст самой планеты.

Что же заставляет гелий, с его ярко выраженными инертными свойствами, хотя и на локальных участках, но все же концентрироваться в столь необычно больших количествах?

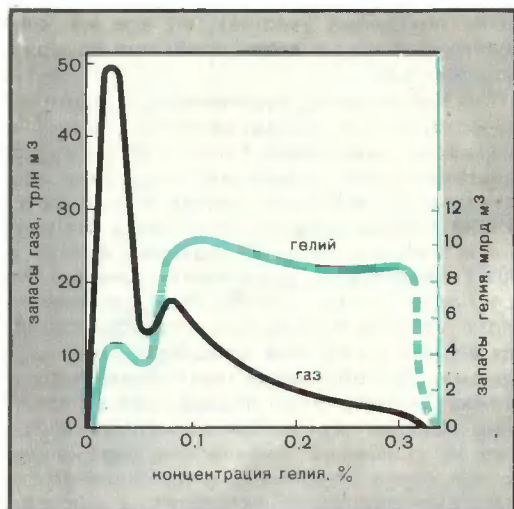
Как правило, «ураганные» концентрации гелия, не укладывающиеся даже в самый оптимистичный баланс собственного, сингенетического осадочной толще генезиса, связаны с дегазацией пород фундамента. Такие месторождения чаще всего приурочены к зонам недавних подвижек древнего кристаллического фундамента. Они как бы собирают гелий, копившийся миллиарды лет в породах фундамента и освободившийся из них вследствие процессов метаморфизма. При обширных тектонических подвижках напряжениям подвергаются огромные объемы пород. При этом изменяются все их основные физические параметры, в том числе пористость и проницаемость. Местами породы уплотняются, а местами в них образуются многочисленные трещины и породы становятся менее плотными. Нередко такие напряжения захватывают объемы пород в сотни тысяч и более кубических километров, освобождая из кристаллических решеток минералов значительные объемы гелия, мигрирующего частично в осадочный чехол, а местами и на поверхность.

Естественно, что поток гелия из пород фундамента в осадочный чехол в таких ситуациях окажется неспособным выше собственных гелиегенерационных возможностей осадочной толщи, но для его реализации в виде газогелиевых месторождений с «ураганными» концентрациями гелия необходимо сочетание следующих условий. Земная кора должна накопить гелий, т. е. длительно находиться в спокойном состоянии, в эпохи, предшествующие тектоническим перемещениям (фактор времени). Затем она должна подвергнуться термическому и динамическому метаморфизму с формированием широкой сети проницаемых зон (фактор миграции). Причем тектоноподвижки не должны быть

<sup>7</sup> Условность этого определения очевидна потому, что каждая страна оценивает качество сырья, исходя из собственных сырьевых возможностей и потребности.

слишком давними, так как высокий местный гелиевый потенциал, если он не поддерживается постоянными поступлениями или весьма надежными условиями хранения, для столь рассеянного элемента как гелий — явление безусловно временное. Желательна также, хотя и не обязательна, повышенная рассеянная радиоактивность пород (фактор интенсивной радиогенной гелиегенерации).

Осадочный чехол, перекрывающий эту кору, должен быть прежде всего газопродуктивным, а тектонические подвижки



Распределение разведанных запасов газа и гелия в свободных и растворенных в нефти газах. Интересно, что всего 10,3% запасов газа с концентрацией гелия свыше 0,1% содержат 48,8% всех запасов гелия.

в чехле — не слишком интенсивными, иначе утратится и газ, и содержащийся в нем гелий, мигрирующий в чехол из фундамента. Мощность чехла не должна быть слишком большой — оптимально до 3—4 км, в противном случае глубинный гелиевый поток проникнет преимущественно лишь в низы чехла, где либо останется в растворенном в водах состоянии, либо будет разбавлен вследствие интенсивной генерации газа.

Всем этим условиям, как правило, отвечают неглубокие нефтегазоносные бассейны, которые расположены на древних платформах в зонах, переживавших период тектонической активизации, в основном, в кайнозое. К сожалению, таких участков на Земле мало. Немного, соответственно,

и высококачественных гелиевых месторождений.

Характерно, что в зонах с «ураганными» концентрациями гелию свойственны низкие величины изотопных отношений  $^3\text{He}/^4\text{He}$  порядка  $10^{-8}$ , что свидетельствует о его радиогенном образовании в земной коре. Поэтому нет необходимости привлекать подкоровые глубины к объяснению высоких содержаний гелия в активизированных зонах древних щитов<sup>6</sup>. И лишь в тех случаях, когда отмечаются высокие или хотя бы повышенные отношения изотопов гелия (к примеру, выше  $5 \cdot 10^{-7}$ ), вывод в пользу дополнительного поступления первозданного гелия из подкоровых глубин становится логичным.

Таким образом, появление в осадочном чехле газов с избыточной гелиееносностью (относительно собственных гелиегенерационных возможностей осадков) свидетельствует прежде всего о смешанном балансе гелия, о миграции гелия из более древних пород фундамента в чехол по всем проницаемым зонам. Следовательно, ничего противоречивого в появлении даже сверхвысоких концентраций гелия нет. Есть правило, согласно которому природные газы осадочной оболочки содержат гелий в количествах, близких к собственным гелиегенерационным возможностям чехла. И лишь на отдельных участках коры с условиями, благоприятными для миграции, накопления и сохранения глубинного гелия, формируются те самые уникальные газовые месторождения с аномально высокими концентрациями гелия, которые и являются высококачественными гелиевыми месторождениями.

Следует подчеркнуть, что данные выводы базируются на анализе свыше 25 тыс. определений концентраций гелия в свободных газах и 7 тыс. — в нефтях и глубинных пластовых водах и характеризуют месторождения подавляющего большинства нефтегазоносных бассейнов мира. Поэтому нет оснований предполагать, что будущие открытия изменят выводы об ограниченности высококачественных гелиевых ресурсов.

Итак, при оценке общемировых ресурсов гелия приходится ориентироваться не на уникальные высококачественные гелиевые месторождения, а на газовые месторождения с концентрацией гелия хотя бы не меньше 0,05%. В таком случае

<sup>6</sup> Еремеев А. Н., Яницкий И. Н. Гелий раскрывает тайны недр. — Природа, 1975, № 1, с. 23.



оказывается, что подавляющая доля ресурсов гелия приходится на платформенные палеозойские отложения, т. е. на территории наиболее разведанные и, главное, освоенные нефтегазовой промышленностью, на которых уже десятилетиями идет добыча запасов гелиеносного газа. Искрпание этих ресурсов — дело не дальней, а ближней перспективы.

### ОХРАНА РЕСУРСОВ ГЕЛИЯ

Наблюдая за исчезновением одного за другим представителей живого мира, человечество наконец-то осознало, что эти потери безвозвратны. Появилась «Красная Книга» видов, которые находятся в угрожаемом положении. Она призвана если и не предотвратить, то хотя бы затормозить их исчезновение.

Так же обстоит дело и с гелием. Ученые Соединенных Штатов Америки — страны, владеющей существенной частью высококачественных ресурсов гелия, подсчитали, что лучшие источники гелия окажутся истощенными к концу XX в.<sup>9</sup> А к началу XXI в., надо полагать, наиболее ценным источником гелия окажутся газы, содержащие 0,010—0,035% гелия, и даже если будут найдены технически более совершенные способы извлечения гелия из газов, это все равно не изменит положения.

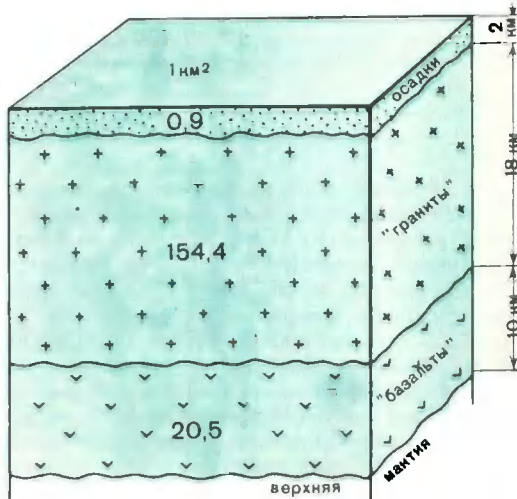
Именно поэтому мы утверждаем, что гелий нуждается в охране.

Но реальна ли охрана ресурсов гелия? Ведь любое сегодняшнее решение этого вопроса затруднительно с технико-экономической точки зрения.

Возможны два пути — либо надо извлекать гелий из всех газов (содержащих, например, не менее 0,1% гелия) и консервировать его в подземных хранилищах, либо не добывать эти газы вовсе, оставив их в резерве на будущее. Второй вариант нереален, так как энергетический кризис не позволяет резервировать газ уже открытых месторождений, если только они доступны для промышленного освоения. Первый же вариант был реализован в США в 1961—1973 гг. для газов, содержащих 0,3—0,4% гелия и выше. Но законсервировав в недрах около 1 млрд м<sup>3</sup> гелия в виде газа-сырца (~60% He и 40% N<sub>2</sub>), правительство США отказалось от дальнейшей его покупки для хранения. Таким образом, оказалось пред-

почтительнее выпускать гелий в воздух, чем снять с него клеймо «стратегического сырья» и широко продавать его другим странам для нужд, далеких от военных.

И все же извлечение гелия из газов и его консервация — это единственный путь сохранения ресурсов гелия от инстинктивного уничтожения. Но представим себе, что «все пойдет, — как писал М. Е. Салтыков-Щедрин, — заранее предусмотренным неблагоприятным чередом» и наиболее высококачественное гелиевое сырье будет уничтожено к 2000 году. Из чего же будет



Масштабы радиогенной генерации гелия (млн м<sup>3</sup> породами древней континентальной коры. Сечение условного столба пород — 1 км<sup>2</sup>, высота — 30 км. Возраст осадков — 0,3 млрд лет, «гранитной» и «базальтовой» оболочек — 3,5 млрд лет.

получать гелий человечество после 2000 года?

В первую очередь, из газов мезозоя и кайнозоя и сверхглубоких газовых залежей палеозоя, содержащих, в основном, 0,005—0,035% гелия. Далее, из содержащих высокие концентрации гелия газонасыщенных подземных вод, из воздуха попутно с аргоном, криптоном и ксеноном, а также в качестве побочного продукта ядерных реакций (синтетический гелий) и т. п.

Суммарная добыча гелия из всех этих источников не составит и половины сегодняшнего его потребления. Ну а обсуждение вопроса о доставке гелия с Юпитера мы оставим для будущих поколений научных работников, у которых много выхода не будет из-за нашей расточительности.

<sup>9</sup> Howland H. R. — Technology Review, 1975, v. 77, № 7, p. 42.

## Сихотэ-Алинский биосферный заповедник

**Е. Н. Смирнов,**  
кандидат биологических наук

**М. В. Подушко,**  
кандидат биологических наук  
Сихотэ-Алинский государственный заповедник

**Н. Г. Васильев,**  
кандидат биологических наук  
Всесоюзный научно-исследовательский институт охраны природы и заповедного дела  
Министерства сельского хозяйства СССР

Немалая роль в деле охраны природы на Дальнем Востоке принадлежит Сихотэ-Алинскому государственному заповеднику, самому крупному на территории Приморья и Приамурья. Заповедник был создан в феврале 1935 г. До 1951 г. площадь его составляла 180 тыс. га, а сегодня он занимает 350 тыс. га.

В условиях интенсивного освоения природных ресурсов Дальнего Востока задачи Сихотэ-Алинского государственного заповедника заключаются в сохранении генофонда, характерного для большей части экосистем юга Дальнего Востока, и в изучении экосистем в естественном состоянии. С включением заповедника в международную сеть биосферных, работающих по программе МАБ, перед ним поставлены новые задачи, содержание которых наиболее хорошо выражено в сертификате ЮНЕСКО, выданном заповеднику: «Экосистемы заповедника послужат образцом при определении влияния человека на окружающую среду».

### РЕЛЬЕФ И КЛИМАТ

Территория заповедника раскинута от побережья Японского моря до верховьев р. Колумбе — крупного правого притока р. Большой Уссурки. В заповедную территорию входит водораздельная часть Сихотэ-Алинского хребта с восточными и западными склонами. Главный водораздел протянулся в виде гигантской дуги в северо-восточном направлении вдоль морского побережья на расстоянии 65—70 км от него. Средняя высота горных хребтов — 600—800 м над ур. м., а отдельные вершины

(Шишкина, Туманная, Поднебесная) достигают 1400—1650 м.

С вершины горы отчетливо видно, как меняется рельеф: крутые горы сменяются широкими понижениями, возможными реликтами древних речных долин; вблизи Японского моря лежит низкогорье — высота всего 150—300 м над ур. м.); на побережье низкие участки приустьевых частей рек чередуются с высокими скалистыми берегами.

Археологические находки и исторические факты говорят о давней обжитости человеком этого региона: возраст древней стоянки человека на оз. Благодатном — 4—6 тыс. лет, на вершинах некоторых сопок сохранились остатки стен древних крепостей.

Климат среднего Сихотэ-Алия определяется влиянием, с одной стороны, континента и, с другой — Тихого океана. Этот регион интенсивно прогревается летом, зимой же остывает сильно и быстро, тогда как годовые температуры вод океана более стабильны. Возникают муссонные течения воздуха: зимние ветры сухие и холодные, достигают иногда ураганной силы, а летние ветры с океана несут с собой много влаги. Поэтому вегетационный период вблизи моря короче, чем в отдалении от него. На расстоянии в 80—100 км разница во времени прохождения одноименных фаз составляет 8—10 дней. Так, на лесном кордоне «Усть-Серебряный»,

Кордон Усть-Серебряный, осень.

Фото Г. М. Шаульского



расположенном в 25 км от приморского поселка Терней, где находится главная база заповедника, созревают в открытом грунте помидоры, можно выращивать арбузы, дыни и теплолюбивый болгарский перец, тогда как на побережье даже культивирование огурцов связано с большими трудностями.

В течение лета и осени выпадает основная масса осадков: 70—80% годовой нормы; весной осадков гораздо меньше и почти нет — зимой. Зима здесь обычно суровая и малоснежная. На побережье



Карта-схема Сихотэ-Алинского заповедника. Крестиком обозначен кордон Усть-Серебряный.

дуют сухие сильные ветры, поднимающие в воздух тучи пыли и даже мелкую гальку. В глубинных районах морозы достигают 40°C. Средний Сихотэ-Алинь относится к влажному климатическому поясу — более 700 мм осадков в течение года. От распределения осадков по сезонам года зависит и гидрологический характер густой сети сихотэ-алинских рек. Подъем воды следует непосредственно за дождями. Вода скоро скатывается с гор, поэтому продолжительность паводков невелика, но разрушительное действие их огромно. Все речки имеют горно-таежный характер: резкие перепады рельефа каменистого дна, пороги, перекаты, водопады.

## ФЛОРА И ФАУНА

Существование большого разнообразия типов фитоценозов отражает специфику географического положения заповед-

ника, экологических условий, связанных с высотой над уровнем моря и особенностями рельефа. В урочищах, защищенных от холодных ветров и хорошо прогреваемых солнцем, создаются «убежища жизни», где сохранились остатки древней флоры района, оттесненной позднее к югу (маньчжурский орех, амурский виноград, бархатное дерево и др.). С другой стороны, встречаются участки с более суровым климатом и с фитоценозами, составленными восточно-сибирскими видами (кедровый стланник, лиственница, можжевельники и др.). Как правило, фитоценозы представлены большим количеством видов, экологическая роль каждого из которых дублируется несколькими другими. В случае выпадения одного вида его функции может взять на себя другой, что обеспечивает стабильность энергетического круговорота в экосистемах даже при значительных изменениях в видовом составе фитоценозов. Наряду с группами видов, состоящих из экологических аналогов, в состав фитоценозов входят редкие виды, для которых заповедник служит границей их ареала. Эти виды перспективны в качестве видов-индикаторов изменений окружающей среды, и им уделяют особое внимание при организации биологического мониторинга.

В заповеднике ясно видны пояса растительного покрова. Приморская травянистая и кустарниковая растительность начинается от полосы морского прибоя и поднимается до высоты 100—150 м.

Большие площади, непосредственно граничащие с морем, до высоты 200—300 м заняты ассоциациями, где преобладает монгольский дуб.

Господствующее положение в заповеднике занимают кедровые леса, произрастающие в различных условиях. Кедр с многочисленными древесными породами образует различные ассоциации от кедрово-широколиственных до кедрово-еловых.

Для кедровых лесов характерны деревянистые лианы — актинидия коломикта, амурский виноград и лимонник. У некоторых из этих видов стебли толщиной в руку поднимаются в кроны деревьев на высоту 15—20 м.

Урочище Абрек, где обитают горалы. Рододендрон Фори включен в «Красную Книгу СССР».

Фото Е. А. Суворова.





Амурский соболь.  
Енот амурский.  
Кедрово-пихтовый лес.

Фото Г. М. Шаульского.

В горах на высоте 200—500 м над ур. м. расположен самостоятельный пояс кедрово-широколиственного леса. Поражает разнообразие широколиственных древесных пород, растущих в приморских кедровых лесах. Здесь можно встретить и отечественный пробконос — амурский бархат, и ближайший родственник грецкого ореха — маньчжурский орех, и мощные деревья маньчжурского ясеня и ильмов — длинного и лопастного, и несколько видов лип и кленов. Реликтовое дерево —

тис остроконечный, как и обнаруженный в последние годы в заповеднике декоративный кустарник — рододендрон Фори с крупными белыми цветками, высотой более 3 м, занесены в «Красную Книгу СССР».

Темнохвойные пихтово-еловые леса произрастают на высоте 600—1200 м над ур. м. Основные древесные породы здесь — аянская ель и белокорая пихта. Небольшие по площади участки выше этого пояса (1300 м) занимает каменная береза. Несколько выше склоны и вершины гор надежно укрыты мощными зарослями кедрового стланика. В поясе хвойно-широколиственных и пихтово-еловых лесов встречается лиственница ольгинская. Этот вид лиственницы характерен для восточных





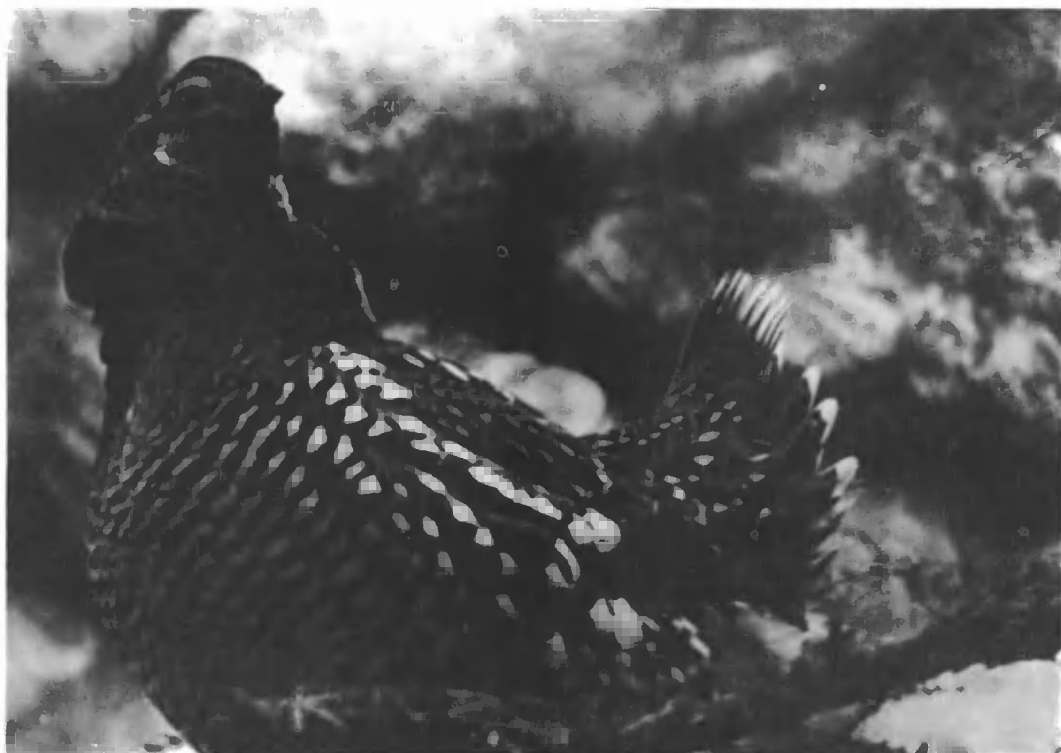
приморских склонов Сихотэ-Алиня. Своеобразны и интересны во флористическом отношении высокопроизводительные смешанные кедрово-лиственничные и елово-лиственничные леса.

Всего в заповеднике насчитывается 940 видов высших сосудистых растений, в том числе 46 видов деревьев и 68 кустарников, 250 видов мохообразных, 150 видов лишайников и более 600 видов различных грибов, из них 52 вида дереворазрушающих. Инвентаризация флоры еще не завершена, о чем свидетельствуют постоянные новые находки.

Многообразие растительных ассоциаций, климатических и геоморфологических условий обуславливают богатый

видовой состав животного мира, его качественные и количественные характеристики. Фауна позвоночных животных включает: 62 вида млекопитающих, 320 видов птиц, 30 — рыб и 12 — амфибий и рептилий. Полный учет беспозвоночных животных пока не закончен.

По зоогеографическому делению заповедная территория находится на стыке маньчжурской и охотско-камчатской областей. Здесь имеются такие южные виды, как амурский тигр, черный или белогрудый медведь, горал, пятнистый олень, енотовидная собака, крот мопера и др. В заповеднике проходит северная граница распространения некоторых из этих видов. Рядом с ними обитают в заповеднике и



Дикуша включена в «Красную Книгу СССР».

северяне: бурый медведь, лось, соболь, росомаха, горностай и др.

Почти полувековое существование заповедника способствовало, а в некоторых случаях сыграло решающую роль в сохранении нескольких редких видов животных, занесенных в «Красную Книгу СССР»: амурского тигра<sup>1</sup>, горала<sup>2</sup>, чешуйчатого крохалея, мандаринки.

До организации заповедника соболь во многих участках этого района был хищнически уничтожен. В настоящее время он стал здесь обычным видом, заселившим и прилегающие к заповеднику лесные угодья.

<sup>1</sup> Животченко В. И. Амурский тигр. Успехи восстановления вида.— Природа, 1981, № 1, с. 91.

<sup>2</sup> Об амурском горале см.: Глебов В. В., Животченко В. И., Нестеров Д. А. Современное состояние популяции амурского горала.— Природа, 1978, № 9, с. 80; Волошина И. В., Мысленков А. И. Поведение горалов.— Там же, с. 85; Соломкина Н. В. Опыт вольерного содержания горалов.— Там же, с. 90.

Выросла численность и черного медведя, который в ряде районов Дальнего Востока считается редким видом.

#### ПЕРСПЕКТИВНОСТЬ БИОСФЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Сихотэ-Алинский заповедник значительно отдален от возможных источников локальных антропогенных воздействий на среду. Территория заповедника лишь отчасти претерпела влияние человека в виде рубки кедровых лесов в бассейнах речек, размеры которых позволяли сплав леса. Приблизительно половина территории заповедника покрыта не тронутыми человеком девственными лесами. Нарушенные леса благополучно восстанавливаются естественным путем. Площадь заповедника достаточно большая для дифференцированного использования ее в решении задач мониторинга. И, наконец, за полувековую деятельность заповедника собран большой научный капитал в виде печатных и рукописных работ, содержащих результаты исследований по самым разнообразным темам. Пересмотр этих фондов даст очень много как для определения индикаторных объектов, так и для описания



и документального фиксирования современного их состояния. Почти с начала существования заповедника ведется «Летопись природы». Эта традиционная форма регистрации всех видимых явлений и процессов в природе как будто специально была предусмотрена для биосферных исследований. Материалы «Летописи» характеризуют климат, течение биологических процессов во времени, в них отражено изменение численности многих видов флоры и фауны, а также прямое или косвенное влияние человека на природу заповедника. Но в выборе индикаторных объектов, будь то ценозы или более мелкие подсистемы, популяции или отдельные виды, предстоит еще очень много сделать. Следует указать на особую ценность в таких исследованиях беспозвоночных животных. Их фауна чрезвычайно богата как в качественном, так и в количественном отношении, они стоят на первом месте в цепи потребителей и деструкторов первичной продукции. Биологические качества беспозвоночных делают их популяции очень

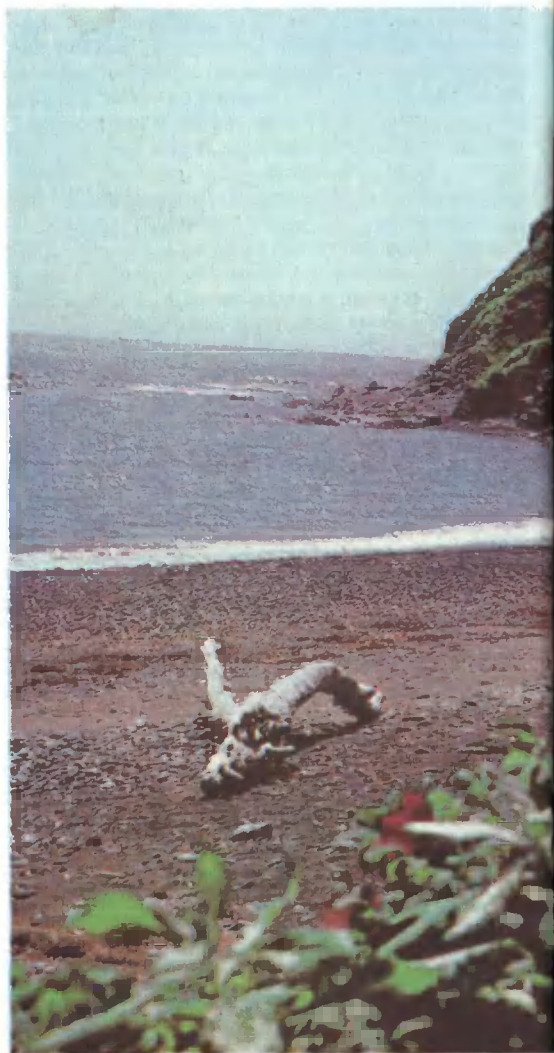
отзывчивыми на различные изменения в среде. Среди них много видов, удобных для оценки состояния мутагенных процессов.

Наряду с обстоятельствами, благоприятствующими биосферным исследованиям, в заповеднике существует ряд проблем, требующих решения. Как при организации заповедника, так и при последующих реорганизациях граница заповедника проводилась без учета выделения целостных экосистем. В заповедник включены четыре бассейна крупных рек, но все только в среднем и верхнем течении. Таким образом в пределах заповедника невозможно контролировать, а главное — сохранить те природные связи, которые существуют между сушей и океаном. О важности поступления вещества из океана в экосистемы суши наглядно говорит тот факт, что реки, впадающие в Тихий океан, «до отказа» заполнялись в течение лета и осени лососевыми породами рыбы, т. е. именно тогда, когда многим видам млекопитающих был необходим легкодоступный белковый корм, в связи с появлением потомства. Сказочные богатства медведя, выдры, соболя, морского зверя на Камчатке, Сахалине, побережье Берингова,

Кабарга в зимней тайге.

Фото Е. А. Суворова.





**Махаон.**

**Амурский полоз Шренка.**

**Побережье Японского моря.**

**Лимонник китайский, горчицет амурский и элеутерококк колючий (внизу слева направо).**

**Фото Г. М. Шаульского.**







Самец мандаринки в брачном наряде. Вид включен в «Красную Книгу СССР».

Фото Е. А. Суворова.

Охотского, Японского морей в недалеком прошлом немислимы без огромнейших стад лососей, ежегодно заходивших в реки на нерест.

Сегодня в результате такой несовершенной организации территории в бассейнах заповедных речек численность миграционных стад лососей, а одновременно и выдры, соболя, норки, медведя стала заметно ниже, чем в северных провинциях Дальнего Востока, куда ежегодно заходят из океана в реки значительные стада лососевых рыб на нерест. Таким образом, необходимо срочно включить в состав заповедника хотя бы одного полностью охраняемого бассейна реки, а также часть морской акватории, связи которой с экосистемами суши многогранны.

Особо следует сказать и о том, что на современной территории заповедника обитает всего 8—10 амурских тигров, этих редчайших хищников, занесенных в «Красную Книгу МСОП». Объясняется это тем, что участок обитания одного тигра в нашем регионе достигает 30—40 тыс. га. Чтобы обеспечить существование хотя бы 20—30 тигров, необходимо увеличить площадь заповедника в 2—3 раза. Это позволит сохранить и места зимовок медведя, большинство которых, к сожалению, расположены за пределами заповедника.

В настоящее время южнее территории Сихотэ-Алинского заповедника работает стационар по геохимическому мони-

торингу, организованный Тихоокеанским институтом географии ДВНЦ АН СССР в 1972 г.<sup>3</sup>

Исследовательский полигон (1140 км<sup>2</sup>), расположенный на восточном склоне среднего Сихотэ-Алия, представляет собой аналогичный природный район по всем физико-географическим условиям. Климат района муссонный с максимумом осадков во второй половине лета. Годовое количество осадков 500—1000 мм, из них 80% выпадает в теплый период. Растительный покров бассейна образуют широколиственные, преимущественно дубовые, леса в приморской полосе, хвойно-широколиственные — в средней части бассейна и в основном хвойные леса — приводораздельной части на высоте более 800 м. Вдоль основного русла реки расположен комплекс горнодобывающих и перерабатывающих предприятий, выбрасывающих в окружающую среду такие техногенные элементы, как сера, свинец, цинк, кадмий, мышьяк, бор, фтор и др.

В задачи геохимического мониторинга помимо изучения биогеохимических циклов миграции входило описание всего цикла осадочного процесса: т. е. мобилизация вещества (разработка месторождений открытым и подземным способами), его транспорт (водный и воздушный перенос), частичная аккумуляция в конечном бассейне стока (на верхнем шельфе). Методика исследований базируется в основном на сопряженном ландшафтно-геохимическом анализе процессов миграции вещества.

Сеть режимных пунктов наблюдения, расположенных в различных ландшафтных зонах позволяет следить за пространственным распределением элементов. Время наблюдений колебалось от 10 дней (теплое время года) до месяца или сезона и зависело от различных синоптических ситуаций: осадков, паводков и т. д.

Несмотря на свои относительно незначительные размеры и небольшие площади влияния (около 10% всей исследуемой площади), горнодобывающие и перерабатывающие предприятия служат источником значительного поступления ряда элементов в атмосферу и играют существенную роль в формировании химического состава атмосферных осадков. При общем количестве выпадающих солей

<sup>3</sup> Опыт и методы экологического мониторинга. Пушино, 1978.



Гималайский медведь.

Фото Е. А. Суворова.



Дальневосточный кот.

Фото Е. А. Суворова.

естественного происхождения (12 400 т) в атмосферу поступает 3000 т техногенных ионов, в состав которых входят ионы кальция, сульфата, бикарбоната, а также ряд микроэлементов — бор, мышьяк, свинец.

Естественно, что изменение химического состава осадков изменяет состав речных вод.

Помимо этого, техногенный фактор оказывает решающее воздействие и на формирование химического состава твердого стока реки. Исследования взвеси (методами полуавтоматической ультрамикрочистоты) определили соотношения и формы переноса микроэлементов с различными фракциями и при различных гидрорегимных режимах. Установлено, что свинец, цинк и медь переносятся в основном с гидроокислами железа и марганца.

Ниже комплекса предприятий в реке формируется и поддерживается контрастный поток рассеяния с характерным специфическим минералогическим спектром и высокими концентрациями рудных элементов.

Изучение форм миграции элементов (как в данном случае: ионный сток —

взвесь — донные осадки) имеет большое значение с точки зрения экологического мониторинга и позволяет судить о биогеохимической активности мигрирующих элементов.

В результате работ на верхнем шельфе, примыкающем к исследуемому бассейну, удалось установить аномалию техногенных элементов, сформировавшуюся в донных осадках бухты в результате поставки материала речным стоком. За пределами бухты не обнаружены аномальные концентрации свинца, цинка, кадмия и других элементов в верхних слоях донных осадков, что позволяет говорить о своеобразном механическом барьере аккумуляции вещества.

По предварительным данным, такую же роль геохимического барьера играет лагуна, расположенная при впадении реки в море. Причем здесь в результате более спокойного гидродинамического режима происходит аккумуляция техногенных элементов, связанных с более тонкими фракциями речной и морской взвеси.

Комплекс биогеохимических исследований, проводимых на стационаре, включает в себя: лихенологические исследо-



Цветы рододендрона.

Плоды шиповника.

Фото Г. М. Шаульского.

Пойменный лес.

Фото Н. Г. Васильева.

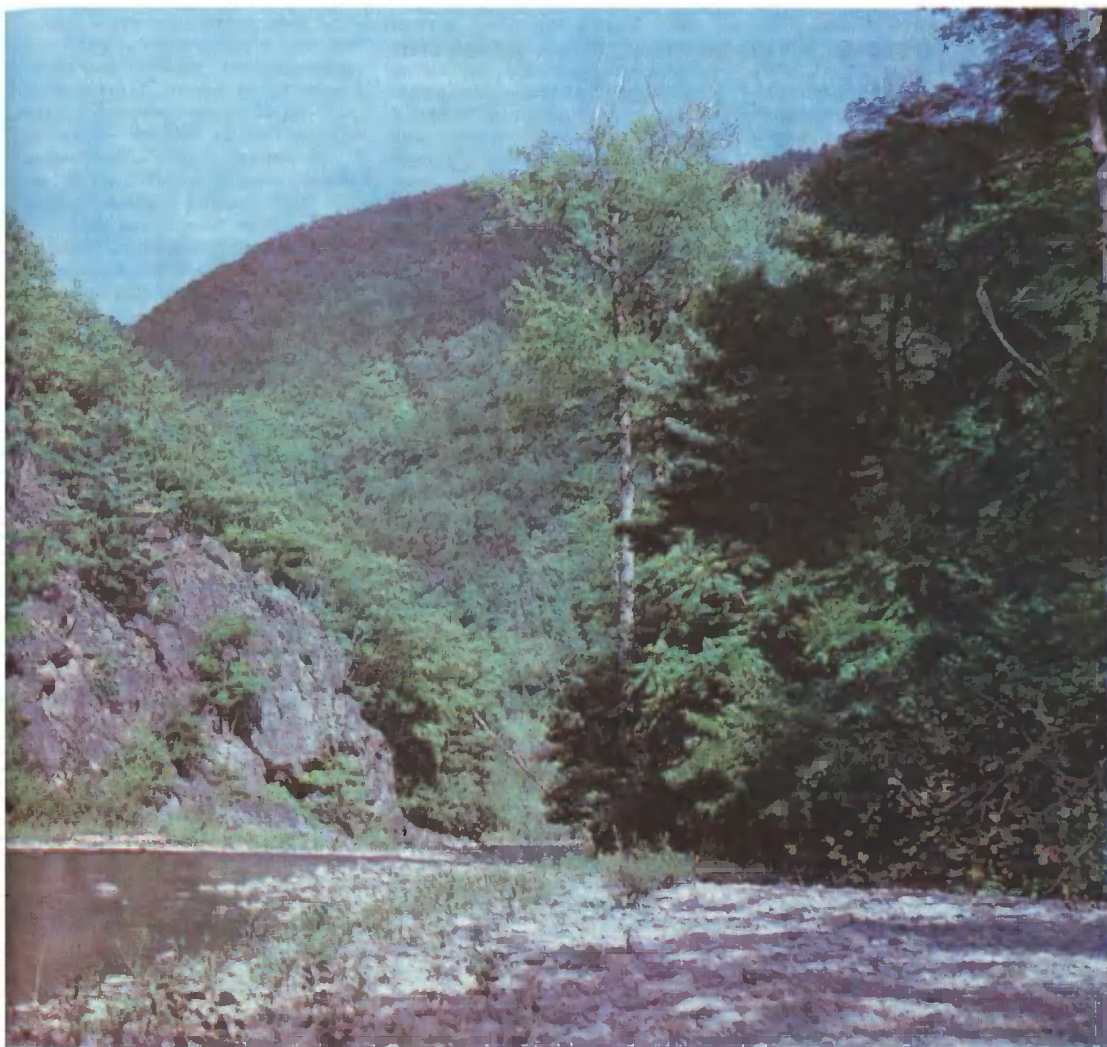
вания (разработка шкалы различных типов лишайников как биоиндикаторов тяжелых металлов); изучение химического состава осадков под кронами деревьев; использование листовых пластинок как индикаторов атмосферных осадков и др. Роль почвенного покрова в качестве своеобразного «фильтра» техногенного вещества, поступающего с атмосферными осадками и взвешьями, исследует сеть долгосрочно



действующих специальных установок. В примыкающей береговой зоне моря изучаются морские гидробионты (водоросли, моллюски) как индикаторы загрязнения вод тяжелыми металлами.

Аналогичные работы, хотя и в меньшем объеме, проводятся и на прилегающих территориях (а также в других районах Приморья).

Биосферные исследования в заповеднике проводятся совместно с учеными Тихоокеанского института географии ДВНЦ АН СССР и Дальневосточным научно-исследовательским институтом гидрологии и метеорологии, которые уже развернули работы по контролю за изменениями окружающей среды в районах, граничащих с заповедной территорией. Предлагается



организовать Сихотэ-Алинскую биосферную станцию, охватывающую весь регион центрального Сихотэ-Алия, центром которой и эталоном нетронутой природы станет заповедная территория. Организация такой станции позволит контролировать изменения биосферы и прогнозировать результаты воздействия интенсивного освоения природных ресурсов региона.

Исследования, проводимые на стационаре в районе с интенсивной хозяйственной деятельностью и на территории заповедника, где сохранились первобытные природные комплексы, позволят организовать службу слежения за состоянием окружающей среды — экологический мониторинг. Это поможет разработать систе-

му мероприятий по оздоровлению природной среды и охране уникальной растительности и своеобразного животного мира дальневосточного Приморья.

#### РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

**Банников А. Г.** ПО ЗАПОВЕДНИКАМ СОВЕТСКОГО СОЮЗА. М.: 1974.

**Васильев Н. Г.** СИХОТЭ-АЛИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЗАПОВЕДНИК, (БИОСФЕРНЫЙ). — В кн.: Заповедники Советского Союза. М.: 1980.

ТРУДЫ СИХОТЭ-АЛИНСКОГО ЗАПОВЕДНИКА, вып. 1, М., 1938; вып. 2, М., 1938; вып. 3, Владивосток, 1964; вып. 4, Владивосток, 1967.

## Фосфаты в Тихоокеанском районе

Н. И. Юдин, А. А. Арсеньев,  
Ю. Р. Ручкина,  
кандидаты геолого-минералогических наук  
Л. Я. Плотникова  
Институт литосферы АН СССР  
Москва

Широко известна важная роль фосфатов — фосфоритов и апатитов — в развитии сельского хозяйства, потребляющего эти полезные ископаемые после переработки в виде минеральных удобрений. Авторами этой статьи составлена карта бассейнов и месторождений фосфатного сырья в Тихоокеанской области, где сосредоточено более 20% всех мировых его запасов. Анализ этой карты позволяет сделать некоторые выводы об условиях образования фосфатов, их возрасте, закономерностях размещения.

Месторождения и бассейны фосфатного сырья в Тихоокеанской области размещены таким образом, что в плане образуют кольцо, совпадающее с так называемым Тихоокеанским рудным поясом. По возрасту и типам образований это кольцо делится на восточную и западную части.

В западной части месторождения и бассейны располагаются на платформах и в краевых частях геосинклиналей (миогеосинклиналях). Лишь небольшие месторождения связаны с собственно геосинклиналями. Основная часть фосфатов в виде фосфоритов имеет морское осадочное происхождение, значительная роль осадочно-метаморфогенных (апатитовых) фосфоритов, меньшая часть место-

рождений фосфатов магматогенного происхождения.

Фосфатное сырье связано с породами разного возраста от докембрийских до неогеновых. Наиболее крупные концентрации фосфора связаны с отложениями верхнего докембрия и кембрия.

В западной части Тихоокеанского района по масштабам выделяются бассейн Джорджина (Австралия), Южно-Китайская фосфоритоносная провинция и Удско-Селемджинский бассейн в СССР.

В бассейне Джорджина насчитывается 15 месторождений, полосой протягивающихся с северо-запада на юго-восток на 1 тыс. км вдоль линии разломов. Запасы бассейна оцениваются в 500 млн т в пересчете на  $P_2O_5$ . В настоящее время ни одно из месторождений не разрабатывается. Бассейн располагается на северо-восточном крае Австралийской платформы и связан с формацией пород среднекембрийского возраста. В нижней части формации располагается 60-метровая пачка пород, состоящая из алевролитов, кремней, сланцев, конгломератов. Под ней залегает фосфоритоносная 40-метровая пачка из тех же пород вместе с фосфоритами высокого качества.

Южно-Китайская фосфоритоносная провинция объединяет более 20 крупных месторождений и бассейнов окраин Южно-Китайской и Корейской платформ. Фосфориты здесь залегают несколькими пластами среди докембрийских и нижнедокембрийских карбонатных отложений платформенного типа. Фосфориты этой провинции имеют высокое качество — содержание  $P_2O_5$  в них достигает 28—32%.

В Удско-Селемджинском бассейне, расположенном на

северо-восточной оконечности Монголо-Охотского геосинклинального пояса, насчитывается 4 месторождения. По масштабам этот бассейн значительно уступает Джорджине и Южно-Китайскому, его запасы в пересчете на  $P_2O_5$  составляют около 110 млн т. Все месторождения бассейна связаны с кембрийскими вулканогенно-осадочными отложениями. Фосфоритоносная серия, местами достигающая полуторакилометровой толщины, состоит из кремнистых и карбонатных отложений. В последние годы в связи со строительством БАМ интерес к этому бассейну возрастает.

Кроме того, в западной части кольца выделяются Корейско-Китайская и Джугджурская апатитоносные провинции. Корейско-Китайская апатитоносная провинция объединяет раннекембрийские, рифейские и кембрий-ордовикские апатитовые месторождения осадочно-метаморфогенного типа платформенных структур Китая, Кореи и Вьетнама. Для этой провинции характерны бассейны типа Лаокайского на севере Вьетнама, который по масштабам оруденения относится к крупным (его запасы более 1 млрд т руды). Бассейн расположен на краю впадины Синань в прогибе между двумя выступами. Апатитоносная толща шириной 3—5 км тянется здесь на 70 км с северо-запада на юго-восток и состоит из доломитов и кварцитов. Содержание  $P_2O_5$  в разных типах апатитовых руд от 18 до 40%.

Джугджурская апатитоносная провинция, расположенная в краевой части Джугджуро-Становой складчатой области, имеет магматогенное происхождение. Массив находится в выступе архейского щита и связан



с зоной крупных разломов. Апатиты здесь вкраплены в меланократовые габбро, пироксениты, перидотиты, оливины. Толщина известных залежей от 30 до 70 м, длина — от 100 до 400 м. Содержание  $P_2O_5$  в рудах от 5 до 30%. Общие запасы достигают 1 млрд т руды.

В восточной части Тихоокеанского рудного пояса месторождения фосфатного сырья располагаются в краевых частях геосинклинальных зон Скалистых гор, Кордильер и Анд. Более всего распространены фосфориты морского осадочного происхождения. Небольшие запасы магматогенных апатитовых месторождений представлены группой месторождений Чили и Мексики.

Фосфатное сырье восточной части Тихоокеанского района связано с более молодыми — пермскими, меловыми, верхнемеловыми и неогеновыми отложениями. Ведущее место занимает пермский бассейн, расположенный в Скалистых горах США, в Кордильерской миогеосинклинали, и протягивающийся с севера на юг на 1 тыс. км. На крайнем севере этой полосы известны небольшие месторождения пермских осадочных фосфоритов Тиглукпак (Аляска) и Альберта (Канада), запасы которых пока не установлены. На юге располагаются всемирно известные месторождения пермской формации Фосфория, запасы руд которой превышают запасы всех известных бассейнов Тихоокеанского региона и составляют более 4 млрд т в пересчете на  $P_2O_5$ .

Формация Фосфория состоит из кремнистых и глинистых сланцев и аргиллитов темных окрасок, мергелей и доломитов с пластами фосфоритов<sup>1</sup>. Накопление фосфатов продолжалось в течение почти всей пермской системы. Наиболее мощные слои толщиной от 60 до 137 м встречаются на востоке штата Айдахо и на западе штата Вайоминг. Фосфориты западных

штатов США открыты в 1889 г., а разрабатываются с 1906. На более 20 рудниках, существующих здесь ныне, получают около 5 млн т фосфоритов в год.

Колумбийский бассейн связан с верхнемеловыми отложениями миогеосинклинали Восточных Кордильер и Анд Южной Америки, протягивается полосой на 600 км и включает более десятка не крупных месторождений. Общие запасы бассейна — 300 млн т руды. Фосфориты залегают в известково-сланцевых толщах в виде пластов толщиной 20—50 см, редко до 3 м, переслаивающихся с глинистыми сланцами, известняками, мергелями, песчаниками. С 60-х годов текущего столетия эксплуатируются три месторождения бассейна.

Монтерей-Чилийская фосфоритоносная провинция расположена вдоль западного побережья Северной и Южной Америки в пределах неогеновых отложений, среди которых местами встречаются скопления фосфоритов. В североамериканской части провинции, протягивающейся от залива Сан-Франциско на севере до Лос-Анджелеса на юге, фосфориты обнаружены в кремнистых сланцах, песчаниках, алевритах, кремниях, известняках с фораминиферами в виде зерен, тонких пластин и оолитов. Мощность фосфатизированных пород 30—100 м. Общие запасы фосфоритов североамериканской части провинции оцениваются приблизительно в 60 млн т.

В Южной Америке Монтерей-Чилийская фосфоритоносная провинция представлена крупным бассейном Сечура в Перу и более мелким месторождением фосфоритов Тонгой в Чили. Бассейн Сечура расположен на берегу Тихого океана в миоценовых отложениях, заполняющих обширную впадину. Фосфоритоносная толща представлена сланцевыми диатомитами, переслаивающимися с пластами зернистых фосфоритов, реже песчаников и известняков. Мощность фосфоритовых пластов, занимающих большие площади — до 700 тыс. га, — 1—1,5 м; содержание  $P_2O_5$  в них составляет 5—20%. Запасы одного из месторождений — Байявар — составляют более

1,5 млрд т руды. Разработка месторождений бассейна позволяет Перу не только полностью удовлетворить свои внутренние потребности в фосфатном сырье, но и экспортировать фосфориты.

И в западной и в восточной частях Тихоокеанского бассейна имеются шельфовые фосфориты. Наиболее изучены они у берегов Калифорнии и Мексики. На протяжении около 2 тыс. км здесь тянется полоса фосфоритов, состоящих из зерен и конкреций — плотных образований с гладкой поверхностью, часто содержащих остатки фораминифер. Запасы фосфоритов западного побережья Северной Америки оцениваются в 3,3 млрд т при содержании  $P_2O_5$  18%.

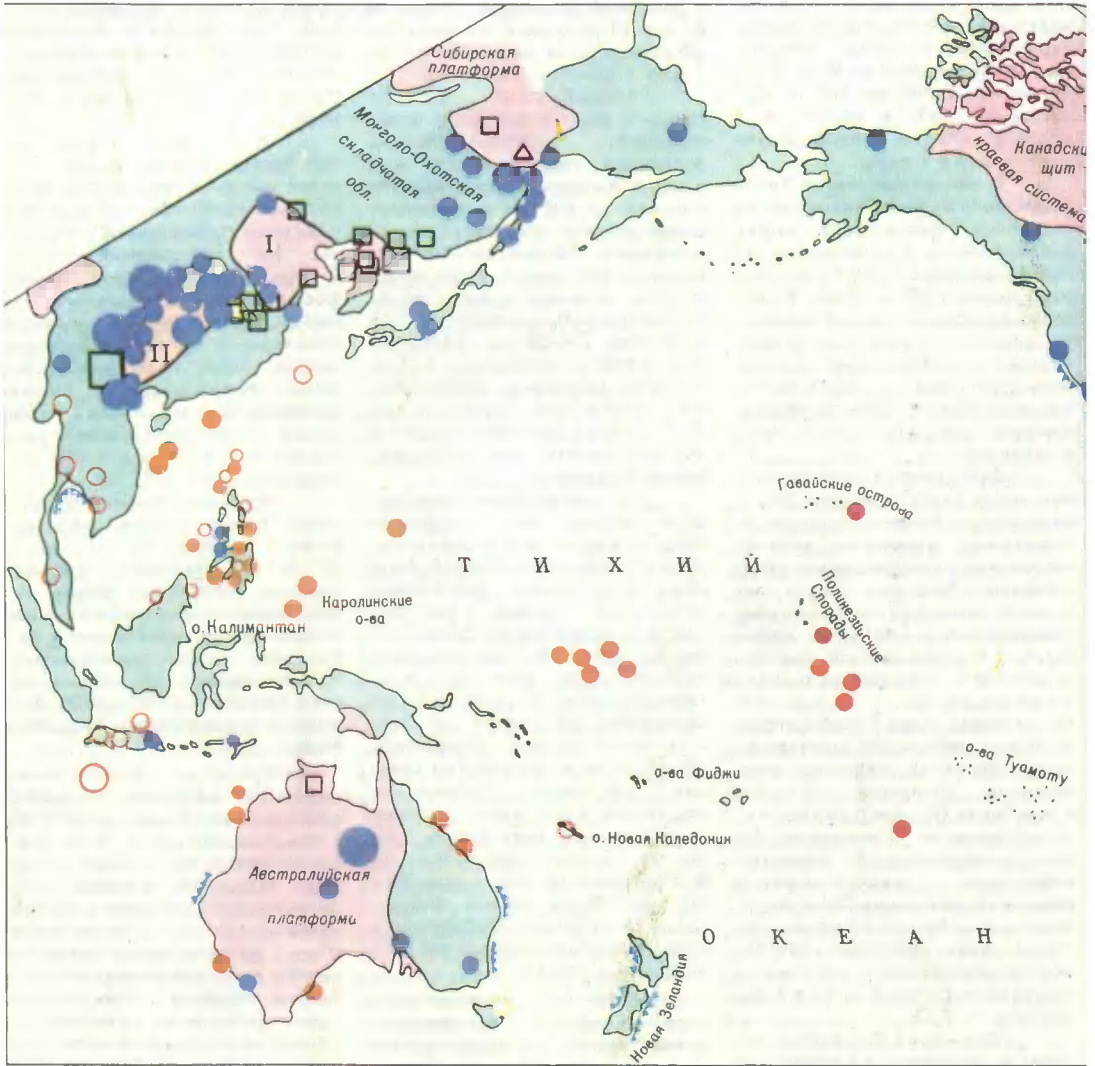
На многочисленных островах Тихого океана, расположенных между 30° с. ш. и 30° ю. ш. встречается высококачественное фосфатное сырье — фосфориты биогенного происхождения — гуано и фосфорит биогенно-метасоматического происхождения. Их общие запасы составляют 280—300 млн т руды с содержанием  $P_2O_5$  38—40%.

Гуано — мягкий глиноподобный материал, содержащий фосфат. Содержание  $P_2O_5$  в гуано варьирует от 2 до 40%, кроме того, в гуано присутствует азот. Мощность залежей гуано на островах различна и колеблется от 60 см на о-ве Чинча (Перу) до нескольких сантиметров на островах западной части Тихого океана (Индонезия). Гуано добывается главным образом на островах в восточной части океана — у берегов Южной Америки и Мексики.

Биогенно-метасоматические фосфориты делят на островные и пещерные, которые образовались в результате разложения гуано с выделением фосфатсодержащих растворов, проникавших по трещинам и зонам дробления в подстилающие гуано породы. Форма залежей островных и пещерных фосфоритов зависит от рельефа поверхности, на которой залегает гуано, и интенсивности развития системы трещин и зон дробления.

В зависимости от состава подстилающих гуано пород

<sup>1</sup> Подробно о формации Фосфория см.: Бушинский Г. И. Фосфориты — камни плодородия. — Природа, 1980, № 6, с. 18.



образуются фосфаты кальция на известковых постройках коралловых островов или алюмофосфаты и железофосфаты на островах, где гуано лежит на вулканических породах и вулканическом пепле.

Пещерные фосфориты наиболее широко распространены на островах западной части Тихого океана, на Филиппинах, Индонезии, Малайзии, где они и добываются. Одним из основных районов распростране-

ния этих фосфоритов являются пещеры о-ва Ява, где фосфориты накапливаются в известняках неогенового возраста в результате их химического взаимодействия с растворами, содержащими фосфат продуктов жизнедеятельности многочисленных летучих мышей и птиц, обитавших в пещерах. Запасы пещерных фосфоритов о-ва Ява оцениваются в 1 млн т.

Островные фосфориты наиболее распространены на

многочисленных геологически молодых коралловых островах центральной части Тихого океана (Науру, Ошен, Макатеа, Ангаур, Джарбис, Мальден, Фейс и др.). Островные фосфориты, генетически связанные с гуано, образовались на коралловых островах, приподнятых над уровнем океана на высоту от нескольких метров до нескольких десятков метров. Залежь фосфоритов на этих островах состоит из верхней части — так называемого



Карта размещения ресурсов фосфатного сырья в Тихоокеанском районе, составленная авторами с использованием Тектонической карты Тихоокеанского сегмента Земли масштаба 1:10 000 000 1970 г. Геологического института и Института океанологии АН СССР. Размеры значков условно соответствуют запасам бассейнов и месторождений. Римскими цифрами показаны платформы: I — Корейско-Китайская, II — Южно-Китайская.

Главнейшие тектонические структуры:

- складчатые области
- древние (дорифейские) платформы

Генетические типы месторождений фосфатного сырья:

- морские осадочные
- осадочно-метаморфогенные
- ▲ магматогенные
- биогенные (гуано)
- биогенно-метасоматические
- ▬ шельфовые

аллювиального гуано — мощностью до 0,6 м и нижней части, где залегают метасоматически измененные известняки, коралловый песок и ракушечник, цементированные фосфатом. Фосфориты коралловых островов, по сравнению с другими фосфоритами осадочного происхождения, отличаются хорошим качеством: высоким содержанием  $P_2O_5$  и низким содержанием окислов железа и алюминия.

Анализ распространения фосфатного сырья в пределах Тихоокеанского бассейна позволяет отметить ряд геологических особенностей и закономерностей его размещения.

Фосфориты и апатиты Тихоокеанской области связаны здесь с отложениями самого раннего возраста — от раннего докембрия до современных.

Фосфоритоносные формации в пределах области занимают обширные площади. Они

располагаются в краевых частях древних платформ, в складчатых областях всех геологических эпох и в современных геосинклинальных зонах. Формирование основных крупных фосфоритоносных бассейнов, а также бассейнов апатитоносных осадочно-метаморфических формаций происходило во внешних зонах миеосинклиналей, примыкавших к древним Китайской, Северо-Американской, Южно-Американской и Австралийской платформам.

Фосфориты и вмещающие их породы всегда содержат то или иное количество рассеянного органического вещества и связаны с содержащими углерод глинистыми и кремнистоглинистыми сланцами. Особенно ярко эта связь проявилась в пермском фосфоритоносном бассейне США, где в породах формации Фосфория содержится от 0,4 до 15% органического вещества. В составе фосфоритов много битумов, и при перегоне сланцев, богатых органическим веществом, получается до 10% нефтяных продуктов, а некоторые слои аргиллитов содержат до 30 л/т нефти. В этой связи ряд исследователей рассматривают фосфоритоносные формации в качестве нефтематеринских пород для образования некоторых крупных месторождений тяжелых нефтей.

Для фосфоритоносных формаций Тихоокеанской области всех возрастов характерно повышенное содержание в них ряда элементов, таких как уран, торий, редкие земли, ванадий, марганец, никель, кобальт и др.

Фосфатные руды Тихоокеанской области используются пока незначительно. В ближайшие годы намечается более интенсивное освоение в основном фосфоритовых месторождений Скалистых гор (район Карибу), подводных залежей вблизи побережья Калифорнии, бассейна Сечура, Австралии.

Выявленные огромные ресурсы фосфатного сырья и имеющиеся геологические предпосылки для их расширения свидетельствуют о больших потенциальных возможностях использования этих ресурсов в будущем.

## Влияние аномально холодной зимы в Белом море на размножение гренландского тюленя

**Ю. И. Назаренко,**  
кандидат биологических наук  
Северное отделение Петрозаводского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии Министерства рыбного хозяйства СССР  
Архангельск

Северных тюленей (хохлача, кольчатую нерпу и особенно гренландского тюленя) принято считать животными, идеально приспособленными к размножению среди льдов. Даже в летнее время гренландский тюлень совершает дальние миграции и уходит в большие широты к арктической кромке льда. Пожалуй, трудно и представить себе лучшую приспособленность животного к холоду, чем у этого тюленя. Например, не раз приходилось наблюдать, как при 25—30-градусном морозе и пронизывающем северо-восточном ветре взрослый тюлень безмятежно спит на льду на открытом месте, а только что родившийся детеныш в этих же условиях спокойно проводит часы в ожидании своей матери. Очень холодная зима 1978/79 г. позволила собрать некоторые материалы о резком увеличении детской смертности в аномально холодные годы. Подобные холодные зимы наблюдаются в этом районе примерно раз в 12—15 лет. Из-за сильных и длительных морозов (до —45°) образование льдов и их рост в зимний период, а также общая ледовая обстановка отличались от подобных процессов в другие годы. Толщина льдин достигала повсеместно 50—70 см, что необычно для Белого моря; открытой воды



Разреженное расположение самок на залежке в обычные годы при наличии разводий и лунок.

практически не было. Такое положение при постоянных приливо-отливных течениях создавало большие сжатия, которые порождали очень большую степень торосистости.

Совершенно необычным для залежек детенышей грен-

ландского тюленя явилось отсутствие лунок во льду. Отсутствие лунок уже было заметно с самолета при проведении разведки в конце февраля. В течение первой декады марта мы неоднократно находились на льду, обошли большие площади, а на вертолетах просмотрели еще большую территорию, и ни одной лунки не обнаружили.

Такое положение можно

объяснить тем, что лед при низкой температуре быстро рос в толщину и любая лунка сразу замерзала. К тому же отсутствовали разводья, и лунки просто негде было проделывать: лед был слишком толст для этого. В обычные же зимы лунки проделываются в молодом льду, затем они все время используются, как правило, несколькими животными и в итоге часто оказываются в се-

нии сначала беременных, а затем и родивших самок: все они вынуждены были располагаться почти в непосредственной близости от края льдины (чтобы иметь доступ к воде). Плотность их здесь была большой, тогда как центр льдины пустовал. У многих родивших самок задние лапы были покрыты запекшейся кровью, выделившейся во время родов. Это показывает, что самки после ро-

льдин. Зимой 1978/79 г. приходилось видеть на вздыбленных торошенных льдинах кровавые пятна, которые могли быть следствием задавленных бельков. Нам известны 4 случая, когда бельки были задавлены льдинами. В обычные годы это большая редкость.

Нагромождение торосов высотой до 1,5—2 м создавало что-то вроде кратера, выбраться из которого даже человеку было трудно. Именно в таких кратерах часто находили одного или нескольких детенышей, реже там были и самки. Какая-то часть детенышей могла погибнуть там от голода или быть заваленной торосящимися льдинами.

Большая торосистость определила и то, что детеныши выбирали себе лежки под нависшими льдинами чаще, чем в обычные годы. В один из дней мы наблюдали около 20 % бельков под угрозой быть задавленными при сжатиях льдин.

Скученность детенышей на льду приводила и к частым дракам между самками, которые обычно очень ревниво следят за приближением других особей. Так как при опасности самки не могли уйти в воду через лунки, то на льду возникало беспорядочное передвижение животных, многие самки вынуждены были защищать своих бельков, не имея возможности скрыться в воде. Находясь в раздраженном состоянии, самки нередко зубами рвали своих и чужих бельков.

К сожалению, в первой декаде марта, т. е. в разгар щенения и первые дни после него, по Горлу Белого моря и частично по залежкам проходил караван крупнотоннажных судов в сопровождении двух мощных ледоколов. Это также привело к гибели большого числа тюленей, так как они не могли быстро уйти в воду при приближении ледокола. Этот случай доказывает, что настала пора ставить вопрос об установлении запрета на проход ледоколов через лежки гренландского тюленя в Белом море.



Концентрированное расположение тюленей около разводий зимой 1978/79 г.

редине льдины или уж, во всяком случае, на некотором расстоянии от края. Это и позволяет беременным самкам занимать всю льдину.

Отсутствие лунок сразу же отразилось на распределе-

дов так и не уходили в воду, хотя в обычных условиях это бывает совершенно обязательным.

Такое распределение сначала беременных самок, а потом детенышей при большой плотности и торосистости льда неизбежно повлекло за собой повышенную гибель детенышей при сжатиях льда: торошение и залом льдов в основном идут около краев

## Редкие формы самородной меди

В. Я. Онищенко

Каратауская геолого-разведочная экспедиция  
г. Кентау

В 1979 г. на одном из месторождений Южного Казахстана подземными горными выработками на глубине 100—130 м были вскрыты окисленные колчеданные руды, содержащие самородную медь редких кристаллических форм.

Месторождение, в котором обнаружена самородная медь, залегает в карбонатных породах докембрия вблизи контакта их с гранитоидами и диоритами. Рудовмещающие карбонатные породы подвергнуты контактовым изменениям с образованием мраморов, офиокальцитов и лиственитов.

Неизмененные, или, как принято говорить, первичные руды сложены преимущественно серным колчеданом и сульфосолями меди. В результате воздействия воздуха и воды первичные колчеданные руды частично окислились и превратились в бурые железняки, гидрослюда, малахит, куприт, самородную медь.

Наиболее богатые скопления меди встречены на участках, где окисленные (вторичные) руды переходят в первичные колчеданные. На этих участках породы и руды пропитаны водой. Причем, самородная медь заключена как в плотных массах бурых железняков, так и в рыхлых охристо-глинистых образованиях.

Формы самородной меди весьма разнообразны. Это мелкие одиночные кристаллы, их агрегаты, сплошные массы и дендриты. Довольно часто встречаются причудливые формы, напоминающие деревья, листья и даже животных. Грани кристаллов имеют ровную поверхность и сильный блеск. Цвет самородной меди розова-



Объемный дендрит самородной меди, ранее имевший серебристую окраску. Красный цвет появился после травления соляной кислотой.

Здесь и далее фото Н. Н. Алексева

то-красный, красный, золотисто-желтый, серебристо-белый. Многие образцы имеют сиреневый, синий, серый оттенки, обусловленные пленками окислов меди (куприта и тенорита) разной толщины. Появление этих пленок связано, по-видимому, с периодическим понижением уровня подземных вод и поступлением богатых кислородом талых и дождевых вод.

В забое одной из подземных выработок автору повезло обнаружить линзообразную полость, буквально нафаршированную кристаллическими агрегатами самородной меди. Эта полость находилась в зоне, ослабленной тектоническими подвижками и была заполнена обломками доломитов, перемешанных с кашеобразной, пропитанной водой глинистой массой. В верхней части полости были сосредоточены желтые глины, а в нижней ее части — черные глины, богатые вторичными сульфидами. Интересно отметить, что в желтых глинах были заключены плоские дендриты в виде листьев с кружев-

**Агрегат деформированных изоморфных кристаллов самородной меди; в верхней части отrostки плоский дендритов.**

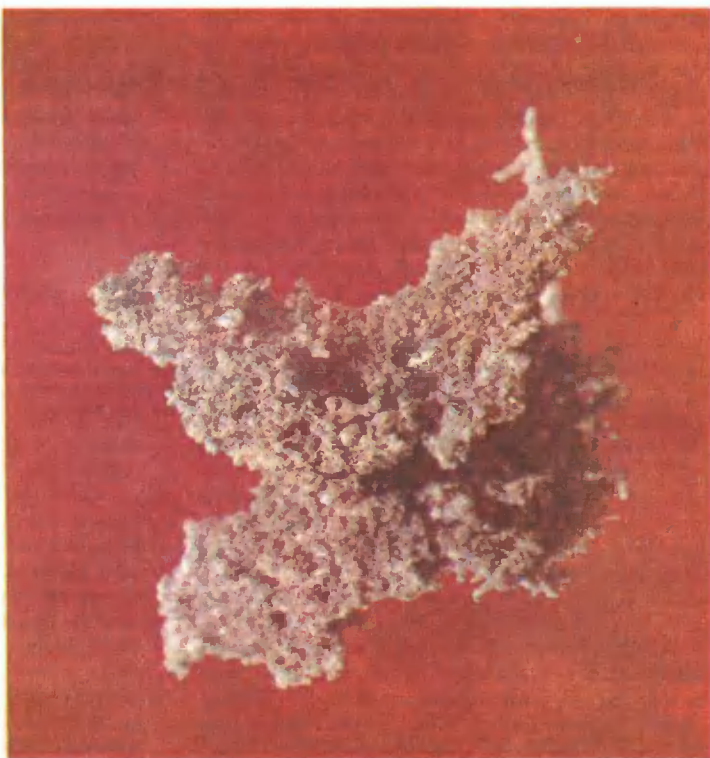
**Дендрит самородной меди с рельефным рисунком, напоминающим перо жар-птицы.**

ным узором, а в черных — агрегаты изометричных кристаллов.

Такое зональное размещение кристаллов самородной меди отмечено на нескольких участках месторождения. В плотных бурых железняках обычно наблюдаются бесформенные или мелкокристаллические агрегаты самородной меди. А в рыхлых охристо-глинистых образованиях самородная медь образует дендритные формы, верхушки которых заканчиваются «пухом» или «паутиной».

Извлеченные из полости образцы имели равномерный розовато-красный цвет, свойственный неокисленной меди. Промытые в родниковой воде образцы спустя несколько часов приобрели золотисто-желтый цвет, а еще через несколько дней — красноватый и синеватый оттенки.

Несмотря на то, что руды месторождения содержат значительные количества других элементов, самородная медь практически лишена примесей. Поэтому можно предположить, что самородная медь кристаллизовалась путем естественного электролиза из растворов, содержащих серную кислоту и сульфаты меди, которые образуются при окислении колчеданных руд вблизи земной поверхности.



## Каменка-плясунья: поведение и жизнь в сообществе

В. В. Иваницкий



Владимир Викторович Иваницкий, кандидат биологических наук, работает на кафедре зоологии позвоночных биологического факультета Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова. Область научных интересов: поведение птиц, механизмы общения.

На самом юге нашей страны среди сухих и жарких пустынь Туркмении расположен Бадхызский заповедник. Лучшее время года здесь — весна. Буйное весеннее разнотравье, вызванное к жизни живительной влагой. Всюду цветы. Желтые, белые, синие, а больше всего — красных. Местами их так много, что не видно травы, и тогда степь из ярко-зеленой становится красновато-бурой. Трудно поверить, что не пройдет и месяца, как раскаленное добела летнее солнце уничтожит все яркие краски. Останется лишь желто-бурый цвет выгоревшей травы да белесая синь запыленного горячими ветрами неба. Наступит долгое сухое и жаркое лето. Лишь немногие птицы способны жить среди выжженных солнцем, полностью лишенных источников влаги холмистых равнин, занимающих большую часть территории заповедника. Среди этих немногих каменка-плясунья (*Oenanthe isabellina*) по праву должна быть названа в числе первых.

Эта птица относится к семейству дроздовых (*Turdidae*), которое в свою очередь входит в состав обширного отряда воробьиных птиц (*Passeriformes*). Чем же привлекательна каменка-плясунья как объект изучения? Прежде всего тем, что этот вид удовлетворяет всем требованиям, которые ученые-биологи предъявляют к так

называемым модельным объектам. Каменка-плясунья — многочисленная птица, населяющая открытые ландшафты, что позволяет исследователю не тратить время на поиски объектов и неограниченно долго следить за каждой особью. Доверчивость каменок — очень важное свойство, облегчающее наблюдения за ними. Если вооружиться восьмикратным биноклем и забраться на пригорок, то можно часами наблюдать за 2—3 парами этих подвижных и энергичных птиц, вся жизнь которых разворачивается «как на ладони».

Как устроена общественная жизнь этой птицы? Ведь каждая плясунья ежеминутно встречается то со своим партнером (или партнершей), то со своими соседями, то с пролетными, мигрирующими птицами. Все разнообразие таких взаимоотношений приводит к возникновению организованного сообщества особей одного вида. Сообщество каменки-плясуни в разгар гнездового периода устроено довольно просто. Птицы живут парами, однако иногда у одного самца оказывается две самки. Каждая пара (или трио) живет на определенном участке, который охраняется от посягательств других особей. Встречаются и холостые, одиночные птицы. В период прилета каменок на места гнездовой взаимоотношения выглядят, на



первый взгляд, весьма беспорядочно. Какие же механизмы лежат в основе превращения этого хаоса в хорошо организованное сообщество с упорядоченными отношениями между его членами? Как устанавливаются взаимоотношения соседних особей? Какие факторы регулируют использование пространства? Как образуются пары и почему у некоторых самцов оказывается по две самки?

## ПРИЛЕТ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕРРИТОРИЙ

Появление первых плясуней заметить трудно. Птицы в это время малоподвижны, почти не летают и лишь передвигаются по земле, отыскивая насекомых и пауков. Держатся поодиночке. Но вот мы замечаем, что одна птица на протяжении нескольких часов перемещается как бы по замкнутому кругу и нигде не улетает. Она кормится, чистит оперение, слегка распушая его, периодически залезает в многочисленные норы большой колонии песчанок. Неподалеку мы замечаем еще одну плясунью, которая ведет себя точно так же. Обе птицы, которых разделяет 100—120 м, как будто не стремятся к установлению каких бы то ни было контактов. Но вот, вероятно случайно, они встретились у небольшой россыпи камней. Обе птицы по-прежнему в обычных позах, со слегка распушенным оперением. Вот одна из них схватила крупного жука, энергичными ударами убила его и с аппетитом съела. Птицы вроде бы даже не обращают внимания друг на друга, медленно параллельно передвигаясь вдоль россыпи камней. Затем одна из них улетела к центру своей территории, вторая, посидев немного возле камней, тоже вернулась на свой участок. В течение получаса мы наблюдали еще три такие же встречи между этими птицами на том же самом месте, причем одна из этих встреч продолжалась почти 10 мин. И лишь когда птицы встретились в пятый раз, монотонное течение событий было, наконец, нарушено, а наше терпение вознаграждено. Одна из птиц вдруг стремительно бросилась на другую, и обе птицы, взлетев в воздух и отчаянно размахивая крыльями, повисли друг против друга, пытаясь ударить соперника клювом. Впоследствии оказалось, что это еще сравнительно «мягкая» форма проявления агрессии. Дело может доходить до настоящей «рукопашной», и соперники, сцепившись когтями, катаются по земле и бьют друг друга клювами так, что с них, в самом деле,

перья летят. Вернемся, однако, к нашим птицам, которые не перешли к столь решительным действиям и, ограничившись короткой стычкой в воздухе, вновь сели друг против друга в обычных позах. Теперь уже не вызывает сомнения, что перед нами два самца, занимавшие территории по соседству, а их периодические встречи — не что иное, как пограничные конфликты. Несколько обескураживает бедность репертуара в ходе конфликтов, даже после драки самцы опустились в тех же самых позах, что и до нее.

Продолжая наблюдения, обнаруживаем, что у самца, которым мы интересовались с самого начала, есть еще один сосед. Его территория находится за небольшим холмом, поэтому сразу мы его не заметили. Вот соперники встретились у подножья этого холма. Наш самец по-прежнему в той же самой маловыразительной позе (со слегка распушенным оперением). Но поглядите на его нового соперника! Оперение плотно прижато, голова кажется из-за этого узкой, клюв поднят вверх, рулевые перья полностью развернуты, а яркий черно-белый хвост при пробежках птицы то как бы «метет» землю, то слегка приподнимается. Эти пробежки совершаются особыми, очень мелкими, как бы семенящими, шагами. Этот самец ведет себя очень активно, его поза все время меняется: то он распушит оперение на брюшке, то опять прижмет его, клюв то опустит, то поднимет. Вот он почти сложил хвост, но затем вновь развернул его во всей красе. Что же наш первый знакомый? Судя по всему, все демонстрации соседа не оказывают на него особого влияния. Воспользуемся тем, что соперники прекратили конфликт, и перейдем на территорию нового самца, а чтобы не запутаться, дадим каждому из трех самцов соответствующий порядковый номер.

Итак, мы на территории самца № 3. Как резко отличается его поведение от того, что мы только что наблюдали у его соседа! Самец № 3 почти все время демонстрирует своеобразные необычные позы, много и громко поет, чего также не было у предыдущих самцов. Он тоже залезает в норы, но в демонстративных позах. Вот он взлетел с песней, повис в воздухе с развернутым хвостом и мелко трепещет слегка опущенными вниз крыльями. Затем опустился у подножья холма и начал бегать все в той же позе, патрулируя территориальные рубежи даже в отсутствие соперника. Теперь мы вспоминаем, что то же самое наблюдали мы и у самца № 1, но не

обратили на это внимания, поскольку он патрулировал свою границу в самой обычной, повседневной позе. Существенно, что оба самца и при патрулировании границ, и при пограничных конфликтах вели себя почти точно так же, как и в одиночку, находясь в центре своей территории.

Совершим небольшую экскурсию и понаблюдаем за встреченными плясуньями. В большинстве своем это одиночные самцы. Каждый из них уже занял территорию и патрулирует ее границы, периодически вступая в конфликты со своими соседями. Яркие демонстрации во время конфликтов чаще всего отсутствуют, хотя драки возникают довольно часто. Если какая-либо плясунья случайно или намеренно залетает в центр уже занятой территории, хозяин последней немедленно устремляется в атаку и выгоняет непрошенного гостя за пределы своих владений. Отступать последнему приходится весьма поспешно, поскольку владелец территории настроен, как правило, решительно и сразу же бросается в драку. Мы встречаем и несколько более активных самцов. Они также старательно рекламируют свои территории: много поют и летают демонстративным полетом. Однако более детальные наблюдения показывают, что частота пограничных конфликтов, их средняя продолжительность и количество драк в ходе конфликтов не зависят от степени «демонстративности» поведения. Иными словами, уровень агрессивности, присущий данному самцу, не зависит от экстравагантности и разнообразия его поведения. Второй вывод: установление взаимоотношений между соседними самцами, распределение зон влияния (территорий) и формирование границ между ними вовсе не подразумевают необходимости использования демонстративного поведения, т. е. своеобразных и экстравагантных поз, резко отличных от повседневных.

Как же происходит раздел территорий? Самец при освоении занятого им участка привыкает встречать своих соседей, поселившихся примерно в одно время с ним, в строго определенных местах. Такое место бывает обычно приурочено к какой-либо хорошо заметной детали рельефа, которая уже сама по себе вызывает любопытство птиц и как бы притягивает их к себе. Это может быть куча камней, куст, крупный камень, промоина в почве и т. д. Постоянные встречи соперников в определенном месте приводят к тому, что у каждого из них это место вызывает ассоциации с обликом соседнего самца. По-

падая сюда даже в отсутствие соперника, самец зачастую ведет себя точно так же, как и при встрече с ним. Возникает граница, на которой в дальнейшем и происходят конфликты этих самцов.

Раздел территорий в начальный период формирования популяции, когда плотность птиц еще довольно мала, в целом происходит довольно мирно, хотя и могут возникать короткие драки. Значительно более драматично складываются события, когда прилетевший позднее самец пытается вклиниться между занятыми территориями. Обычно пришелец претендует на часть только одной из них и тогда один из самцов, сидя у самой границы, с явным интересом созерцает поединок своего соседа с пришлым самцом. Если последний полон решимости во что бы то ни стало получить собственную территорию, он вступает в длительный конфликт за право обладать ею. Обе птицы непрерывно гоняются друг за другом в воздухе. Обычно в роли преследуемого оказывается пришелец, но временами он переходит в нападение, тогда завязывается ожесточенная драка, и птицы падают на землю, сцепившись когтями. Погони и драки продолжаются по несколько часов, а в некоторых случаях начавшийся вечером конфликт может возобновиться и утром. В конце такого конфликта его участники выглядят крайне измотанными и буквально падают от усталости. В зависимости от настойчивости претендента и его физических возможностей ему либо удается потеснить хозяина и занять желанную территорию, либо он вынужден покинуть «поле боя» и приступить к поиску более сговорчивых соседей.

## ОБРАЗОВАНИЕ ПАР

Итак, формирование гнездовой популяции только начинается, и у нас появляется надежда, что удастся проследить один из наиболее интимных моментов в жизни интересующего нас вида — процесс образования пары, своего рода помолвку партнеров, закладывающую фундамент их отношений.

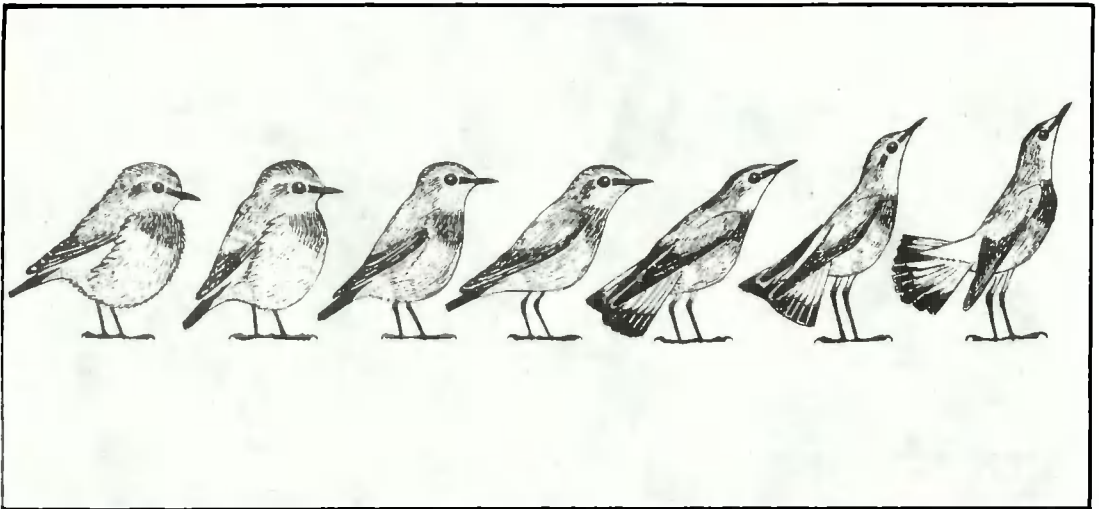
...Вот мы на территории самца № 1. Со вчерашнего дня в его поведении не произошло существенных перемен — он по-



прежнему малоактивен, хотя довольно часто конфликтует со своими соседями. Вот на его территории появилась плясунья. Она явно чувствует себя не совсем уверенно, оглядывается и часто-часто подбрасывает хвост. Если раньше наш самец немедленно изгонял всех плясунь, залетавших на его территорию, то сейчас он не нападает на нее. Он как-то странно наклонил голову, слегка приподнимая сложенный хвост. Затем выпрямился и снова повторил то же движение. Мы вспоми-

норе, проделывая возле нее все те же движения. Птица вновь подлетела к нему, но самец на этот раз скрылся в норе, и незнакомка последовала за ним.

Итак, ход событий не оставляет никаких сомнений в том, что мы наблюдаем образование пары. Вернее, нам удалось увидеть самую первую (и самую интересную для нас) встречу потенциальных партнеров. Приведет ли она к формированию длительных брачных уз, останется ли самка на данной территории — решение этих



Некоторые позы, используемые самцами каменки-плясуньи во время конфликтов на границах территорий. Все разнообразие поведения в этой ситуации отнюдь не исчерпывается изображенными позами. По мере возрастания уровня активности увеличивается степень напряженности позы, становится более интенсивным пение, увеличивается подвижность птицы.

Рисунок автора.

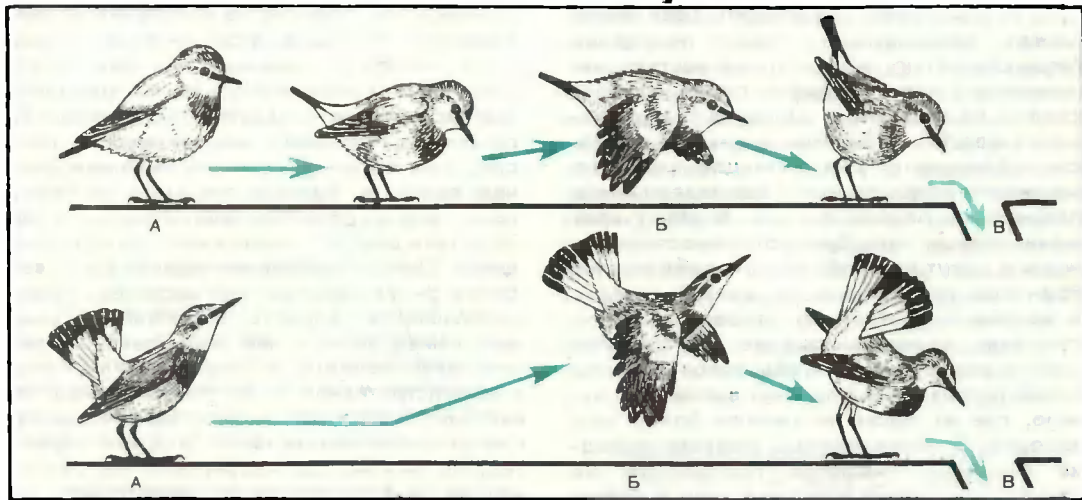
наем, что точно такие же движения совершает самец перед тем, как залезть в нору. Но сейчас перед ним нет ни одного отверстия! Слово прочитав наши мысли, он действительно перелетел к одной из нор, в которую он и вчера, и сегодня часто залезал, сел и стал заглядывать в нее, по-прежнему слегка приподнимая сложенный хвост. При этом он все время оглядывается в сторону птицы, сидящей в центре его территории, словно приглашая ее осмотреть нору. Она приняла приглашение и, в самом деле, подлетела, но самец отлетел к другой

вопросов требует времени и не может быть достигнуто в ходе краткого знакомства. Настоящее образование пары представляет собой длительный процесс привыкания каждого из партнеров к территории и, разумеется, к присутствию в ее пределах другого партнера.

Но вернемся к нашим знакомым. Самец, по-видимому, вполне удовлетворенный открывающимися семейными перспективами, приступил к кормежке, а самка занялась осмотром его территории. Внезапно к самке стремительно приблизился чужой самец, проделав возле нее серию дугообразных прыжков с полностью развернутым хвостом и замер, приподняв клюв и мелко трепеща крыльями. Затем вновь последовала серия прыжков перед самкой, но в этот момент на демонстрирующего пришельца обрушился хозяин территории. После короткой драки нарушитель границы взлетел и ярким демонстративным полетом с интенсивным пением улетел на территорию № 3. Однако это первое втор-

жение оказалось всего лишь началом. В следующий час самец — обладатель самки — около двух десятков раз отражал настойчивые рейды своих холостых соседей (самцов № 2 и № 3) на свою территорию. Особенно неистовствовал самец № 3. Раз за разом он пересекал границу и приближался к чужой самке, демонстрируя перед ней все мыслимые варианты поз. Едва хозяин территории выпроваживал одного ухажера, как к самке уже приближался второй. Самец № 1, как челнок, метался от одной

параллельно поверхности земли и садится у входа в нору в весьма экстравагантной позе, приподнимая полностью развернутый хвост. Следует несколько поклонов, направленных к отверстию, и он перелетает к другой норе, где проделывает то же самое — очень похоже на то, что мы только что наблюдали у самца № 1 в момент образования пары. Разница лишь в том, что у последнего при этом полностью отсутствовали сколько-нибудь интенсивные демонстративные действия, например разво-



Последовательность поведения самцов каменки-плясуньи в ходе образования пары. А — до появления самки. Б — после появления самки. Верхний ряд — при низком уровне активности, нижний ряд — при высоком уровне активности.

Рисунком автора.

границы к другой, а самка, вокруг которой, по существу, и поднялась вся эта суматоха, с редкой невозмутимостью и последовательностью продолжала обследовать норы. Наконец, страсти улеглись, птицы успокоились, и у нас появилась возможность перебраться на соседнюю территорию во владения самца № 3, который, в отличие от своих соседей, по-прежнему ведет себя очень активно, и, тем не менее, все еще холост.

Вот он с песней, мелко трепеща крыльями, замедленным полетом летит

рачивание и поднимание рулевых, которые придают такое своеобразие позам самца № 3. Нам вновь повезло, и на столь активно рекламируемой территории № 3 наконец появилась самка. Как развернутся события, что изменится в поведении владельца территории по сравнению с предыдущим периодом его холостяцкой жизни? Оказывается, изменений произойдет не так уж много. Самец точно таким же трепещущим полетом будет перелетать от одной норы к другой, периодически заезая в некоторые из них в тех же самых позах. Возможно, что все элементы поведения станут более интенсивными и яркими, однако в качественном отношении репертуар поведения ничем не обогатится.

Таким образом, во-первых, все формы поведения самца, которые используются им при образовании пары, присутствуют у него задолго до появления самки; во-вторых, и активные и неактивные самцы с равным успехом образуют пары. При этом схема поведения в общем одинакова:

самцы избегают сближаться с самкой, перелетая от норы к норе и иногда залезая в них. Если неактивному самцу длительное время не удастся образовать пару, со временем в его поведении все ярче проявляются демонстративные элементы, и он начинает интенсивно рекламировать территорию (т. е. петть и совершать демонстративные полеты), а, следовательно, переходит в категорию активных.

## ПОВЕДЕНИЕ МОЛОДЫХ ОСОБЕЙ

Чтобы яснее представить себе связи между различными типами поведения (агрессивностью, территориальностью, залезанием в норы и демонстрациями), проследим их развитие у молодых самцов камчатки-плясуны. Зачатки взаимной агрессии наблюдаются уже у птенцов примерно месячного возраста, всего две недели назад покинувших родное гнездо. К этому времени птенцы приобретают самостоятельность и могут сами обеспечить себя пищей. Родители приступают ко второй кладке и крайне неприязненно относятся к присутствию своих отпрысков, используют любую возможность, чтобы погонять их по своей территории, а то — и выгнать на чужую, где их также встречают более чем холодно. В итоге, птенцы первого выводка рассредоточиваются поодиночке на стыках территорий взрослых птиц и влачат здесь довольно жалкое существование, подвергаясь постоянным преследованиям. Но вот выходят из гнезд птенцы второго выводка, и тут старшие птенцы из жертв произвола своих родителей и соседей превращаются в деспотов, жестоко третирующих своих младших братьев и сестер.

Таким образом, агрессивное поведение по отношению к себе подобным отчетливо выражено у особей этого вида уже в самом раннем возрасте. Это особенно касается самцов. Самкам любого возраста в гораздо меньшей степени свойственна агрессивность. Каждый самец стремится обособиться от других особей на защищаемом участке. Временами агрессивность пропадает, и тогда молодые птицы некоторое время держатся друг с другом рядом, однако периоды такого мирного существования уже в месячном возрасте достаточно редки и непродолжительны. Со временем во взаимоотношениях соседних птиц появляется поведение, столь характерное для пограничных конфликтов: обе птицы при встрече передвигаются параллельно друг другу, причем каждая из них старается держаться ближе к собствен-

ной территории. У молодых самцов во время этих конфликтов никогда не бывает ярких демонстративных поз. Отсутствие демонстраций характерно для молодых самцов и в то время, когда, спустя 9—10 месяцев, они возвращаются с зимовки на места гнездования и занимают здесь территории.

Таким образом, при определенных условиях поведение взрослых и молодых самцов может выглядеть внешне одинаково. Однако их внутреннее состояние совершенно различно, и это сейчас же проявляется в их реакции на появление самки. Молодые самцы в этой ситуации чаще всего попросту нападают на самку. Их действиями руководит все то же врожденное стремление нападать на любую особь своего вида, которое, как мы видели, присуще молодым птицам уже в самом раннем возрасте. Вначале эта атака на самку носит очень решительный характер и не сопровождается никакими демонстрациями. Затем постепенно приобретает все более ритуализированный характер. Резко уменьшается скорость сближения с самкой, самец летит к ней замедленным трепещущим полетом и садится возле нее в демонстративной позе. Иногда самец не нападает на самку и его демонстрации имеют очень интенсивный и яркий характер, но они всегда направлены на самку, что ей явно не по душе. Ведь самец не должен приближаться к ней! Его задача — продемонстрировать норы, а уж предпринимать шаги к более тесному сближению — привилегия дамы. В результате самка прекращает взаимодействие и покидает назадачливого ухажера.

Совсем по-иному встречает самку взрослый самец. Он никогда не нападает на самку и не сближается с ней. Всю сложную гамму чувств, охвативших его при виде подруги, он выражает всего лишь несколькими сдержанными поклонами у отверстой заранее присмотренных им нор. Вспомним, что мы наблюдали это при образовании пары самцом № 1. Если же самец ожидал самку долго и его поведенческий репертуар обогатился разнообразными демонстративными реакциями, то при появлении самки он разыгрывает настоящий спектакль, как мы видели это на примере самца № 3. Однако и в этом случае самец никогда не сближается с самкой, предоставляя эту инициативу ей, а ограничивается демонстрациями у отверстия нор, громким пением и яркими трепещущими перелетами от одного отверстия к другому.

Здесь уместно будет отметить, что

интерес к норам просыпается у молодых птиц еще раньше, чем агрессивное поведение. Еще бы — ведь детство каждой плярсуны прошло именно в норке! Поэтому всякое отверстие в земле во все времена года явно привлекает к себе птиц любого возраста и пола.

Вернемся, однако, к молодому самцу, у которого этот интерес возник как нельзя кстати. И так, он залез в нору, или, как бы примеряясь, проделал над входом в нее несколько характерных поклонов. Перспектива ознакомиться с жилищными условиями претендента «на крыло и сердце» показалась самке настолько заманчивой, что она сейчас же подлетела к нему. Вполне возможно допустить, что уже само по себе общение с самкой служит для самца достаточно мощным источником положительных эмоций для того, чтобы закрепить у него тот или иной способ действий, направленных на установление и поддержание такого рода контактов.

### ОБРАЗОВАНИЕ ПОЛИГАМНЫХ ТРИО

На первый взгляд, популяция плярсуны уже полностью сформировалась. Распределены территории, установлены их границы. Образовались пары, и некоторые самки приступили к насиживанию. Это, в частности, относится и к партнерше нашего старого знакомого — самца № 1. Она насиживает уже второй день и почти не общается с партнером. Он же ведет себя очень активно, много поет, часто летает демонстративным полетом с полностью развернутым хвостом. Но вот на его территории мы замечаем еще одну плярсуночку. Пока мы наблюдаем, кто бы это мог быть, хозяин территории уже действует. Однако его действия носят странный характер: обычно все залетающие на территорию чужаки подвергались немедленной атаке, вместо этого самец усилил пение и, мелко трепеща опущенными крыльями, параллельно поверхности земли подлетел к одной из своих нор и сел возле нее в яркой демонстративной позе. Новая птица подлетела к нему, и они один за другим скрылись в норе. Так вот в чем дело! Пока его законная супруга насиживает, самец пытается завлечь на свою территорию еще одну самку! Вряд ли это понравится хозяйке территории. Так и есть, вот она, наконец, вышла из гнездовой норы и, увидев соперницу, бросилась в атаку. Но не тут-то было! На защиту новой самки самым решительным образом стал самец. Он кинулся на

свою первую привязанность и стал нещадно гонять ее по территории до тех пор, пока она не спряталась в подвернувшуюся нору. Посидев около норы некоторое время, самец вернулся к новой самке. Едва он собрался возобновить демонстрацию, как вновь увидел первую самку, которая сразу же вылезла из норы, лишь отлетел самец. Последний снова набросился на нее и после короткой погони загнал ее на этот раз в гнездо. Однако обуреваемая агрессивными замыслами, самка сейчас же вновь вылезла оттуда и подлетела к сопернице. Вновь последовала атака самца, и снова первая самка ушла в нору. Так повторялось много раз. Затем новая самка, пользуясь покровительством кавалера, расширила свои владения. В результате территория оказалась разделена на две части, принадлежавшие разным самкам. Однако отношения между ними и впоследствии оставались весьма натянутыми. Порою самки, одержимые взаимной неприязнью, затевали самые настоящие пограничные конфликты, и только активное вмешательство самца предотвращало драки. Как только встретившиеся друг с другом самки начинали вести себя слишком оживленно, он немедленно разгонял их в разные стороны, причем, попадало и той, и другой.

### ДЕМОНСТРАТИВНОЕ ПОВЕДЕНИЕ И ОБЩЕНИЕ МЕЖДУ ОСОБЯМИ

Итак, что же такое демонстративное поведение? Уже в самом начале становления этологии было высказано предположение о том, что это не что иное, как «язык животных», с помощью которого они могут передавать друг другу весьма сложные сообщения, поскольку каждая демонстративная поза несет в себе исчерпывающую информацию о внутреннем состоянии демонстрирующей особи и о ее ближайших намерениях. Оценивая внешние особенности позы данной особи, другие члены сообщества получают информацию о мотивах, которые в данный момент управляют ее поведением, ибо каждой мотивации соответствуют жестко определенные, стереотипные элементы позы. Таким образом, в рамках этой теоретической концепции демонстративное поведение служит специфическим выражением мотивации, а связь между ними имеет врожденный характер.





Попытаемся теперь подытожить наши наблюдения за поведением каменки-плярсуны в период формирования популяции этого вида. Мы уже видели, что оно

складывается из двух параллельных процессов: распределения территорий и образования пар и трио. В обеих ситуациях разнообразие и интенсивность демонстративных поз изменяются в очень широких пределах. В некоторых случаях демонстрации вообще отсутствуют, однако это не препятствует образованию пары или разделу территорий. Следовательно, готовность к образованию пары или к агрессивным действиям, в принципе, может вообще не иметь никаких проявлений в поведении. Например, судя по тому, с каким

так что приходится лишь удивляться их обоюдному коварству. Разумеется, во многих конфликтах действительно демонстрируются весьма интенсивные позы, однако появление демонстраций вовсе не указывает на возрастание агрессивности соперников. Более того, эти же демонстрации зачастую используются и в ситуациях, в которых вряд ли можно предполагать наличие агрессивной мотивации (например, во взаимодействиях с самкой накануне спаривания). Все это заставляет нас усомниться в существовании сколько-нибудь



Структура популяции каменни-плясуньи в долине Акер-Чешме (Бадхызский заповедник). Средняя площадь территорий моногамных самцов — около 1,5 га, полигамных самцов — почти вдвое больше.

-  границы территорий
-  центр активности и перемещения холостых самцов
-  гнезда
-  деревья фисташки (средняя высота 3—4 м)

ожесточением самцы в ходе пограничного конфликта нападают друг на друга, можно предположить, что они настроены отнюдь не миролюбиво, и их действия определяются агрессивной мотивацией. Между тем внешне это ни в чем не проявляется, и на протяжении всего конфликта оба соперника пребывают в самых заурядных позах,

однозначной связи между агрессивной мотивацией и демонстративным поведением.

При образовании пар отсутствие однозначной связи между мотивацией и демонстративными позами проявляется еще более сильно. Самец может образовать пару, не приняв ни одной позы, сколько-нибудь отличающейся от обычной, повседневной. В других случаях самец сопровождает свою помолвку крайне интенсивными и яркими демонстрациями. Наконец, точно такие же демонстрации может адресовать самке молодой самец, совершенно не готовый к образованию пары, ибо вслед за этими демонстрациями сейчас же следует стремительное нападение на самку.

Итак, мы все больше склоняемся к мысли о том, что все эти яркие и экстравагантные демонстративные реакции стоят несколько особняком от мотивированного поведения, которое в большинстве случаев выглядит достаточно целенаправленным. Это может быть нападение на дру-



гую особь (агрессивная мотивация), спаривание (сексуальная мотивация), сбор корма (пищевая мотивация) и т. д. Чем выше уровень мотивации, тем больше вероятность соответствующих действий. С демонстративным поведением дело обстоит сложнее. Как мы пытались показать, оно не имеет связи с классической мотивацией, и поэтому для его описания лучше всего пользоваться понятием «уровня активации». Такая интерпретация дает возможность одновременно использовать понятия мотивации и активации при изучении поведения и в какой-то мере устраняет их традиционное противопоставление.

Повышает ли демонстративное поведение эффективность общения (коммуникации) между особями — вопрос сложный. Если рассматривать демонстративное поведение как нечто цельное и неразложимое на отдельные составляющие (позы и др.), то, очевидно, можно дать положительный ответ. Если же трактовать демонстративное поведение как набор дискретных поз, каждая из которых несет в себе определенный смысл и служит непременным условием эффективной коммуникации, то на этом пути нас ожидает целый ряд существенных трудностей. Во-первых, одни и те же позы используются в совершенно разных ситуациях (например, при пограничном конфликте и в ходе образования пары). Следовательно, совершенно разное внутреннее состояние особи внешне проявляется одинаково, и только лишь на основе поз невозможно судить о мотивах действий животного. Во-вторых, как мы видели, эффективная коммуникация вполне возможна при расчленении территорий и образовании пар и без демонстративного поведения, хотя в большинстве случаев оно все же сопровождается перечисленными ключевыми взаимодействиями. В-третьих, возникает крайне сложная проблема вычленения отдельных поз из непрерывных действий животного.

В настоящее время вопрос о причинных факторах демонстративного поведения и его роли в общении животных далек от своего окончательного разрешения. Получены данные о том, что демонстративное поведение представляет собой комплекс двигательных реакций, управление которым уже в головном мозге осуществляется относительно автономно от мотивированного поведения. С помощью слабого электрического раздражения гипоталамуса у кошки удается вызвать эмоциональное состояние сильной ярости (мотивированной агрессии), которое, по мнению экспериментаторов,

почти не проявляется внешне<sup>1</sup>. Однако не стоит брать эту кошку на руки! Это может кончиться весьма печально, и хорошо, если дело ограничится лишь разодранной перчаткой. Кстати, другие кошки, которые находятся в одной клетке с подопытным животным, прекрасно ориентируются в тончайших изменениях в поведении последнего и ведут себя очень настороженно, постоянно ожидая нападения с его стороны. При раздражении другого участка гипоталамуса спокойная и симпатичная кошечка внезапно превращается в разъяренную фурию. Она шипит, горбит спину со вздыбленной шерстью, воинственно размахивает хвостом и скалит зубы. Между тем ее соседи по клетке не проявляют никакого беспокойства. Кошку, казалось бы, предельно разъяренную, можно безбоязненно взять на руки. Эти эксперименты, проведенные в Ленинградском медицинском институте А. В. Вальдманом и М. М. Козловской, показывают, с какой осторожностью надо подходить к оценке ярких, интенсивных и бросающихся в глаза особенностей поведения. То обстоятельство, что они в первую очередь приковывают к себе наше внимание, отнюдь не означает того, что они имеют столь же важное значение в жизни изучаемых нами объектов. Вызывая к себе повышенный интерес, они «гипнотизируют» исследователя и, в конечном итоге, отвлекают его от поиска тех тончайших механизмов, которые и определяют собой подчас необычайно эффективные и дифференцированные способы общения животных.

<sup>1</sup> Вальдман А. В., Козловская М. М. Изменение зоосоциальных взаимоотношений в группе животных как объективный показатель вызванных электростимуляцией мозга нарушений в эмоционально-психической сфере. — В кн.: Нейрофизиологический подход к анализу внутривидового поведения. М.: Наука, 1976.

## РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Иваницкий В. В. ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ И ПОВЕДЕНЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ПОЛИГИНИИ У КАМЕНКИ-ПЛЯСУНЬИ. — Зоологический журнал, 1978, т. 57, вып. 10.

Паков Е. Н. МЕХАНИЗМЫ КОММУНИКАЦИЙ У ПТИЦ. М.: Наука, 1978.

Тинберген Н. ОСЫ, ПТИЦЫ, ЛЮДИ. М.: Мир, 1978.

Хайнд Р. ПОВЕДЕНИЕ ЖИВОТНЫХ. М.: Мир, 1975.

## СЕРГЕЙ ИВАНОВИЧ ВАВИЛОВ

К 90-летию со дня рождения

В этом году исполняется 90 лет со дня рождения крупнейшего советского физика Сергея Ивановича Вавилова [12(24) марта 1891 — 25 января 1951 г.], президента АН СССР (1945—1951). С 1936 по 1951 г. С. И. Вавилов был председателем редакционной коллегии нашего журнала.

По инициативе академика Ильи Михайловича Франка многие из близких, друзей и коллег С. И. Вавилова поделились своими воспоминаниями о нем, составившими сборник «Сергей Иванович Вавилов. Очерки и воспоминания» [М.: Наука, 1979; рецензию на него см.: Природа, № 6, 1980]. Сборник вызвал большой читательский интерес, а главное — новые воспоминания, авторами которых явились академики С. Н. Вернов, Д. С. Лихачев, М. А. Марков, член-корреспондент АН СССР Е. Л. Фейнберг и др. Эти воспоминания входят во 2-е издание упомянутого сборника, подготовленное издательством «Наука».

Моисей Александрович Марков, крупнейший специалист по квантовой механике, физике элементарных частиц, академик-секретарь (с 1967 г.) Отделения ядерной физики АН СССР, был учеником, а затем сотрудником С. И. Вавилова в Физическом институте им. П. Н. Лебедева АН СССР (ФИАН). Его воспоминания мы и предлагаем ныне читателям «Природы», наряду с подборкой фотографий С. И. Вавилова, хранящихся в Архиве АН СССР.

### Из воспоминаний о С. И. Вавиллове

Академик М. А. Марков

Кажется, не так уж давно это было. В памяти еще возникает Леонид Исаакович Мандельштам, он медленно поднимается по лестнице, ведущей в небольшую аудиторию Физического института в старом здании Московского университета<sup>1</sup>. Здесь через несколько минут начнется семинар, руководимый Леонидом Исааковичем. За Леонидом Исааковичем, сдерживая свой вечно спешащий шаг, с непривычной сте-

пенностью следует молодой, хочется сказать юный, Игорь Евгеньевич Тамм, как говорили студенты: «Игорь». За ним неизменно корректный какой-то своеобразной, только ему свойственной корректностью Григорий Самойлович Ландсберг. Ему как-то не шло привившееся в институте сокращенное «Григс». И юношески стройный, казалась, смуглый до черноты Сергей Иванович Вавилов. Кажется, не так давно это было. А ведь все это было более пятидесяти лет тому назад!

В конце 20-х — начале 30-х годов в Физическом институте Московского уни-

<sup>1</sup> Имеется в виду Физический институт при физическом факультете МГУ на Моховой.

верситета возникла группа физиков, главой которой был Л. И. Мандельштам. В те годы становления квантовой механики многое в ней казалось неясным с точки зрения старых, привычных представлений. Было большой удачей для Московского университета, что здесь во главе физиков оказался Л. И. Мандельштам, ученый мирового класса и обаятельный человек. Особо выделяло Леонида Исааковича то, что ему была близка классическая физика волновых явлений во всех их проявлениях: оптических, радиоволновых, звуковых, гидродинамических. Непревзойденный знаток волновых процессов в средах, он обладал уникальными в мире возможностями истолкования волновых аспектов в квантовой теории, которая долгое время называлась просто волновой механикой.

Небольшая аудитория наполнялась до отказа. Чаще всего где-то у окна можно было видеть стоящего во весь рост высокого Михаила Александровича Леонтовича, чем-то напоминающего Пьеро, в длинной узкой спецовке. Часто бывал жизнерадостный А. А. Андронов; к его цветущему лицу и крепкой фигуре очень шел расстегнутый ворот рубахи без пояса. Там были многие другие, которых давно уже нет...

Семинар был праздником не только для московских физиков, гостями, правда нечастыми, были ленинградцы: Г. А. Гамов, Д. Д. Иваненко, запомнился ярко-красный галстук Л. Д. Ландау. Были и зарубежные гости. Трудно отказаться от упоминания семинара, на котором присутствовал П. Эренфест. Небольшого роста, подвижный, коренастый, очень оживленный; ему, казалось, невозможно долго усидеть на одном и том же месте, в одной и той же позе. Помнится, он достал из кармана смятое письмо, это была еще не опубликованная работа П. Дирака о следствиях знаменитого уравнения Дирака. Он недоуменно комментировал очень непонятные тогда строчки письма. «Здесь речь идет о каких-то дырках в вакууме,— сбивчиво начал говорить Эренфест.— Эти дырки несут положительный заряд, утверждается, что протоны,— пожимал он плечами.— Если б это писал не Дирак,— разводил руками Эренфест,— то я бы просто... Но Дирак гений, вот и разберись тут!» Возникло еще какое-то непонятное место письма. Эренфест, наконец, сказал, что ему трудно переводить с английского на немецкий, а потом с немецкого на русский, и попросил Мандельштама прочитать письмо. Когда Леонид Исаакович удачно справился с каким-то темным местом письма, Эренфест порывисто вско-

чил со стула, хлопнул по плечу Леонида Исааковича, приговаривая по-русски: «Хо-о-роший дядя! Хо-о-роший дядя!»

На этих семинарах я впервые увидел Сергея Ивановича, видел издали, с последних скамеек аудитории. Как я мог тогда предвидеть, какую роль в моей жизни будет играть этот пока, в сущности, незнакомый мне человек!

Будучи студентом последних курсов, я «отрабатывал», как тогда говорили, оптический практикум. Он был только что организован М. А. Леонтовичем под руководством С. И. Вавилова. Однажды неожиданно для меня Михаил Александрович Леонтович предложил мне стать аспирантом у Сергея Ивановича Вавилова. Помнится, он сказал примерно следующее: «Я не знаю, как у вас там с теорией, вот Блохинцев, например, четко проявил себя как теоретик. Но я вижу, что руки у вас хорошие и вы могли бы стать экспериментатором». Так я оказался аспирантом, экспериментатором у С. И. Вавилова. О Сергее Ивановиче писалось много. И многое еще можно писать. Но о нем трудно, очень трудно писать так, чтобы возник тот образ, который был бы образом реального Сергея Ивановича. Портреты, скульптура и даже фотографии не дают о нем адекватного представления, упрощают сложный образ Сергея Ивановича. В них нет того вавиловского шарма, которым обладал Сергей Иванович. Вы не видите внимательно смотрящего на вас, как бы изучающего вас взгляда, взгляда его больших и теплых карих глаз. Вы не слышите характерных низких нот его, вавиловского, голоса, с его покашливанием, его, вавиловского, юмора, его специфического жеста, когда, склоняясь набок, он достает из кармана папиросы, в то же время как бы привязывая вас к себе своим внимательным взглядом.

По предложению Сергея Ивановича я стал заниматься фотоэффектом, проверкой одного наблюдения, сделанного физиком Марксом. В моем распоряжении был лишь старый фотоэлемент, которым, по преданиям, много лет назад пользовался Григорий Самойлович Ландсберг для наблюдения, кажется, солнечного затмения. Моя аспирантская работа у Сергея Ивановича была недолгой. После выборов в действительные члены Академии наук Сергей Иванович уехал в Ленинград научным руководителем Оптического института, но в 1934 г. в связи с переездом Академии наук в Москву он стал директором организованного им ФИАН. С этого года я стал сотрудником теоретического отдела ФИАН, ру-

ководимого И. Е. Таммом. ФИАН был детищем Сергея Ивановича, его созданием, хотя он по предложению Сергея Ивановича носит имя Петра Николаевича Лебедева. Сергей Иванович Вавилов, как глубокий знаток истории физики, относился с особым уважением к научным заслугам Петра Николаевича Лебедева. В это время я уже не был аспирантом Сергея Ивановича, но наши отношения не только сохранились, но постепенно расширились и углубились взаимным интересом к философским проблемам физики и к физике элементарных частиц. Это было время быстрого накопления данных о новых элементарных частицах. Неожиданно оказалось, что мир устроен не так просто, как это думалось раньше. Новая теория — квантовая теория — давала много поводов для размышлений и дискуссий. Наши беседы иногда длились часами. Они часто начинались с характерного для Сергея Ивановича вопроса: «Ну, что там у вас, какие чувствуются флюиды?» Это значило: что нового за последнее время появилось в теоретической физике, физике элементарных частиц? Когда он зажигал папиросу и усаживался поудобнее в кресло, это значило, что время у него есть и он готовится к длительной беседе. Сергей Иванович умел создавать уютную обстановку, неприступность беседы. Казалось, что в комнате становится теплее и речь идет не о сложных научных проблемах<sup>2</sup>. Время от времени на сообщение о новой частице он вставляет характерным баском замечание: «Что ни сезон, то мезон» или что-нибудь в этом роде. Он обладал удивительным умением почувствовать те проблемы, которые вас в настоящее время занимают, и с ним было легко говорить об идеях, которые еще не вполне четко удавалось сформулировать. Помнится, как-то в такой момент Сергей Иванович продекламировал: «Словами диспуты ведутся, из слов системы создаются»<sup>3</sup>. «Фауст» был любимым его произведением.

Однажды я рассказал Сергею Ивановичу о занимавшей меня в то время идее связи гравитации с электромагнетизмом. Связи в том смысле, что вращающееся массивное тело, электрически нейтральное, должно обладать магнитным моментом. Эти смутные идеи подкреплялись гипотетическими соображениями, а численные оценки приводились исходя из рассмотренных размерностей.

Я был удивлен тем интересом, с которым Сергей Иванович отнесся к этим слишком спекулятивным идеям. В последующие месяцы он неоднократно спрашивал меня о моей дальнейшей работе в этом направлении. К этому времени я несколько охладел к обсуждаемой проблеме, так как соответствующая строгая теоретическая формулировка, требующая изменения уравнения Эйнштейна, говоря жаргонным теоретическим языком, не «вытанцовывалась». Но Сергей Иванович настойчиво и многократно возвращался к разговорам на эту тему и однажды вызвал А. Б. Меликьяна, сотрудника лаборатории колебаний, для обсуждения возможного эксперимента, возможной скорости вращения массивного шара и оценки мешающего фона измерений в земных условиях. Помнится, он сказал, что надо посоветоваться с П. Л. Капицей о реальных пределах скорости вращения массивного шара в таком эксперименте. «Здесь надо бы иметь человека с головой и руками Брумберга»<sup>4</sup>, — между прочим заметил Сергей Иванович. В этом замечании нашло свое отражение и отношение Сергея Ивановича к экспериментальной работе вообще. Оно хорошо описано А. Л. Минцем в «Ночной беседе», помещенной в этом сборнике. Сергей Иванович видел и понимал тенденции современного эксперимента к созданию сложных установок, требующих больших коллективов. Но он не исключал и путь «тонкого и изящного эксперимента, где творческий полет фантазии дополняется умением лично создать простые приборы и получить тем не менее результаты фундаментального зна-

<sup>2</sup> Иногда речь шла действительно о «несложных проблемах». Чаще всего Сергей Иванович с большим юмором рассказывал о случаях из военной службы во время войны 1914 г. Сергей Иванович очень остро чувствовал юмор положения. И когда возникла даже в «обществе» какая-то комическая ситуация, ему было трудно удерживаться от слишком откровенной реакции, которой он сам бывал недоволен, и свой «простулок» спешил сразу же компенсировать более суровым выражением лица.

<sup>3</sup> Гете И. В. Фауст. Пер. Н. А. Холодковского. М.: Искусство, 1962, с. 112.

<sup>4</sup> Талантливость Е. М. Брумберга — своего лаборанта, в дальнейшем ученика и сотрудника, Сергей Иванович высоко ценил. Трудно себе представить, как при поразительной рассеянности Брумберга работа его была такой успешной. Помнится, раз он остановил меня в вестибюле Института и в обычной своей манере, слегка заикаясь, сказал: «Я бы хотел услышать от вас отзыв об одной книге... Что вы о ней думаете?.. Вот только я забыл ее название... И автора забыл...»



С. И. Вавилов, С. Пен'ковский [Польша], Г. С. Ландсберг, М. Бори (слева направо) у входа в ФИАН на 3-й Миусской улице.

чения»<sup>5</sup>. Открытием эффекта Черенкова — Вавилова Сергей Иванович дал блестящий пример такой возможности.

Как-то Сергей Иванович попросил меня срочно зайти к нему в кабинет. Он держал в руках только что полученную газету «Британский союзник»<sup>6</sup>. Дело в том, что целый разворот этой газеты был посвящен докладу профессора П. Блэкетта в Английском королевском обществе, где излагались как раз идеи о возможной связи земного магнетизма с вращением Земли примерно с тех же позиций, которые обсуждались мной с Сергеем Ивановичем.

«Неужели прошляпили?» — недовольно бурчал Сергей Иванович. Я был несколько обескуражен возникшей ситуацией и

стал выставлять аргументы, прямо противоположные моим прежним. Впоследствии идея в той форме, в которой она высказывалась Блэкеттом и мной, оказалась несовместимой с экспериментальными данными. Пример показывает, однако, насколько широки были интересы Сергея Ивановича. Его мышлению была сродни идея о необходимой связи явлений, на первый взгляд, весьма отдаленных друг от друга по своей сущности. Помнится, он говорил: «Я не знаю, правы вы или нет в данном случае, но какая-то связь между гравитацией и электромагнитными явлениями должна быть». Он приводил и историю установления связи между магнитными и электростатическими явлениями, когда вся эта область была объединена М. Фарадеем, а затем Дж. Максвеллом в общую теорию электромагнетизма. Более того, он вспоминал какие-то соображения Петра Николаевича Лебедева и даже как-будто постановки каких-то опытов по выяснению возможной связи гравитации и электромагнетизма. Может быть, воспоминания о работах Петра Николаевича Лебедева определили в какой-то мере его интерес к данной проблеме.

Вообще говоря, интуитивно чувствуется, что какая-то глубокая связь между различными силами природы существует:

<sup>5</sup> Милиц А. Л. Ночная беседа. — В сб.: Сергей Иванович Вавилов. Очерки и воспоминания. М.: Наука, 1979, с. 182.

<sup>6</sup> Газета «Британский союзник» издавалась на русском языке в годы войны.



С. И. Вавилов в Италии в июне-июле 1913 г. Его путевые заметки «Города Италии» и отрывки из юношеского дневника опубликованы в сборнике «Сергей Иванович Вавилов. Очерки и воспоминания». М.: Наука, 1979.



С. И. Вавилов у себя на квартире в Еропкинском переулке в Москве. Нач. 20-х гг.



С. И. Вавилов в походной радиолaborатории, где он работал во время I мировой войны и где выполнил экспериментальное и теоретическое исследование «Частота колебаний нагруженной антенны», опубликованное в 1919 г.

С. И. Вавилов в сопровождении сотрудников Леннака-демстроя осматривает Пулковскую обсерваторию. 1946 г.

С. И. Вавилов, П. Я. Свешников и лаборантка у спектрографа просматривают негативы спектрального анализа бензинов. 21 ноября 1938 г.



С. И. Вавилов в 1951 г.



к раскрытию этой связи в настоящее время стремится наука, но конкретная форма этой связи пока остается для нас неясной.

Как-то в конце 1946 г. Сергей Иванович обратился ко мне с просьбой написать брошюру, как он сказал, «о ваших взглядах на философские проблемы квантовой механики». «Это не только моя личная просьба», — подчеркнул Сергей Иванович. Я упорно отказывался, но Сергей Иванович был настойчив: «Вы хотите накрыться хвостом и уйти в кусты? Это вам не удастся». Хотя я не понял буквального смысла начала фразы «накрыться хвостом», но я понял, что не могу больше сопротивляться, и приступил к работе.

Я предупреждал Сергея Ивановича, что результатом будет острая дискуссия, которая осложнится тем, что при обсуждениях методологических проблем путают проблемы конкретных наук с проблемами чисто философскими, относящимися к самой теории познания. Это наследие натурфилософии прошлого. Оно принесло много вреда конкретным наукам. Утверждение Аристотеля о движении по кругу как наиболее простое движение, осуществляемом в природе, в известной степени мешало развитию классической механики. А толкование И. Кантом пространства и времени как наглядных представлений априори утверждало, в сущности, единственность евклидовой геометрии. Так, с диалектическим материализмом иногда неправомерно связывалась судьба конкретных физических теорий. Но изменчивость конкретных физических теорий при такой ситуации ведет к подрыву доверия к философии диалектического материализма. Эта опасность для диалектического материализма многократно была объектом наших бесед с Сергеем Ивановичем.

После появления моей статьи в «Вопросах философии» с предисловием Сергея Ивановича разразилась острая дискуссия, характерная для того времени. В своей статье В. И. Векслер слегка касается этой дискуссии<sup>7</sup>.

В то время в ФИАНе уже работала установка «Тройка» — циклический ускоритель электронов на 30 МэВ (1947). Ставились первые эксперименты по рождению  $\pi$ -мезонов на ядрах от  $\gamma$ -квантов (1949) на запускаемом электронном ускорителе с энергией до 250 МэВ. Возникла идея строительства большого ускорителя на

10 ГэВ. Высказывались различные точки зрения на то, какие частицы должны быть объектом этого ускорителя: электроны или протоны. ФИАН высказывался за электронный вариант. В пользу этого варианта был опыт ФИАНа в строительстве электронных ускорителей. Группа физиков, так или иначе связанная с Институтом атомной энергии, защищала протонный вариант. Одним из доводов было также успешное строительство в Дубне протонного ускорителя М. Г. Мещерякова<sup>8</sup>. В пользу протонного варианта была и общая идея о необходимости исследования природы ядерных сил в непосредственных взаимодействиях протонов (ускоренных протонов с ядрами мишени). Эффекты этих взаимодействий могли бы дать соответствующую информацию. Сторонники протонного варианта высказывали возражение против варианта электронного, утверждая, что электромагнитное взаимодействие не даст столь богатой информации о природе ядерных сил по сравнению с протонным вариантом. Утверждалось, что при взаимодействии фотонов большой энергии в кулоновом поле ядра будут рождаться только мезонные пары, так же как рождаются пары электронно-позитронные, хорошо изученные к тому времени, в частности, в работах И. М. Франка и Л. В. Грошева. Но эти факты не приближают нас к пониманию ядерных сил. В то время в многочисленных беседах с Сергеем Ивановичем я, в частности, настаивал на электронном варианте. Высказывал соображения о возможности рождения одиночных мезонов от фотонов на ядрах и с тем, что эффект этот, как показывали сделанные к тому времени расчеты (А. М. Балдин и В. В. Михайлов), мог бы дать указание о природе рождающихся мезонов (скалярные, векторные, псевдоскалярные) и таким образом дать фундаментальные сведения о природе ядерных сил, квантом которых являются мезоны<sup>9</sup>. Вполне естественно, что в то вре-

<sup>8</sup> Протонный ускоритель М. Г. Мещерякова — синхротрон на энергию 650 МэВ Объединенного института ядерных исследований (см.: Милиц А. Л. Ночная беседа).

<sup>9</sup> На ускорителе ФИАНа, получившем название С-25, ожидалось получение первых результатов эксперимента по взаимодействию фотонов с энергией 250 МэВ на ядрах. Как раз в это время в иностранной литературе появилось первое сообщение о рождении  $\pi$ -мезонов от фотонов. Сергей Иванович был очень озабочен и настойчиво меня допрашивал, «одиночное или парное» это рождение. Так как для парного рождения не хватало энергии в этой установке, то речь шла, безусловно, об одиночном рождении  $\pi$ -мезонов. Появив си-

<sup>7</sup> См.: Векслер В. И. С. И. Вавилов в ФИАНе. — В сб.: Сергей Иванович Вавилов. Очерки и воспоминания. 1-е изд., с. 179.



мя имелись различные точки зрения. Все же после дискуссий приняли вариант протонного ускорителя на 10 ГэВ, который и был построен в Дубне.

Эти воспоминания не могут служить ни обоснованием того, что было несправедливо принято решение о строительстве протонного варианта, ни подтверждением того, что точка зрения сторонников электронного варианта была априори правильна. Такова история, такова логика развития науки.

Мне неоднократно приходилось ездить с Сергеем Ивановичем и В. И. Векслером на место строительства ускорителей в Дубну. «Мещеряковский» ускоритель находился в стадии пуска. Для строительства ускорителя на 10 ГэВ В. И. Векслера в то время только выделялась площадка. Трехчасовой путь от Москвы до Дубны давал широкие возможности для разнообразных дискуссий.

За много лет общения с Сергеем Ивановичем только однажды разговор отличался своей необычностью, он скорее был монологом. Я написал статью, которую Сергей Иванович представлял в ДАН (1950). Речь шла о взаимодействии протона и нейтрона с испусканием  $\Delta^0$ -мезона, но таком взаимодействии, в результате которого в конечном состоянии образуется дейтон. Неожиданно для меня расчет показал, что конечное взаимодействие нуклонов существенно увеличило вероятность подобного эффекта. Так как этот результат в то время казался существенно новым, то я несколько превысил установленные размеры статьи. Сергей Иванович ввел жесткие правила, ограничивающие размеры публикации в ДАН. На моей рукописи была его резолюция: «Сократить до принятых размеров». Сократив статью, я пришел к Сергею Ивановичу сказать, что его распоряжение выполнено. В это время из кабинета Сергея Ивановича был слышен, что называется, «крупный разговор», а вскоре оттуда вышел сотрудник института, держа в руках, как и я, какую-то рукопись. Со статьей в руках я вошел в кабинет Сергея Ивановича и только успел произнести: «Сергей Иванович, я...» Сергей Иванович тут же резко пе-

ребил меня: «Я знаю, сейчас вы будете говорить, что сократить статью невозможно...» «Сергей Иванович, сократите и все». «Сергей Иванович, я же ...» «Слушайте, зачем же мы будем продолжать бесполезный разговор? Каждый приходит ко мне (он, видимо, имел в виду только что вышедшего от него сотрудника института) и говорит, что сократить статью невозможно. Вы знаете, сколько дают нам времени на доклад по важнейшим вопросам Совмина? Вот, сократите и все!» Мне оставалось только уйти и передать свою сокращенную рукопись референту Сергея Ивановича Анне Илларионовне.

Несмотря на существенную разницу в возрасте, Сергей Иванович никогда не казался мне старым человеком. Этому, по-видимому, способствовала его форма общения и поведения. Теперь все-таки вспоминается, как медленно он поднимался по лестнице института в последние годы, как, по-видимому, тяжел для него был известный всем, туго набитый черный портфель. Но усилием воли он старался казаться прежним Сергеем Ивановичем.

Я бы не был удивлен, если бы и тогда в какой-нибудь студенческой компании он подтянул бы баском, как это, вероятно, он и делал в прежние студенческие Татьянины дни: «Gaudeamus igitur...»<sup>10</sup>.

Известие о его смерти было для меня настолько неожиданным, что я некоторое время не мог понять, о ком идет речь. А дальше только рассеянно повторял: «Не может быть этого, это какая-то ошибка». Но ошибки не было. Смерть Сергея Ивановича воспринималась мной как одна из смертей близких людей, когда внезапно переоцениваются жизненные ценности и многое освещается каким-то другим, не прежним светом.

<sup>10</sup> «Возрадуемся же...» (лат.) — начало старинного студенческого гимна.

туацию, Сергей Иванович облегченно глубоко вздохнул и шутивно перекрестился. Ведь он защищал в дискуссиях возможность одиночного рождения мезонов от фотонов. Видимо, не всегда это было просто. Почти в то же время на фиановском ускорителе (так называемой «двадцатипятке») стали получать, так сказать, отечественные  $\Delta$ -мезоны.

## Случайность неслучайного

Я. Г. Синай



Яков Григорьевич Синай, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник Института теоретической физики им. Л. Д. Ландау АН СССР, исполняющий обязанности профессора механико-математического факультета Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова. Основные работы связаны с эргодической теорией и математическими проблемами статистической механики. Автор монографий: Эргодическая теория (совместно с Корнфельдом И. П., Фоминим С. В.). М.: Физматгиз, 1980; Теория фазовых переходов. Строгие результаты. М.: Физматгиз, 1980.

Классическая теория вероятностей изучает случайные явления и процессы, которым с самого начала заданы отвечающие им вероятности. Наиболее распространенным примером таких явлений служит игра в орлянку, где вероятности выпадения той или другой стороны монеты принимаются одинаковыми и равными половине. Несколько более сложные вероятностные схемы возникают, когда рассматриваются тасование карт, игра в рулетку, розыгрыши лотерей и т. д.

Законы теории вероятностей проявляются в длинных сериях игр или испытаний и состоят в том, что частоты появления тех или иных комбинаций цифр, карт, возможностей при увеличении длины серии перестают колебаться и выходят на определенные предельные значения. При этом, чем длиннее серии, тем колебания средних становятся меньше. Для простейших игр серия в 1000 партий уже, несомненно, очень длинная. В термодинамике же, основные законы которой имеют статистическое происхождение, мы встречаемся с ансамблями из  $10^{20}$  молекул, и такие величины, как давление, плотность и т. п., выражаются в виде средних по сериям из  $10^{20}$  молекул. При этом колебания средних уже настолько малы, что мы полностью ими пренебрегаем и обращаемся со средними как с вполне определенными величинами.

Обычно подчеркивается, что для случайных явлений характерны два свойства: принципиальная возможность неограниченного повторения испытаний, например бросания монеты, розыгрыша лотереи и т. п., и независимость друг от друга исходов отдельных испытаний.

При решении практических задач предположение о существовании определенных заранее вероятностей далеко не столь безобидно, как это кажется на первый взгляд. Оно предполагает а priori наличие какого-то «случайного» механизма типа колеса рулетки, лотереи и т. п., действие которого и определяет значения вероятностей. Природа этого механизма, характер его работы при этом никогда не обсуждаются, а значения вероятностей определяются на основании анализа статистических данных.

Можно, однако, указать много примеров, когда никакого видимого случайного механизма нет, а применимость законов теории вероятностей не подлежит сомнению. Одним из самых важных среди них является турбулентность. Движение жидкости или газа подчиняется детерминированным уравнениям движения, уравнениям Навье — Стокса, имеющим сравнительно простой вид. Но в случае турбулентности движение выглядит столь сложно, что понятие индивидуальной траектории теряет

смысл и его можно описывать только усредненными характеристиками.

Во многих проблемах физики плазмы, нелинейной оптики и теории колебаний, в задачах прогноза погоды, в разнообразных проблемах экологии и т. д. мы сталкиваемся с явлениями, в которых выводы теории вероятностей об устойчивости поведения средних значений, о соотношениях между ними и другие, более сильные статистические закономерности действуют с удивительной точностью.

Существует область математики, называемая эргодической теорией, основная задача которой состоит в анализе причин, вызывающих появление статистических закономерностей у динамических систем. Подчеркнем, что эволюция этих динамических систем определяется детерминированными уравнениями движения, т. е. уравнениями, не содержащими в правых частях никаких случайных слагаемых. При этом возникают две основные проблемы, которые и обсуждаются ниже. Во-первых, при каких условиях и каким образом детерминированная динамика приводит к появлению статистических закономерностей классической теории вероятностей? И, во-вторых, почему статистические закономерности устойчивы, т. е. не нарушаются под действием малых шумов, флуктуаций и т. п.?

Долгое время считалось, что появление статистических закономерностей у динамических систем неизбежно связано с ростом числа степеней свободы, обеспечивающим возможность усреднения по этим степеням. Сейчас ясно, что такое требование совсем не обязательно: Существуют важные классы динамических систем с небольшим числом степеней свободы, даже с двумя, у которых строго детерминированная динамика приводит к появлению статистических закономерностей.

В течение двух последних десятилетий была развита теория, показывающая, что статистические закономерности возникают у систем, динамика которых имеет неустойчивый характер. Родоначалником идеи о связи неустойчивости и статистики следует, по-видимому, считать А. Пуанкаре. Близкие высказывания можно найти в трудах Ж. Адамара, Дж. Биркгофа, М. Борна, Э. Хопфа и др. Отчетливо эту мысль выразил советский физик Н. С. Крылов в своей книге «Работы по обоснованию статистической физики», изданной еще в 1950 г.<sup>1</sup>

Эта книга до сих пор часто цитируется в работах математиков, физиков, философов в др. Недавно издательство Принстонского университета выпустило ее в английском переводе<sup>2</sup>.

Современное понимание связи между неустойчивостью и статистикой возникло после привлечения идей и методов из теории информации. Принципиально важную роль здесь сыграла работа А. Н. Колмогорова 1958 г., где такая связь с теорией информации была обнаружена впервые<sup>3</sup>. С этой работы и началось бурное развитие теории, о которой пойдет речь.

Некоторое представление о неустойчивости движения можно почерпнуть из рассказа Р. Брэдбери «И грянет гром». Здесь описывается, как в XXI в. люди научились путешествовать во времени назад. Единственное требование, предъявляемое путешественникам, состояло в том, что они не должны сходить со специальной тропы, построенной как бы в другом измерении и не влияющей на эволюцию нашего мира. Однажды группа молодых людей отправилась охотиться на динозавров. Нечаянно соскользнув с тропы, один из охотников раздавил бабочку. Вернувшись домой, испуганные путешественники видят, что в стране избран другой президент, принята иная орфография и еще целый ряд изменений.

Описанный пример типичен для неустойчивых движений. Основное их свойство состоит в том, что малое изменение начальных данных приводит к нарастающим различиям траекторий движения. При полной неустойчивости это различие растет со временем экспоненциально. Можно показать, что при нормальных условиях (отсутствие особенностей у правых частей уравнений, задающих движение) более быстрый рост невозможен. Системы с полной неустойчивостью и будут представлять для нас основной интерес.

К сожалению, в настоящий момент мы не умеем для конкретно заданной динамической системы определять, будет ли ее движение неустойчивым. Удастся пока лишь исследовать отдельные классы динамических систем. Это не так мало само по себе, поскольку среди них встречается ряд важных, с точки зрения приложений, при-

<sup>1</sup> Крылов Н. С. Работы по обоснованию статистической физики. М.: Изд-во АН СССР, 1950, с. 208.

<sup>2</sup> Krylov N. S. Works on the Foundations of Statistical Physics, Princeton Series in Physics. Princeton, Princeton University Press, 1979, p. 283.

<sup>3</sup> Колмогоров А. Н. Доклады АН СССР, 1958, т. 119, № 5, с. 861.

меров. Кроме того, это создает почву для общих представлений. Мы опишем сейчас три конкретных примера неустойчивых динамических систем и поясним, в каком смысле их движение неустойчиво.

### ПРИМЕРЫ НЕУСТОЙЧИВЫХ СИСТЕМ

**Газ Лоренца.** Представим себе, что на неограниченную плоскость набросано произвольно, но в среднем равномерно, бесконечное число кружков одинакового радиуса. Мы будем называть их рассеивателями. Рассматривается движение, при котором материальная точка движется с постоянной скоростью между рассеивателями. Достигнув одного из них, точка отражается по закону «угол падения равен углу отражения». Такая динамическая система называется газом Лоренца, точнее, двумерным газом Лоренца. Предложенная Г. А. Лоренцем в начале XX в. как модель электропроводности металлов, она до настоящего времени является одной из основных моделей неравновесной статистической механики<sup>4</sup>.

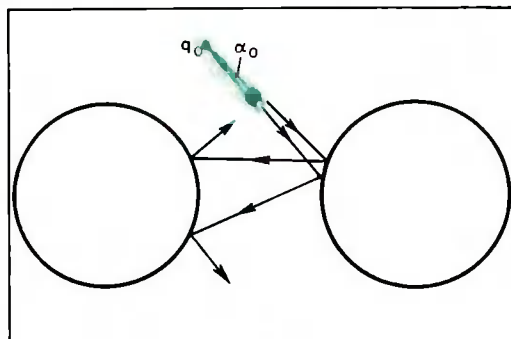
Двумерный газ Лоренца — пример одной из самых неустойчивых динамических систем. Чтобы убедиться в этом, представим пучок траекторий, выходящих из какой-либо точки  $q_0$  в разных направлениях. В сумме они составляют малый угол  $\alpha_0$ , иначе говоря, это угол между крайними направлениями пучка. При последовательных отражениях от рассеивателей каждая траектория по-своему меняет свое направление, и угол между крайними направлениями тоже меняется.

Неустойчивость можно характеризовать временем, через которое угол  $\alpha_0$  станет величиной порядка одного радиана. Иными словами, за это время «теряется память» о том, что в начальный момент угол  $\alpha_0$  был мал и все направления были близки между собой. Чем это время меньше, тем движение более неустойчиво.

Оказывается, что в газе Лоренца это время растет с уменьшением  $\alpha_0$  пропорционально одной из самых «медленных» функций  $\ln 1/\alpha_0$ . Логарифмический рост оказывается проявлением рассеивающего характера отражений от кружков-рассеивателей. Кружки можно заменить на произвольные выпуклые кривые со строго положительной кривизной, и пропорциональность  $\ln 1/\alpha_0$  сохранится. Однако если вме-

сто кружков взять многоугольники, у которых кривизна границы равна нулю, то  $\ln 1/\alpha_0$  меняется на  $1/\alpha_0$  и мы получим гораздо более устойчивую систему.

При помощи достаточно элементарных соображений можно убедиться в неустойчивости системы упруго сталкивающихся двух или трех шаров в ящике с плоскими стенками. Имеются и другие примеры более математического характера неустойчивых динамических систем. К их числу относится, например, движение по инерции материальной точки в пространствах



«Потеря памяти» в неустойчивых системах. Траектории, вышедшие из одной точки  $q_0$  под близкими направлениями (угол  $\alpha_0$ ), очень быстро расходятся, и их направления становятся разными. Это показывает, как в динамических системах происходит «потеря памяти» о начальных данных.

отрицательной кривизны. Эта динамическая система представляет собой частный случай систем Аносова, названных по имени советского математика Д. В. Аносова, внесшего важный вклад в изучение топологических свойств неустойчивых динамических систем.

Уже на примере газа Лоренца можно почувствовать, каким образом неустойчивость связана со статистикой. Рассмотрим последовательность из 0 и 1, полученную от десятикратного подбрасывания монеты: 1, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 1, 0. Мы пишем 1, если выпал «орел», и 0 — в случае «решки». А теперь рассмотрим двумерный газ Лоренца с периодической конфигурацией рассеивателей<sup>5</sup> будем писать 1, если отражение происходит от левой половины круж-

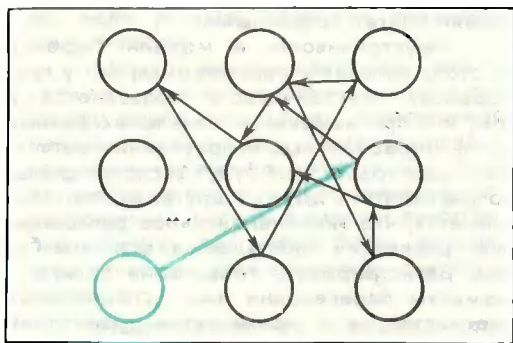
<sup>5</sup> Под периодической понимается такая конфигурация рассеивателей, у которой их центры образуют правильную кристаллическую решетку. Газ Лоренца с периодической конфигурацией рассеивателей существенно проще для математического анализа, чем газ Лоренца с произвольной конфигурацией рассеивателей.

<sup>4</sup> Lorentz H. A. Proc. Amsterdam Academy, 1905, v. 437, № 7, p. 585.

ка, и 0 — если от правой. Тогда можно указать траекторию, воспроизводящую при десяти отражениях в точности ту же самую последовательность 0 и 1.

Можно, разумеется, возразить, что этот пример подобран специально. Однако это не так. Оказывается, если регистрировать отражения не подряд, а через определенное число, то для любой сколь угодно длинной и «случайной» последовательности 0 и 1 найдется траектория, которая эту последовательность воспроизведет.

**Модель Лоренца.** В последнее время



Траектория точки в газе Лоренца, воспроизводящая при десяти отражениях «случайную» последовательность 1,0,1,0,0,1,0,1,1,0 (начало траектории показано цветом).

Для траектории точки газа Лоренца пишем 1, если отражение происходит от левой половины кружка, и 0, если от правой.

появилось много работ, в которых встречается термин «странный аттрактор». Странные аттракторы обнаруживаются во многих задачах физики, гидродинамики, биологии, химии и др. В журнале «Успехи физических наук» в 1978 г. было опубликовано два больших обзора А. С. Мони́на и М. И. Рабиновича, посвященных «странным аттракторам» в физических проблемах<sup>6</sup>.

Интерес к странным аттракторам широко распространился с середины 70-х годов. Этому способствовали глубокие математические работы, относящиеся к области, названной впоследствии дифференциальной динамикой. В них в абстрактном виде изучались многомерные динамические системы со сложным поведением траекторий (аттрактор Смейла — Вильямса, аттрактор Плыкина и т. п.): С другой стороны, в 1963 г. появилась работа известного американского метеоролога Э. Ло-

ренца<sup>7</sup>, в которой была получена и исследована с помощью ЭВМ система трех обыкновенных дифференциальных уравнений, названная впоследствии системой Лоренца. Эта система имеет вид:

$$\begin{aligned} dx/dt &= -\sigma x + \sigma y \\ dy/dt &= -xz + rx - y \\ dz/dt &= xy - bz. \end{aligned}$$

В правых частях, помимо линейных членов, содержится не более одного квадратичного слагаемого. Можно считать, что это простейшая нелинейная система обыкновенных дифференциальных уравнений. При выводе системы уравнений Лоренц исходил из хорошо известной задачи Бенара — Рэлея о конвекции газа или жидкости между двумя горизонтальными плоскостями, подогреваемых снизу<sup>8</sup>. Параметры  $\sigma$ ,  $r$ ,  $b$  здесь имеют прямой физический смысл. Например, вертикальный градиент температур характеризуется параметром  $r$ .

Если в задаче Бенара — Рэлея  $r$  меньше некоторого критического значения, то определяющим оказывается решение Рэлея, при котором газ неподвижен, а температура линейно меняется от одной плоскости до другой. Решение Рэлея при таких  $r$  устойчиво. Когда  $r$  возрастает и достигает определенного критического значения, решение Рэлея становится неустойчивым. Вместо него появляются устойчивые конвективные движения типа «валов», при которых пространство разбивается на конвективные ячейки, внутри которых газ движется по замкнутым кривым. Если продолжать увеличивать  $r$ , то «валы» также теряют устойчивость. Эксперименты показывают, что вместо них появляются сложные нерегулярные движения.

Э. Лоренц обнаружил в своей модели многие черты исходной задачи Бенара — Рэлея. Так, при  $r < 1$  все решения системы Лоренца стремятся к точке (0,0,0), что соответствует устойчивости решения Рэлея. При  $r > 1$  нулевое решение становится неустойчивым и появляются новые устойчивые решения, соответствующие конвективным движениям. Их число равно двум, так как для конвекции есть только две возможности в выборе направления вращения внутри конвективных ячеек. При дальней-

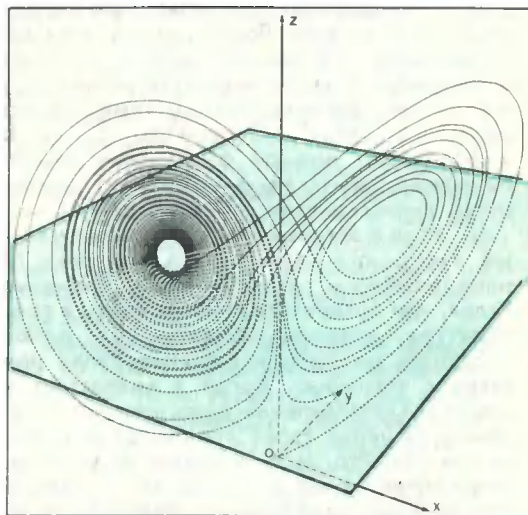
<sup>7</sup> Lorenz E. N. J. Atmosph. Sci., 1963, v. 20, p. 130.

<sup>8</sup> Эта задача в различных вариантах обсуждается также в статье: Гапонов-Грехов А. В., Рабинович М. И. Хаотическая динамика простых систем.— Природа, 1981, № 2, с. 54.

<sup>6</sup> Монин А. С. УФН, 1978, т. 125, вып. 1, с. 97; Рабинович М. И. Там же, с. 123.

шем возрастании  $g$  эти решения также теряют устойчивость (при  $g > 25$ ).

Лоренц исследовал с помощью ЭВМ вид траекторий при  $g=28$ ,  $\sigma=10$ ,  $b=8/3$ . Он обнаружил траектории, которые переходили из полупространства  $x > 0$  в полупространство  $x < 0$  совершенно нерегулярным хаотическим образом. Более точно следует сказать, что если мы заранее выберем каким угодно способом цепочку переходов из одного полупространства в другое, то у системы Лоренца найдется решение, у которого эти переходы проис-



Траектория в системе Лоренца при  $\sigma=10$ ,  $g=28$ ,  $b=8/3$ . Приведенная траектория была получена американским математиком О. Лэнфордом на ЭВМ. Можно увидеть, что вначале она делает оборот справа, затем несколько оборотов слева, затем снова оборот справа и т. д. нерегулярным образом. На рисунке приведено около 50 оборотов.

ходят в соответствии с выбранной заранее цепочкой. Мы снова встречаемся с ситуацией, отмеченной для газа Лоренца: любые сколь угодно «случайные» цепочки переходов воспроизводятся траекторией динамической системы модели Лоренца.

В модели Лоренца возникает типичный пример странного аттрактора. При значениях параметров, отвечающих области «случайных» решений, в пространстве точек  $(x, y, z)$ , где происходит движение, образуется множество, к которому притягиваются все соседние траектории. Такие множества и называются аттракторами. Большое значение для понимания того, что здесь происходит, имела работа горьковских математиков В. С. Афраймовича,

В. В. Быкова и Л. П. Шильникова<sup>9</sup>. Несколько упрощая, их предположение сводилось к тому, что на самом аттракторе движение носит неустойчивый характер.

С точки зрения топологии, аттрактор состоит как бы из бесконечного числа двумерных листов наподобие листов бумаги, но его структура в перпендикулярном направлении гораздо более сложная и «дырявая». Достаточно сказать, например, что между двумя любыми листами есть пробелы, которые не принадлежат аттрактору. Именно благодаря такой необычной топологической структуре аттрактора получили эпитет «странный».

Неустойчивость в модели Лоренца не столь сильная и равномерная, как у газа Лоренца. Неустойчивость проявляется в том, что при изменении начальных данных вдоль определенных направлений соответствующие траектории будут экспоненциально расходиться друг от друга. Далее, оказывается, что экспоненциальное расхождение траекторий наблюдается, если мы будем регистрировать траектории только в моменты пересечения ими специальных плоскостей, а в промежутке траектории могут и сближаться. В настоящее время не существует аналитических средств, позволяющих вычислить положение странного аттрактора и исследовать характер неустойчивости движения на нем. Вся имеющаяся информация получена с помощью ЭВМ. Но описанные результаты о неустойчивости вполне надежны и даже, в определенном смысле, являются математически строгими.

**Идеальный газ.** Третий пример неустойчивой системы носит несколько вырожденный характер. Речь пойдет об идеальном газе, т. е. о системе материальных точек, движущихся без взаимодействия в пространстве. Это — простейшая динамическая система статистической механики. Отличительные особенности таких систем — большое (фактически бесконечное) число степеней свободы и их «равноправие», вытекающее из того, что отдельные частицы одинаково влияют на поведение системы в целом. Этим системы статистической механики отличаются, например, от систем гидродинамики, в которых влияние отдельных мод затухает по мере уменьшения длины волны.

Оказывается, что несмотря на отсутствие взаимодействия идеальный газ обла-

<sup>9</sup> Афраймович В. С., Быков В. В., Шильников Л. П. Доклады АН СССР, 1977, т. 234, № 2, с. 336.

дает определенными статистическими свойствами. Впервые это было отмечено А. Пуанкаре в его работе о движении «малых планет», где рассматривалось круговое движение материальных точек с разными угловыми скоростями<sup>10</sup>. Пуанкаре показал, что если эти скорости несоизмеримы, а в начальный момент все планеты помещены в одной точке, то с течением времени из-за различия угловых скоростей они распределяются по углам равномерно. Это, несомненно, утверждение статистического характера. Оно, разумеется, несправедливо, если угловые скорости соизмеримы между собой.

Неустойчивость движения идеального газа проявляется в том, что расстояние между двумя молекулами, движущимися с разными скоростями, растет линейно со временем. Конечно, это очень слабая неустойчивость, но для идеального газа с бесконечным числом степеней свободы ее оказывается достаточно для появления определенных статистических закономерностей.

Утверждение, что динамика идеального газа обладает статистическими свойствами, должно вызвать естественное недоумение. Обычно считается, что перемешивание и связанная с ним релаксация к равновесию вызываются взаимодействием молекул типа столкновений. Однако в идеальном газе релаксация все-таки происходит, но релаксируют к равновесным только неравновесные распределения весьма специального вида. Неравновесные же распределения, получающиеся возмущением значений термодинамических параметров, не релаксируют к равновесным распределениям.

Мы привели три более или менее показательных примера неустойчивых динамических систем.

### С ЧЕГО НАЧИНАЕТСЯ АНАЛИЗ СТАТИСТИЧЕСКИХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ?

Теперь мы переходим к основной проблеме: каким образом из неустойчивости движения вытекают статистические закономерности.

Первое соображение заключается

в следующем. В таких системах из-за неустойчивости имеется большое разнообразие типов траекторий. Чтобы пояснить это, рассмотрим фазовое пространство динамической системы, т. е. пространство, в котором происходит движение. Разобьем его на ячейки и будем через единицу времени регистрировать номера ячеек, в которых оказывается движущаяся точка. Результатом наблюдения непрерывной траектории в течение  $T$  единиц времени будет запись  $\{i_0, i_1, \dots, i_T\}$ , где символы  $i_0, i_1, \dots$  — номера последовательно проходимых ячеек. Типом отрезка траектории за время от 0 до  $T$  мы и называем все слово  $\{i_0, i_1, \dots, i_T\}$ .

В неустойчивых системах число различных типов отрезков траекторий растет с увеличением  $T$  экспоненциально. Показатель экспоненты есть некоторая характеристика динамической системы, представляющая собой величину, родственную энтропии, используемой в теории информации.

С другой стороны, если представлять себе «случайные» слова  $\{i_0, i_1, \dots, i_T\}$  как слова, в которых нет никаких закономерностей, т. е. составленные без всяких грамматических правил, то их число также растет экспоненциально с увеличением  $T$ . Число же «неслучайных» последовательностей, в которых есть закономерности типа периодичности и т. п., растет медленнее, чем экспонента. Если поставить теперь вопрос о перечислении типов отрезков траекторий неустойчивой динамической системы, то мы неизбежно приходим к заключению, что среди них встретятся «случайные» слова  $\{i_0, i_1, \dots, i_T\}$ , поскольку их и других экспоненциально много.

Приведенное рассуждение, разумеется, весьма схематично. Было бы весьма важно уметь количественно оценивать для динамической системы степень ее случайности, например исследовать поведение временных корреляционных функций, форму частотного спектра и т. п. При этом мы подходим к общему важному вопросу. Поскольку в неустойчивых динамических системах много типов траекторий, то приходится отказываться от изучения отдельных индивидуальных траекторий, а вместо этого рассматривать их ансамбли.

В неустойчивых системах не существует никаких общих принципов, по которым один ансамбль можно предпочесть другому, и его можно выбирать многими способами. В конкретных задачах ансамбли определяют обычно, задавая плотность

<sup>10</sup> Poincaré H. Reflexions sur la théorie cinétique des gaz.— «J. de Physique», 1906, sér. 4, t. 5, p. 369. См. также: Пуанкаре А. Замечания о кинетической теории газов.— Избранные труды. М.: Наука, 1974, т. 3, с. 385.

распределения вероятностей на фазовом пространстве. При этом изучаются свойства траекторий, выполняющиеся с вероятностью 1 по отношению к этому распределению вероятностей (далее эти свойства описываются более конкретно) и, следовательно, фактически от него не зависящие. Помимо соображения удобства, есть следующие основания для такого выбора. В этом случае ансамбль устойчив по отношению к любым малым возмущениям динамической системы в том смысле, что статистические свойства типичных траекторий незначительно меняются при воздействии малых возмущений. Кроме того, изучая неустойчивые динамические системы с помощью ЭВМ, нам приходится иметь дело с отдельными преобразованиями конечных фазовых пространств. Существуют веские доводы в пользу того, что статистические характеристики получаемых с помощью ЭВМ траекторий и описанного выше ансамбля близки между собой. Хотя, насколько нам известно, этот вопрос достаточно серьезно не изучен.

Считаем теперь, что ансамбль траекторий выбран, например, способом, о котором рассказано выше. Заметим, что переход к ансамблю не означает добавления какого-либо внешнего случайного механизма к детерминированной динамике. Это всего лишь способ оценки, своеобразный выбор единицы измерения, чтобы можно было количественно определить запас траекторий с теми или иными свойствами. Теперь более определенно сформулируем те статистические свойства, которые мы хотим извлечь из свойств динамики.

### КАКИЕ СТАТИСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ИССЛЕДУЮТ У НЕУСТОЙЧИВЫХ СИСТЕМ?

**Существование и свойства временных средних.** Уже говорилось, что в приложениях теории вероятностей истинные значения вероятностей определяются на основании статистических наблюдений тех или иных частот. Существование пределов этих частот есть следствие одного из основных законов теории вероятностей — закона больших чисел. Он выполняется в условиях определенной независимости результатов отдельных статистических наблюдений.

В случае динамических систем вместо рядов статистических наблюдений естественно рассматривать средние по времени характеристики траекторий динамической системы, например доли времени, проводимую отрезком траектории длины

$T$  в фиксированной заранее ячейке фазового пространства. Ансамбль называется эргодическим, если для любой ячейки и для типичных траекторий, во-первых, существует предел при  $T \rightarrow \infty$  доли времени, проводимого отрезком траектории в ячейке, и, во-вторых, этот предел одинаков для всех типичных траекторий.

Для консервативных динамических систем классической механики, для которых справедлив закон сохранения энергии, существование пределов временных средних вытекает из общих утверждений эргодической теории. Поэтому нетривиален лишь вопрос о независимости этих средних от траектории. В литературе он фигурирует под названием «эргодической гипотезы» и восходит к Л. Больцману. В случае странных аттракторов проблемы существования и исследования временных средних далеко не тривиальны и связаны с вопросом о структуре естественных распределений вероятностей на аттракторах.

### Флуктуации временных средних.

В классической теории вероятностей наряду с законом больших чисел постоянно встречается гауссовский закон распределения для отклонения частоты от вероятности. Распределение этих отклонений можно изучать и в случае динамических систем. Считая, что эргодичность ансамбля установлена, рассмотрим какую-либо функцию  $f$  на фазовом пространстве, ее временное среднее  $1/T \int_0^T f(x_s) ds$  и ее предел

$\bar{f} = \lim_{T \rightarrow \infty} 1/T \int_0^T f(x_s) ds$ . Здесь через  $x_s$  обозначено положение движущейся точки в момент времени  $s$ . Разность между ними, представляющая собой флуктуацию временного среднего, стремится к нулю при  $T \rightarrow \infty$ . Для многих классов неустойчивых динамических систем оказывается, что она стремится к нулю как  $1/T$ . Поэтому естественно рассмотреть нормированную раз-

ность  $\sqrt{T} (1/T \int_0^T f(x_s) ds - \bar{f})$ . Если вероятность того, что нормированная разность заключена между  $a$  и  $b$ , стремится для любых  $a, b$

к пределу, равному  $1/\sqrt{2\pi} \int_a^b e^{-u^2/2} du$ , при

$T \rightarrow \infty$ , то фактически перед нами вероятность, вычисляемая с помощью классического распределения Гаусса. Поэтому в данном случае мы будем говорить, что эта разность подчиняется при  $T \rightarrow \infty$  распреде-



лению вероятностей Гаусса. Фигурирующее в последнем соотношении число  $\sigma$  зависит от функции  $f$  и от ансамбля.

Задача, таким образом, состоит в том, чтобы для данной динамической системы и широкого класса функций  $f$  показать, что флуктуации временных средних при  $T \rightarrow \infty$  подчиняются распределению Гаусса.

## ВРЕМЕННЫЕ КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ ФУНКЦИИ И ИХ ПОВЕДЕНИЕ

Рассмотрим опять функцию на фазовом пространстве  $f$ . Допустим, что мы показали, что ансамбль эргодичен и функция  $f$  такова, что  $\bar{f} = 0$ . Временной корреляционной функцией называется предел

$$b(t) = \lim_{T \rightarrow \infty} 1/T \int_0^T f(x_{t+s}) f(x_s) ds.$$

Имеется много проблем, для которых важно знать характер поведения  $b(t)$  при  $t \rightarrow \infty$ . Если  $b(t) \rightarrow 0$  при  $t \rightarrow \infty$  для любых ограниченных  $f$ , то динамическая система называется перемешивающейся. В задачах неравновесной статистической механики скорость убывания  $b(t)$  при  $t \rightarrow \infty$  тесно связана с определением коэффициентов переноса, таких как коэффициент вязкости, теплопроводности и т. п. Присутствие у  $b(t)$  периодической или почти периодической компоненты означает наличие в системе периодических или почти периодических движений.

В моделях теории вероятностей быстрое (экспоненциальное) убывание временных корреляционных функций встречается в случае так называемых марковских цепей или процессов. В динамических системах для исследования скорости убывания  $b(t)$  приходится строить так называемые марковские аппроксимации динамической системы, о чем будет рассказано ниже.

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Исследование описанных выше свойств в случае неустойчивых динамических систем составляет содержание достаточно сложной математической теории. В рамках этой статьи ее можно описать лишь в самых общих чертах.

Первое сравнительно неожиданное и отнюдь не очевидное соображение со-

стоит в том, что в неустойчивых системах траектории распадаются на пучки из экспоненциально сближающихся траекторий при возрастании  $T$  до бесконечности и на пучки экспоненциально сближающихся траекторий при уменьшении  $T$  до минус бесконечности. Существование таких, асимптотических пучков оказывается прямым следствием неустойчивости движения, но даже в конкретных случаях, таких, например, как газ Лоренца, явный вид этих пучков не так легко найти.

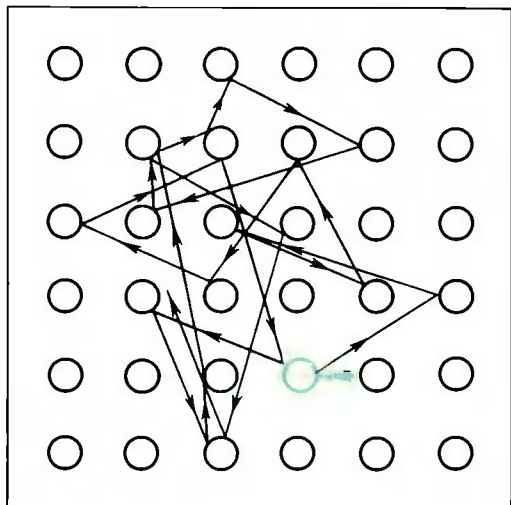
Пучки сходящихся при  $t \rightarrow \pm \infty$  траекторий хорошо известны в геометрии Лобачевского. На плоскости Лобачевского для любой прямой и точки, не лежащей на этой прямой, можно провести: прямые, пересекающие данную прямую; прямые, не пересекающие данной прямой и удаляющиеся от нее на бесконечности; две граничные прямые, асимптотически сближающиеся с данной прямой либо в одном, либо в другом направлении. Если через каждую точку плоскости Лобачевского провести граничную прямую, сближающуюся с данной прямой в определенном направлении, то мы получим интересный нас пучок асимптотических прямых. Кажущаяся необычность асимптотических пучков в неустойчивых системах связана с нашим «эвклидовым» способом мышления.

С помощью подобных асимптотических пучков строятся специальные разбиения фазового пространства, называемые марковскими разбиениями. При этом возникают совершенно новые неожиданные связи с равновесной статистической механикой.

В равновесной статистической механике рассматриваются находящиеся в больших объемах системы из большого числа частиц, распределение вероятностей которых, так называемое равновесное распределение Гиббса, определяется функцией Гамильтона системы. Связь со статистической механикой проявляется, если чисто формально большой параметр в динамических системах — время — рассматривать как параметр объема. Тогда пространство отрезков траекторий динамической системы представится как фазовое пространство некоторой системы статистической механики. При этом распределение вероятностей ансамбля траекторий перейдет в равновесное распределение Гиббса с функцией Гамильтона, строящейся с помощью динамических характеристик системы.

Приведем один результат, полученный недавно с помощью описанных

методов. Вернемся снова к газу Лоренца и допустим, что конфигурация рассеивателей периодична. Выбрав произвольный момент времени  $T$ , произведем преобразование подобия пространства с коэффициентом  $1/\sqrt{T}$  и преобразование подобия оси времени с коэффициентом  $1/T$ . Иными словами, единицу длины увеличим в  $\sqrt{T}$  раз, а единицу времени увеличим в  $T$  раз. После преобразования при больших  $T$  траектория молекулы газа Лоренца будет состоять из ломаных длиной  $\sim 1/\sqrt{T}$  и бу-



Длинный отрезок траектории точки газа Лоренца (начало траектории показано цветом). Это сложная зигзагообразная кривая, напоминающая траекторию броуновской частицы. В отличие от обычного броуновского движения тяжелой частицы под действием большого числа столкновений с легкими частицами, в газе Лоренца по законам броуновского движения движется легкая частица, отражающаяся от тяжелых частиц. Такое движение возникает вследствие неустойчивости.

дет иметь весьма сложный и запутанный вид, напоминающий траекторию броуновской частицы. Оказывается, что это не только аналогия. Упомянутый выше результат состоит в том, что если задать плотность распределения вероятностей  $p(q_0, v_0)$  для начальных координат и скоростей движущейся точки, то после описанных преобразований масштаба при  $T \rightarrow \infty$  распределения вероятностей для координат в любой момент времени будут сходиться к распределению вероятностей для броуновской частицы.

Обычное броуновское движение есть

движение тяжелой частицы под действием большого числа столкновений с легкими частицами. В газе Лоренца движется одна легкая частица, отражающаяся от неподвижных тяжелых частиц. При больших  $T$  движение выглядит как хаотическое броуновское именно ввиду неустойчивости движения. Описанный результат показывает также, каким образом непосредственно из уравнений механики, обратимых во времени, можно вывести необратимые уравнения механики сплошной среды, в данном случае уравнение диффузии.

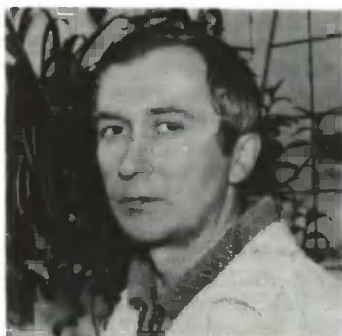
Неустойчивость динамических систем обладает замечательным свойством устойчивости по отношению к малым возмущениям. Представим себе, что к правым частям уравнений движения системы добавляется малый шум произвольной природы. Вполне могло быть так, что такой шум полностью исказит статистические свойства траекторий. Оказывается, что этого не происходит. Дело в том, что в неустойчивых системах столь много разнообразных траекторий, что если к детерминированной траектории добавить малое возмущение, то возмущенная траектория все равно достаточно большое время будет находиться вблизи некоторой другой траектории исходной невозмущенной динамической системы. Время, которое эти траектории будут близки друг к другу, достаточно велико, чтобы успели установиться статистические характеристики. Таким образом, оказывается, что случайность неустойчивой динамической системы не разрушается при действии малых «случайных» неконтролируемых шумов.

Заметим, что розыгрыш «Спортлото» происходит действительно с использованием неустойчивой динамической системы и поэтому является одним из самых «случайных».

Непосредственный вывод из сказанного состоит в том, что для применимости законов теории вероятностей вовсе не обязательно иметь дополнительный внешний случайный механизм. Статистические закономерности оказываются часто результатом проявления определенных свойств детерминированной динамики. Одним из таких свойств является свойство неустойчивости движения. Чем движение неустойчивее, тем устойчивее проявляются в ней статистические закономерности. Неустойчивость неслучайной динамики ведет к случайности.

## Микробные препараты в борьбе с мышевидными грызунами

В. В. Семаков



Вячеслав Васильевич Семаков, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории микробиологии и патологии грызунов и насекомых Всесоюзного научно-исследовательского института сельскохозяйственной микробиологии (ВНИИСХМ). Область научных интересов — поиск новых микроорганизмов, обладающих отпугивающим и тормозящим действием на грызунов и насекомых.

Одна из особенностей мышевидных грызунов — их удивительная способность быстро размножаться. Подсчитано, например, что пара мышей или серых крыс в течение года может дать до 800 и более особей. Такая плодовитость создает постоянную угрозу очагов их массового размножения, что вполне сравнимо со стихийным бедствием. Ведь, как известно, мышевидные грызуны не только уничтожают и портят громадное количество продуктов, но и наносят существенный ущерб зданиям и промышленному оборудованию. Кроме того, они распространяют многие опасные для человека и домашних животных инфекции.

Человечество издревле пыталось бороться с нашествиями грызунов. Тем не менее успехи этой борьбы в определенном отношении и до сих пор весьма далеки от радикального решения. Как писал известный эколог Ч. Элтон, «в борьбе против размножившихся грызунов применялись любые средства, будь то золотые мышки, приносимые в жертву многоликому богу Аполлону, различного рода ловушки, парламентские или иные комиссии, ядохимикаты и многое другое...»

Один из наиболее перспективных способов защиты сельскохозяйственных растений и продуктов их переработки от

вредных животных — использовать их естественных врагов. Живое против живого — в интересах человечества, — вот сущность биологического метода борьбы с вредителями сельского хозяйства.

Бактериальные препараты против грызунов начали применять еще в конце прошлого века. Пионером этого направления по праву считают И. И. Мечникова, который в 1888 г. предложил использовать возбудителя холеры кур (*Vacterium bipolaris avisepiticum*) для борьбы с сусликами, заполонившими юго-западную часть Украины. Предложение было поддержано Н. Ф. Гамалеей, который в том же году экспериментально доказал эффективность этого возбудителя для снижения численности сусликов в полевых условиях. После ряда успешных экспериментов, Мечников написал письмо Луи Пастеру с просьбой дать оценку полученным результатам. В ответном письме известный микробиолог одобрил работы Мечникова и Гамалеи и сообщил, что он также установил патогенность данного возбудителя и для кроликов. По его просьбе, в провинции Шампань П. Лоар испытал на площади 8 га культуру холеры кур против скопления диких кроликов, в результате чего на обработанной территории не осталось ни одного грызуна.



Бактерия Исаченко [увел. в 200 тыс. раз]

Казалось, был найден эффективный способ борьбы с грызунами. К сожалению, помимо кроликов и сусликов возбудитель вызывал заболевание и у полезных животных. Поэтому в дальнейшем работы в этом направлении были приостановлены и вскоре полностью прекращены.

В 1892 г. в Грейфсвальском институте гигиены (Германия) Ф. Леффлер выделил бактерию пситтакоза мышей — *Bact. typhi murgium*.

Опустошительные эпизоотии, в которые иногда переходил пситтакоз мышей, привел Леффлера к мысли использовать возбудителя и для истребления грызунов. Он предложил пропитывать культуральной жидкостью этой бактерии различные пищевые приманки. После первой удачной попытки в 1892 г. этот способ широко применялся для уничтожения полевых мышей в Германии в течении ряда лет.

Но в конце 1892 г. в Копенгагене стали выпускать новый бактериальный препарат, более удобный в обращении и дешевый. Основу его составляла бактерия *Bact. enteritidis ratin*, открытая французским микробиологом Ж. Даничем во время эпизоотии полевых и лесных мышей в 1890 г.

В 1893 г. во время вспышки массового размножения сусликов в Самарской губернии русский микробиолог С. С. Мережковский выделил патогенную для данных грызунов бактерию — *Bact. typhi spermophilorum*. На следующий год этот возбудитель использовали в Херсонской губернии для уничтожения сусликов в полевых условиях. Грызуны погибали уже на вторые сутки после применения возбудителя. Общая смертность от бактериального препарата составляла от 75 до 95%, в зависимости от плотности скопления вредителей на том или ином участке.

Выделенная Мережковским бактерия оказалась патогенной не только для сусликов, но и для мышей, полевок и серых хомячков. Возбудителя стали использовать для дератизации как внутри страны, так и за ее пределами. Высокую оценку культуре дал японский микробиолог Т. Козаи, испытывавший ее в 1901 г. против полевок в окрестностях Токио.

Мережковский не только экспериментально доказал безопасность открытой им бактерии для домашних животных и человека, но и участвовал в разработке метода массового изготовления и применения микробных препаратов, используемых в дератизации.

После Мережковского работу продолжили его бывшие сотрудники — Б. Л. Исаченко и Г. С. Кулеша. В 1897 г. во время эпизоотии серых крыс в Петербурге Исаченко выделил бактерию *Bact. decumanapidum*, оказавшуюся патогенной не только для крыс, но и для некоторых видов мышей.

В 1899 г. Исаченко бесплатно разослал полученную им культуру бактерии в различные губернии России для борьбы с мышевидными грызунами. В том же году, по просьбе Данича, он отправил свою культуру и во Францию, так как она оказалась более вирулентной для крыс, чем культура Данича.

Тем не менее бактериальные препараты в различных странах внедрялись довольно медленно. Одна из причин — определенная путаница в классификации бактерий, существовавшая в то время. Поскольку отдельные виды рода *Salmonella* вызывают заболевания у людей, то все препараты, изготавливаемые из бактерий этой группы, были причислены медиками к потенциально опасным, а применение бактериальных препаратов постоянно лимитировалось всевозможными постановлениями и распоряжениями.

По данным Л. Тэйлора<sup>1</sup>, препараты из бактерии Данича были запрещены в Англии лишь из-за того, что у 413 пациентов, обследовавшихся в различных клиниках в период с 1944 по 1955 гг., был обнаружен этот возбудитель. И хотя бактерии не вызвали никаких патологических изменений, препараты все же были сняты с производства.

В нашей стране культуру бактерии Данича применяли только в рамках эксперимента, хотя и значительного по своим масштабам. Основная же масса изготавливаемых препаратов приходилась на долю бактерии Мережковского, а позже — бактерии Исаченко. В последнее время для изготовления бактериальных препаратов используют исключительно бактерию Исаченко, которая ни разу не была зарегистрирована в качестве возбудителя болезни человека.

Не совсем правомерны, по-видимому, и нарекания в адрес бактерии Данича. Так, И. А. Антоновский<sup>2</sup> приводит интересные данные о попадании культуры бактерии Данича в организм людей: в одном случае по ошибке, вместо пива, был выпит один литр культуры, а в другом — поллитра. В обоих случаях заболевания не наблюдалось. Во Франции бактериальные препараты для борьбы с грызунами применяют с 1904 г. Ежегодно сотни литров культуры бактерии Данича изготавливаются в государственных и в частных лабораториях. До сих пор не отмечено какого-либо вредного воздействия препаратов на людей и полезных животных.

В России бактериальные препараты внедрялись планомерно. С 1893 г. бактериологическая лаборатория Министерства земледелия для популяризации нового метода борьбы с грызунами изготавливала и бесплатно рассылала культуру бактерии Мережковского всем заинтересованным лицам. Культуры рассылали не в пробирках, как раньше, а в сосудах емкостью до 1,5 л. В то время это было своеобразным новшеством, отличающим отечественное производство бактериальных препаратов от зарубежного. Культуры готовили очень тщательно и, кроме того, перед отправкой проверяли вирулентность каждой партии.

Архивные документы свидетельствуют, что за 8 лет (1896—1903) лаборато-

рия отправила потребителям около 4 тыс. посылок с культурой бактерии Мережковского. Поскольку спрос на культуру непрерывно возрастал, то с 1910 г. лаборатория стала рассылать посевной материал, из которого на местах изготавливали культуру препаратов.

После Октябрьской Социалистической революции бактериологическая лаборатория Министерства земледелия была преобразована во Всесоюзный научно-исследовательский институт сельскохозяйственной микробиологии (ВНИИСХМ). Перед сотрудниками Института открылись широкие возможности для дальнейших исследований и разработок по применению микробных препаратов для борьбы с вредными грызунами. В результате проведенных работ эффективность бактериальных препаратов заметно возросла и к началу 30-х годов достигла уровня 90—100%.

Большую помощь в развитии микробиологического метода борьбы с мышевидными грызунами оказала созданная в 1938 г. специализированная ветеринарная секция ВАСХНИЛ. Секция не только давала рекомендации по использованию патогенных бактерий в сельскохозяйственном производстве, но и наметила конкретные пути расширенных исследований в этом направлении.

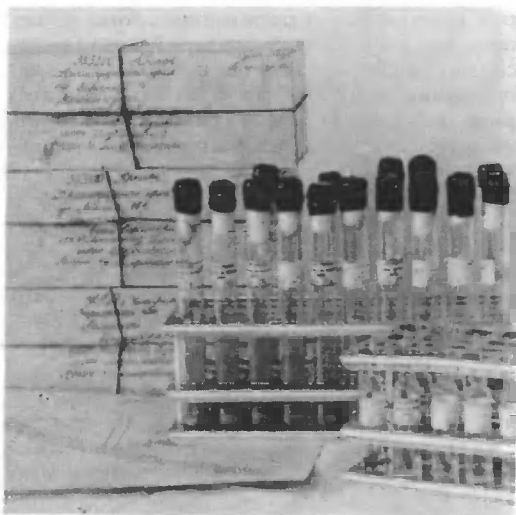
Сотрудники нашего института экспериментально доказали, что зерна злаков могут служить хорошей питательной средой для родентопатогенных микробов (от лат. *Rodentia* — грызун). Микробные препараты, приготовленные на зернах пшеницы, выгодно отличались от аналогичных препаратов, полученных на какой-либо другой среде. Каждое зерно содержало большую концентрацию патогенных бактерий (до 8 млрд/г) и было удобной прианкой.

Разработанные лабораторией препараты на твердых питательных средах (зерновой и аминокостный бактороденцид) получили высокую оценку у производителей и в настоящее время широко применяются в большинстве областей Российской Федерации, а также Грузинской и Литовской ССР. Общая площадь применения бактороденцида в 1979 г. составила свыше 3 млн га.

Возросшая потребность в микробных препаратах для борьбы с вредными грызунами вызвала расширение сети лабораторий, занимающихся их изготовлением. Сейчас в стране насчитывается около 200 ветеринарно-бактериологических

<sup>1</sup> Taylor L. "Lancet", 1956, № 1, p. 48.

<sup>2</sup> Антоновский А. И. «Труды ВНИИСХМ», 1936, т. VIII, вып. 1.



Посылки с культурой бактерий Исаченко.

лабораторий по выращиванию родентопатогенных микробов. Появились и отдельные цеха, изготавливающие готовые препараты в заводских условиях.

Ежегодно ВНИИСХМ рассылает в различные концы страны несколько сотен посылок с культурами бактерии Исаченко. Институт проводит большую работу по отбору наиболее вирулентных штаммов бактерий, используемых для изготовления бактороденцида и оптимальных способов хранения патогенных культур в лабораторных условиях и в готовых препаратах. Было установлено, что срок годности зернового бактороденцида, хранящегося при температуре 1—15°C, составляет 90 дней. При хранении же препарата в замороженном состоянии этот срок удлиняется до года.

В настоящее время микробиологический метод борьбы с грызунами применяется, в основном, в двух странах — СССР и Франции и значительно меньше в Бельгии, Голландии, Люксембурге и Швейцарии. Эти государства, как правило, покупают готовые препараты во Франции. В других странах более развита химическая, нежели микробиологическая промышленность. Там, в основном, используют яды.

В последние годы определенный интерес к микробным препаратам от мышевидных грызунов начали проявлять и некоторые страны социалистического содружества. Так, в 1975 г. бактороденцид

успешно прошел испытание на территории Монгольской Народной Республики, а в 1977 г. по просьбе Института зоологии Кубинской Академии наук культура бактерии Исаченко была отправлена в Гавану.

Большие перспективы в области дальнейшего совершенствования микробиологического метода борьбы с грызунами открывает выявление новых микроорганизмов, способных вызывать эпизоотии среди тех вредителей, против которых еще нет эффективных микробных препаратов (полевая и желтогорлая мыши, лесная соня, некоторые виды хомяков). По мнению Н. В. Кандыбина, наиболее перспективными в этом отношении являются такие микроорганизмы, которые можно применять в осенне-зимний период<sup>3</sup>. Именно в это время грызуны в большом количестве концентрируются в определенных местах, что значительно увеличивает частоту контактов, способных вызвать эпизоотию.

Помимо усовершенствования существующих микробных препаратов для борьбы с вредными грызунами, во ВНИИСХМ ведутся разработки по использованию микроорганизмов и их метаболитов в качестве отпугивающих средств (репеллентов) по отношению к той или иной видовой группе животных. Известно, например, что не всегда полное уничтожение грызунов на той или иной территории способствует снижению их численности в последующие годы.

Так, сотрудники Московского университета показали, что численность большой песчанки резко возросла после полного ее уничтожения ядохимикатами. По данным Д. Дэйвиса<sup>4</sup> крысы, оставшиеся без корма в одном из кварталов Нью-Йорка ушли с данной территории и не появлялись там в течение 3,5 лет. Поэтому лучше не уничтожать животных, а лишать их источников пищи, к чему и приводит применение репеллентов.

В литературе встречаются лишь отдельные данные относительно использования микроорганизмов в качестве отпугивающих средств для грызунов. По мнению американских ученых Е. Биляка и Д. Ди-Вайта, наиболее перспективно в этом направлении — изучение лучистых грибов актиномицетов. В США удалось получить

<sup>3</sup>Кандыбин Н. В. Микробиологический метод борьбы с грызунами. М., 1974.

<sup>4</sup>Дэйвис Д. Э. Стратегия борьбы с грызунами. — В сб.: Стратегия борьбы с вредителями, болезнями и сорняками в будущем. М., 1977.

антибиотик актидион — продукт жизнедеятельности гриба *Streptomyces griseus*. Он обладает сильным репеллентным действием по отношению к крысам и другим грызунам. Аналогичный антибиотик под названием нарамицин запатентован и в Японии. Репеллентное действие проявляется в ничтожно малых концентрациях — от 0,01 до 0,005%.

В настоящее время применение актидиона и нарамицина в практике защиты растений весьма ограничено, поскольку они обладают высокой токсичностью для человека и полезных животных.

В лаборатории микробиологии и патологии грызунов и насекомых ВНИИСХМ выявлен ряд актиномицетов и других грибов, в той или иной степени обладающих репеллентным действием по отношению к обыкновенной полевке. Было установлено, что отпугивающим свойством обладают не только культуральные жидкости микроорганизмов, но и хлороформенные экстракты этих жидкостей. Всего из 259 испытанных культур 23 обладают свойствами репеллентного действия на обыкновенную полевку.

Большие перспективы в создании репеллентов микробного происхождения открывает изучение метаболитов микроскопических водорослей. Среди органических соединений, образуемых водорослями в процессе жизнедеятельности и выделяемых в окружающую среду, достаточно много веществ, содержащих серу, изопропилмеркаптан и сероводород, которые сами по себе являются репеллентами для многих грызунов.

К экзогенным метаболитам микроскопических водорослей с большой биологической активностью относятся летучие соединения и эфирные масла, которые также обладают отпугивающими свойствами. Количественные соотношения этих компонентов зависят от физиологического состояния клеток-продуцентов и способа выделения полученных соединений.

В настоящее время во ВНИИСХМ совместно с Институтом гидробиологии АН УССР разработан первый отечественный репеллент микробного происхождения, основу которого составляют микроскопические водоросли. Уже первые производственные испытания его в условиях Молдавской ССР показали, что репеллент с успехом может быть использован для защиты садов не только от мышевидных грызунов, но и от зайцев, борьба с которыми с помощью химических средств мало пригодна.

Весьма перспективными микроорганизмами в деле создания репеллентных препаратов микробного происхождения могут оказаться представители и таких широко известных групп, как плесневые грибы, дрожжи и душистые бактерии. Ароматообразующие микробы встречаются практически повсеместно и уже сейчас находят широкое применение в виноделии, сыроварении и молочно-кислом производстве для придания продукции всевозможных запахов. Отходы этого производства могут стать хорошей основой для получения репеллентов.

Пока еще рано говорить, смогут ли репелленты в будущем заменить препараты истребительного действия. На сегодня ясно только одно, что в агробиоценозах вредные виды животных являются наиболее массовыми потому, что однородный растительный покров создает идеальные условия не только для полифагов, но и монофагов, процветание которых в дикой природе исключено из-за чрезмерных трудностей в поисках пищи. Поэтому, уничтожая вредителей, мы тем самым нарушаем сложившиеся биоценотические связи, что может привести к весьма тяжелым последствиям. Исчезнут хищные звери и птицы, и грызунов будет еще больше.

Возможно, что со временем удастся разработать такую систему защиты растений, которая позволила бы отказаться от уничтожения грызунов в природе. Это, несомненно, положительно сказалось бы на численности степных хорьков, лисок, лисиц и других хищных зверей, а также птиц, популяции которых заметно поредели в последнее время из-за отсутствия корма — тех же грызунов.

Мир микробов исключительно многообразен и таит в себе огромное количество еще не открытых особенностей и свойств. Поэтому одной из задач микробиологического метода защиты растений от вредных грызунов следует считать раскрытие этих особенностей и разработку рациональных приемов по их использованию в сельскохозяйственном производстве.

## Роль растительности в миграции минеральных веществ в атмосферу

Л. Г. Бондарев



Лев Георгиевич Бондарев, кандидат географических наук, старший научный сотрудник кафедры палеогеографии и общего землеведения Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова. Специалист в области геохимии и планетарной денудации. Автор многих научных и популярных работ, в том числе книги: Вечное движение. Планетарное перемещение вещества и человек. М.: Мысль, 1974.

В атмосфере постоянно находятся минеральные частицы различного происхождения. Непрерывно идет дождь космической пыли. Вулканический пепел при извержениях взрывного типа выбрасывается на высоту до 15—20 км. На тысячи километров разносится пыль, поднятая ветром в пустынях. При штормах ветер срывает с гребней волн водяную пыль, после испарения которой в воздухе остается множество мельчайших кристалликов. Вносит свою лепту и производственная деятельность человека — дым, индустриальная пыль, выхлопы транспорта и т. п.

Издавна справедливо считали, что растительность защищает почву от выдувания и уменьшает поступление твердых частиц в атмосферу. Хорошо известно, к каким последствиям приводит уничтожение естественной растительности при земледелии и чрезмерном пастбищном скотоводстве. Однако в последнее время появились материалы, свидетельствующие о том, что растения не только сдерживают миграцию частиц в атмосферу, но и сами постоянно выбрасывают в воздух массу мельчайших твердых частиц и, таким образом, активно способствуют миграции минеральных веществ через атмосферу. Как же это происходит?

### РАСТЕНИЕ — ФАБРИКА ЯДЕР КОНДЕНСАЦИИ

Растительный покров земного шара пропускает через себя огромное количество воды. Величина глобальной транспирации оценивается в 30—35 тыс. км<sup>3</sup> /год, что лишь немногим меньше суммарного речного стока с материков в Мировой океан, составляющего около 37 тыс. км<sup>3</sup> /год<sup>1</sup>. При этом пары воды, выделяемые растениями в атмосферу, содержат частицы солей диаметром 10<sup>-8</sup> см. При лабораторных экспериментах и опытах, поставленных в поле, когда транспирируемая влага конденсировалась в условиях, исключающих ее загрязнение, обнаружилось, что вода, испаряемая пшеницей, сахарной свеклой, картофелем, кукурузой, мятой, клевером, лебедой, польнью и др. растениями, содержит ионы хлора, сульфата аммония, калия, натрия, кальция, магния и др. Вычислено, что для разнотравья средняя минерализация транспирированной влаги составляет 40 мг/л.

При «производстве» растениями углеродов из углекислоты и воды требуется

<sup>1</sup>Львович М. И. Мировые водные ресурсы и их будущее. М.: Мысль, 1974.



много воды — на каждую тонну прироста сухой фитомассы в среднем около 500 т транспирированной влаги. Но над большими массивами сплошного растительного покрова может ощущаться недостаток ядер конденсации, поскольку естественная местная запыленность здесь невелика. Выделяемые же в атмосферу фитогенные аэрозоли восполняют этот недостаток. Таким образом, растительность стимулирует выпадение атмосферных осадков.

Казахстанские биологи У. М. Ахмедсафин, П. Г. Гребенюков и В. Н. Иванов сопоставили химический состав атмосферных осадков и транспирационной воды и обнаружили большое сходство между ними<sup>2</sup>. Отношение суммы ионов натрия, калия и хлора к общей минерализации составляет для транспирационной воды 0,21, а для атмосферных осадков, выпадающих над материками, лежит в пределах 0,16—0,23. Видимо, химический состав осадков внутри-материковых районов в значительной степени определяется биогенными аэрозолями, выделяемыми растениями.

Какое же количество минеральных веществ вовлекается в атмосферный перенос при транспирации? Если считать, что средняя минерализация выделяемой растением воды равна около 40 мг/л, то при транспирации в глобальных масштабах в атмосферу, по моим подсчетам, выносятся в течение года около 1,2—1,4 млрд т минеральных веществ.

Эта величина превышает поступление солей с океанов на сушу, которое оценивается в 300—500 млн т/год<sup>3</sup> и составляет около половины от стока растворенных минеральных веществ в Мировой океан, равного 2,5 млрд т/год<sup>4</sup>.

В пределах СССР на транспирацию расходуется 3500 км<sup>3</sup> воды<sup>5</sup>, следовательно, в атмосферу должно ежегодно поступать до 140 млн т солей. Для сравнения укажем, что полный ионный сток с территории СССР равен 514 млн т/год<sup>6</sup>.

## СПОСОБ ИЗБАВЛЕНИЯ ОТ ТОКСИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ?

При изучении химического состава транспирированной влаги выяснилось, что в атмосферу выделяются не только подвижные мигранты — хлор, натрий, калий, но и тяжелые металлы — цинк, свинец и ртуть. При этом величина выноса этих металлов хорошо коррелируется с их содержанием в почве и растениях.

В районах рудных полей, при аномально высоких концентрациях металлов в почве, их концентрация в фитогенных аэрозолях значительно возрастает. Не удивительно, что осадки, выпадающие в таких местах, характеризуются более высоким уровнем содержания микроэлементов. В Приморье, например, содержание металлов в дождевой воде, выпадающей над сульфидными месторождениями, бывает в 2—4 раза больше, чем в осадках вне рудного поля<sup>7</sup>.

Видимо, можно рассматривать выделение некоторых токсичных элементов при транспирации как своеобразную форму избавления от них, как регулирование содержания микроэлементов в растении.

В связи с этим уместно процитировать известного советского геохимика В. В. Ковальского: «Растения могут не накапливать элемент в больших количествах в силу своей физиологической природы, т. е. оказываться индифферентными, несмотря на присутствие или даже избыток его в среде. Примером могут служить злаки, не концентрирующие многие химические элементы»<sup>8</sup>. Действительно, злаки не концентрируют бор, молибден, никель, кобальт; дуб, граб, калина — молибден. Почему так происходит? Ставят ли растения «щит» на пути этих элементов или, может быть, у них выработался механизм «транзитного» пропуска тех или иных микроэлементов? Имеются факты, свидетельствующие в пользу второй точки зрения. Так, на Гавайях, где почвы в окрестностях вулканов отличаются высоким содержанием ртути (в течение года ее поступает до 300 кг на квадратный километр), растения выделяют поглощаемую ртуть в атмосферу, избавляясь от токсичного металла<sup>9</sup>.

<sup>2</sup> Ахмедсафин У. М., Гребенюков П. Г., Иванов В. Н. Вестник АН КазССР, 1978, № 3, с. 49.

<sup>3</sup> А лекин О. А. Химия океана. Л.: Гидрометеоиздат, 1966; Бруевич С. В., Кулик Е. Э. Океанология, 1967, № 3, с. 363.

<sup>4</sup> А лекин О. А., Бражникова Л. В. Вынос растворенных веществ с земной поверхности. — В сб.: Современные осадки морей и океанов. М.: Наука, 1961.

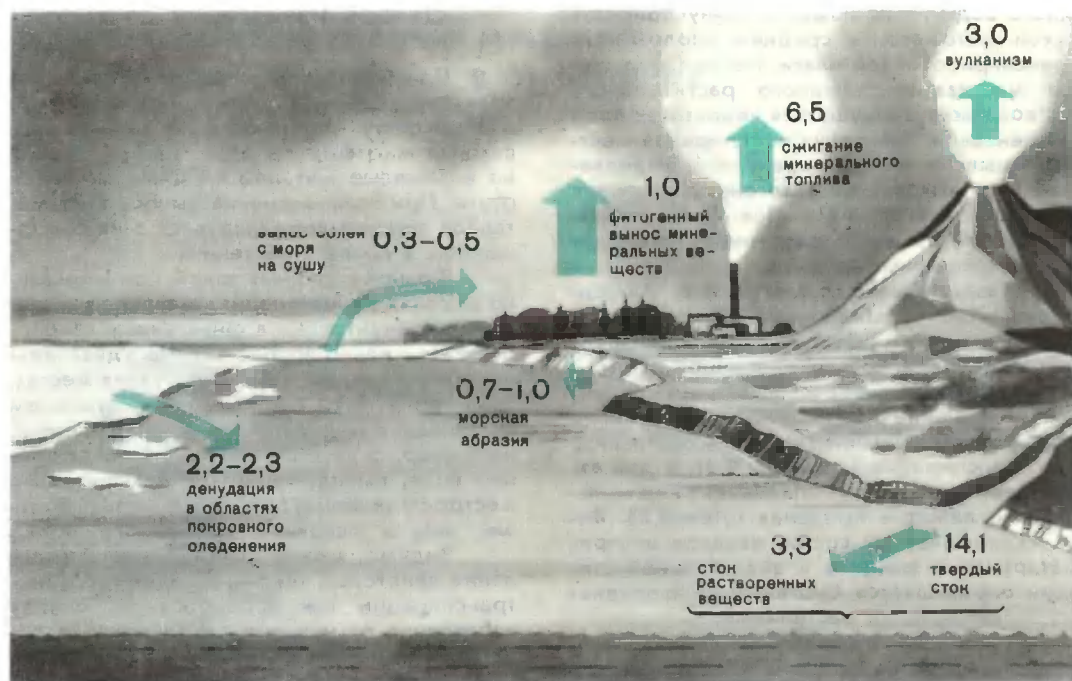
<sup>5</sup> Шубаев Л. П. Общее землеведение. М.: Высшая школа, 1977.

<sup>6</sup> З в е р е в В. П. О составляющих ионного стока с территории СССР. — В кн.: Гидрохимические материалы, т. 56. М.—Л.: Изд-во АН СССР, 1971.

<sup>7</sup> Колотов Б. А., Киселева Е. А., Рубейкин В. З. Геохимия, 1965, № 5, с. 878.

<sup>8</sup> К о в а л ь с к и й В. В. Геохимическая экология. М.: Наука, 1974.

<sup>9</sup> Siegel S. M., Siegel B. Z. Water Air and Soil Pollution, 1978, v. 9, № 1, p. 113.



Вынос минеральных веществ в атмосферу в сравнении с некоторыми другими потоками веществ [млрд т]. Растительность поставляет в атмосферу около 1 млрд т минеральных веществ в год.

### МИКРОЭЛЕМЕНТЫ РАСПРОСТРАНЯЮТСЯ ВМЕСТЕ С ЗАПАХАМИ

Общее свойство всего растительного мира — выделение фитонцидов — летучих органических соединений. Фитонциды — своеобразное химическое оружие против болезнетворных бактерий, грибов и т. п. Гектар лиственного леса продуцирует в среднем около 2 кг летучих соединений в сутки. Гораздо продуктивнее хвойные породы — в них на один гектар приходится от 4 до 30 кг фитонцидов (последняя цифра относится к можжевельнику). Летучие выделения хвойных деревьев, создающие характерный смолистый запах, относятся к так называемым терпенам. При фотохимических реакциях образуются частицы диаметром менее  $10^{-5}$  см, которые затем объединяются в более крупные, размером до  $5 \cdot 10^{-4}$  см. Они-то и являются причиной специфической голубоватой дымки, столь характерной для больших массивов хвойных лесов.

По некоторым подсчетам, ежегодное выделение в атмосферу летучих веществ фитогенного происхождения оценивается в 438 млн т<sup>10</sup>.

В свое время В. И. Вернадский высказал мысль, что летучие выделения растений, несомненно, должны играть роль в миграции микроэлементов. В 1921 г. он подготовил конспект доклада «О геологическом значении запахов», с которым собирався выступить на заседании Общества естествоиспытателей в Симферополе. Однако доклад не состоялся. Впоследствии Вернадский больше не возвращался к разработке поставленной проблемы. Конкретные исследования и публикации по этим вопросам появились много лет спустя.

Так, в работе американских геохимиков<sup>11</sup> было показано, что в летучих выделениях сосны, дугласии и ели присутствуют литий, бериллий, бор, натрий, магний, титан, ванадий, хром, марганец, железо, кобальт, никель, медь, цинк, мышьяк, стронций, цирконий, молибден, серебро, свинец,

<sup>10</sup>Rasmussen R. A., Went F. W. Proc. Nat. Acad. Sci. US. 1965, v. 53, p. 215.

<sup>11</sup>Curtin G. C., King H. D., Mosier E. L. J. of Geochem. Exploration, 1974, v. 3, № 3, p. 245.

висмут, кадмий, олово, сурьма, барий — всего 25 элементов. Образцы летучих выделений деревьев были собраны в горных лесах штатов Колорадо и Айдахо.

Зольный остаток терпенов в среднем составляет всего около 0,01 г на литр конденсата. Если воспользоваться данными Р. Расмуссена и Ф. Вента о количестве летучих соединений, продуцируемых в течение года, то оказывается, что в планетарном масштабе растения за год выбрасывают в атмосферу вместе с фитонцидами всего около 4,4 тыс. т минеральных веществ.

Ясно, что в общем потоке минеральных веществ, мигрирующих через атмосферу, эта величина пренебрежимо мала. Однако выделение терпенов играет определенную роль в балансе некоторых микроэлементов. Это относится прежде всего к литию. В Колорадо в ветвях и хвое дугласии, а также в почве под деревьями этот элемент или совсем не определен спектрографически, или уровень его содержания устанавливается на пределе чувствительности метода. Зато в золе летучих выделений дугласии он присутствует в количестве 0,9%. Создается впечатление, что это дерево собирает чрезвычайно рассеянный микроэлемент и тотчас, не концентрируя его в своих тканях, переводит транзитом в атмосферу (после выполнения какой-то функции?). Видимо, свойства самих терпенов связаны с присутствием лития.

Происходит также избирательное «перекачивание» в воздух натрия, молибдена и никеля. Их концентрация в золе летучих выделений во всех случаях на порядок выше, чем в золе пихты и органического вещества почвы. Оказалось, что более высокая концентрация в золе летучих выделений и у олова, кадмия, меди, цинка, висмута, хрома, серебра, магния и стронция. Таким образом, происходит избирательный вынос целой группы микроэлементов, которые затем мигрируют воздушным путем.

## СТО МИЛЛИАРДОВ ПУДОВ ПЫЛЬЦЫ И СПОР

Споры и цветочная пыльца имеют размеры 1—200 мкм (преимущественно — 25—30 мкм). Благодаря малой плотности они могут переноситься воздушными течениями на значительные расстояния. Так, дальность воздушного переноса пыльцы сосны, ели и кедра может составить около 1500 км. Возможен перенос пыльцы с одного континента на другой, например, вместе с африканской пылью через Атлантический

океан в Вест-Индию. В Атлантике к югу от экватора, на островах Кука и Тристан-да-Кунья, в современных пробах обнаружена пыльца эфедры, которая на этих островах не растет. Предполагают, что она занесена из Южной Америки. В таком случае дальность заноса составляет 4500 км.

Количество пыльцевых зерен, продуцируемых различными видами во время цветения, измеряется десятками и сотнями миллионов. Например, одна береза производит более 100 млн пылинки, по столько же — ель и дуб, сосна — более 350 млн. Растительность на площади в 1 км<sup>2</sup> производит в течение года 10<sup>14</sup> — 10<sup>15</sup> пыльцевых зерен. Средний вес пыльцевых зерен равен чаще всего 1 · 10<sup>-8</sup> — (1 ÷ 3) · 10<sup>-9</sup> г. Отсюда, общий вес пыльцы, приходящейся на 1 км<sup>2</sup>, равен от 1 до 30 т/год.

Если взять среднюю цифру — 15 т/год — и распространить ее на всю сушу, за вычетом площадей ледников, полярных и высокогорных субнивальных пустынь, аридных пустынь, скальных грунтов, прибрежных песков и внутриконтинентальных водоемов, то окажется, что весь растительный покров земного шара производит в течение года около 1,6 млрд т пыльцы. Цифра для сравнения: мировой урожай зерновых в 1980 г. составит, согласно прогнозу группы экспертов ООН во главе с американским экономистом В. Леонтьевым, 1,537 млрд т<sup>12</sup>, а общий объем вулканических выбросов оценивается в 2—3 млрд т/год. Считая, что зольность пыльцы равна средней зольности растений, т. е. 10%, мы приходим к выводу, что при рассеивании пыльцы и спор ежегодно вовлекается в атмосферную миграцию около 160 млн т минеральных веществ.

## ФИТОГЕННАЯ ДЕНУДАЦИЯ

Итак, при транспирации за счет выделения фитонцидов и путем рассеивания пыльцы и спор продуцируется значительная масса фитогенных аэрозолей. При этом в атмосферную миграцию, по самым осторожным оценкам, вовлекается около 1 млрд т минеральных веществ. Происходящий процесс можно охарактеризовать как фитогенную денудацию. Денудацией принято называть снос продуктов выветривания (от итал. *denudare* — обнажать).

Строго говоря, фитогенная денудация не ограничивается выделением растениями минеральных веществ в воздух и их

<sup>12</sup>Будущее мировой экономики. М.: Международные отношения, 1979.

последующим ветровым переносом. Денудационный эффект растительного покрова осуществляется также за счет растворяющего действия на подстилающую породу органических кислот, выделяемых корнями, выворачиванием грунта при падении деревьев («корневой снос»), механическим воздействием корней и т. п. Рассмотрение этих сторон фитогенной денудации не входит в задачу данной статьи.

Возможны случаи, когда величина денудации подстилающей поверхности за счет физиологической деятельности растений оказывается вполне сопоставимой с величиной денудации в обычном понимании. Рассмотрим сплошь залесенный водосбор в условиях умеренного пояса. Под пологом леса механический смыв совершенно отсутствует, происходит только вынос растворенных веществ. Величина последнего, например, для района Валдайского озера равна  $9,0—9,2$  т/км<sup>2</sup>, а для района Рыбинского водохранилища —  $12,4$  т/км<sup>2</sup>.

И на Валдае и по берегам Рыбинского водохранилища преобладают еловые леса, которые за год перекачивают в атмосферу 20-сантиметровый слой воды. Если принять ее среднюю минерализацию равной  $40$  мг/л, то вынос минеральных веществ в атмосферу за счет транспирации составит  $8,0$  т/км<sup>2</sup>.

Расход минеральных веществ при рассеивании пыльцы определен на основании следующих цифр: пыльцевая продуктивность ели обыкновенной равна  $5 \cdot 10^{14}$  зерен/км<sup>2</sup>, средний вес одного зерна —  $93,2 \cdot 10^{-9}$  г., зольность — 10%. Отсюда следует, что при рассеивании пыльцы с одного квадратного километра выносятся  $4,7$  т зольных элементов. Всего с фитогенными аэрозолями с квадратного километра площади мигрирует воздушным путем  $12,7$  т минеральных веществ, что несколько превышает величину ионного стока.

Совершенно очевидно, что, в соответствии с направлениями воздушных течений, в атмосфере существуют потоки веществ, выделяемых при физиологической деятельности растений. Иногда такое перемещение ощущается человеком. В интересной книге Дж. Бейкlessа «Америка глазами первооткрывателей» (рус. пер. — 1969 г.) сказано, что запах цветущих лесов в ту пору, когда они покрывали сплошными зарослями все атлантическое побережье нынешних Соединенных Штатов, ощущался в море за сотни миль от берега.

Вместе с фитогенными аэрозолями, равно как и с воздушными мигрантами иного происхождения (пыль, частицы морских

солей, вулканические газы и пепел, организмы, частицы космического происхождения и техногенные аэрозоли), непрерывно происходит перенос на дальние расстояния и рассеивание микроэлементов, благодаря чему они присутствуют всюду, хотя и в очень малых концентрациях, возникает, говоря словами В. И. Вернадского, «микрোকосмическая смесь».

Еще в 1955 г. А. И. Перельман писал, имея в виду выделение фитонцидов, что химический состав приземного слоя воздуха специфичен в каждом ландшафте. Состав фитогенных аэрозолей столь же разнообразен, как разнообразны ландшафты на земном шаре. Очевидно, что всякие антропогенные изменения естественной растительности (замена леса злаками или широколиственного леса — посадками ели) вносят изменения в очень тонкий механизм воздушной миграции микроэлементов.

Интересно, что все фитогенные аэрозоли, за исключением пыльцы и спор, обычно уступают в размерах абиогенным аэрозолям. Действительно, при транспирации в воздух выбрасываются частицы диаметром  $0,0001$  мкм. С другой стороны, самые мелкие терригенные частицы обычно имеют размеры более  $1$  мкм, самые тонкие частицы, увлекаемые в атмосферу с вулканическими газами, — около  $0,1$  мкм. Гораздо крупнее частицы пепла, выбрасываемые при взрывных извержениях. Кристаллики солей, попавшие в воздух при испарении поднятой ветром водяной пыли, имеют диаметр от  $0,14$  до  $20$  мкм и больше.

Фитогенные аэрозоли выходят за нижнюю границу спектра размеров аэрозольных частиц, которая принимается за  $0,005$  мкм. Частицы меньших размеров нестабильны, они характеризуются продолжительностью жизни, измеряемой немногими минутами в относительно чистом воздухе и секундами — в загрязненном воздухе.

В связи со сказанным нельзя не вспомнить слова В. И. Вернадского: «Живое вещество — самое могущественное из всех агентов распыления». Вернадский имел в виду «живую пыль» — микроорганизмы. «Жизнь при «распылении» вещества своим размножением достигает физической границы механического распыления», — пишет он далее. Материалы нашей статьи свидетельствуют о том, что жизнь способна дробить до физической границы механического распыления не только самое себя, но и минеральное вещество, ею захватываемое.

## Каналирование и электромагнитное излучение каналированных частиц

Н. П. Калашников



Николай Павлович Калашников, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физики Московского инженерно-физического института. Основные работы в области физики взаимодействия излучений с веществом. В последние годы занимается электромагнитными взаимодействиями заряженных частиц в монокристаллах и вопросами физики поверхности. Автор книг: Столкновения быстрых заряженных частиц в твердых телах (совместно с В. С. Ремизовичем и М. И. Рязановым). М.: Атомиздат, 1980; Когерентные взаимодействия заряженных частиц в монокристаллах. М.: Атомиздат, 1980.

### ЧТО ТАКОЕ КАНАЛИРОВАНИЕ?

Как известно, атомы образуют в кристаллах кристаллическую решетку. При этом между рядами атомов существуют открытые каналы. Самые широкие каналы находятся между наиболее плотно упакованными рядами.

При влете пучка заряженных частиц в монокристалл под малым углом к кристаллографической оси или плоскости наблюдается явление каналирования когда траектория положительно заряженной частицы, проходящей вблизи середины каналов вдоль осей монокристалла, может иметь некоторую устойчивость<sup>1</sup>. Если углы между направлением скорости частицы и кристаллографической плоскостью остаются малыми, то частица будет двигаться между двумя плоскостями, попеременно отражаясь от каждой из них. При этом частица совершает устойчивые колебания между двумя плоскостями (потенциальными барьерами), так что ее движение ограничено

в направлении, поперечном плоскостям. Если же угол между скоростью частицы и кристаллографической плоскостью превышает некоторый критический угол каналирования (о величине этого угла речь пойдет ниже), то энергия поперечного движения частицы оказывается больше потенциальной энергии барьера и частица может уйти из канала.

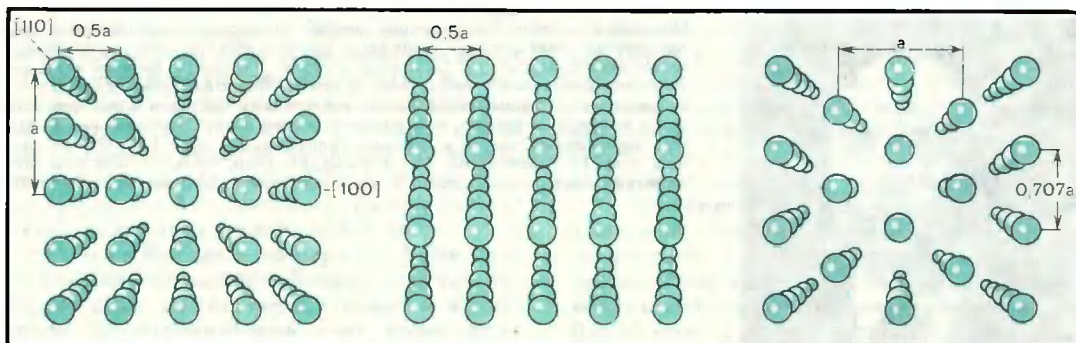
Отражение частицы от стенок канала (за счет кулоновского взаимодействия положительно заряженных ионов с атомными ядрами кристаллической решетки) при каналировании приводит к тому, что положительно заряженная частица большую часть пути проходит по междоузлиям, т. е. по областям кристалла с относительно малой электронной плотностью. Поэтому захват частицы в режим каналирования приводит к уменьшению ее ионизационных потерь и увеличению длины пробега в монокристалле. Существенно также, что траектория каналированной частицы гораздо ближе к прямой линии, чем траектория любой другой частицы, движущейся в кристалле по зигзагообразному пути. Другими словами, для положительно заряженных частиц в режиме каналирования существенно уменьшаются вероятности любых процессов с малыми прицельными параметрами относительно узлов кристаллической решетки. (Напомним, что прицель-

<sup>1</sup> Экспериментально проявление эффекта каналирования заключалось в аномально глубоком проникновении положительно заряженных частиц в глубь кристалла в случае, когда направление их скоростей совпадало или было близко к направлениям кристаллических каналов.

ным параметром называется наименьшее расстояние между траекториями сталкивающихся частиц; при «лобовом» столкновении он равен нулю).

Понятие каналирования было введено в работах по прохождению заряженных частиц через монокристаллы сначала для положительно заряженных ионов и позже для электронов. Интересно, что явление каналирования «открывалось» дважды. В 1912 г. немецкий физик И. Штарк обратил внимание на то, что глубина проникновения положительно заряженной частицы в моно-

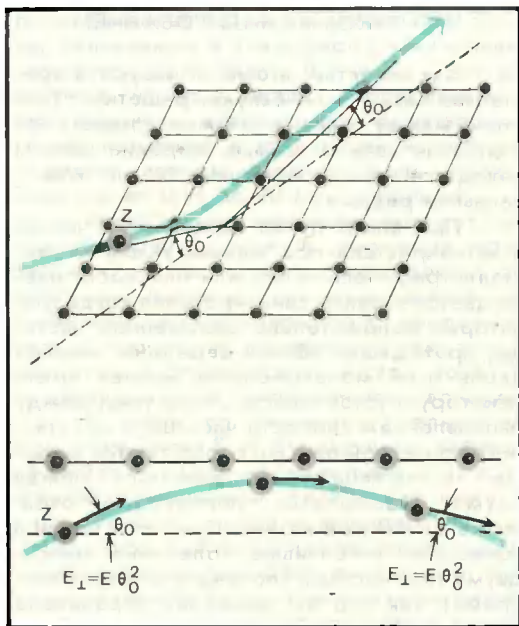
лографической решетки. При движении в кристаллическом канале положительно заряженная частица испытывает отталкивание от положительно заряженных атомных ядер, как бы образующих стенки канала. Если составляющая скорости частицы, перпендикулярная оси канала, мала, то силы отталкивания не позволяют иону выйти из канала. При этом движение частицы вдоль кристаллического канала будет сопровождаться ее колебаниями между двумя плоскостями, но продольная составляющая импульса остается практи-



Плоскостные и осевые каналы в гранцентрированной кубической решетке. Слева направо: вид решетки вдоль осей  $\langle 110 \rangle$ ,  $\langle 100 \rangle$ ,  $\langle 001 \rangle$ . Видно, что каналом может служить не только «полость», образованная цепочками атомов, но и пространство, заключенное между кристаллографическими плоскостями [в центре].

кристалл зависит от угла, под которым пучок падает на кристалл. Однако этот факт был надолго забыт. Повышенный интерес к ориентационным явлениям в монокристаллах обязан «второму открытию» каналирования, которое было сделано в начале шестидесятых годов. При моделировании торможения ионов в монокристаллах на электронно-вычислительной машине были обнаружены аномально большие пробеги для тех ионов, которые влетают в монокристалл почти параллельно главным кристаллографическим направлениям. Дальнейшие многочисленные эксперименты выявили значительное различие в длине пробегов тяжелых ионов в монокристаллах и в аморфных веществах<sup>2</sup>.

Обсудим характер взаимодействия заряженной частицы с полем кристал-



Стемы, иллюстрирующие последовательность коррелированных соударений положительно заряженной каналированной частицы с зарядом  $Z$  с атомной плоскостью (вверху) и цепочкой атомов. Поперечная энергия частицы,  $E_{\perp}$ , при взаимодействии с плоскостью и цепочкой сохраняется.

<sup>2</sup> Линдхард Й.—УФН, 1969, т. 99, вып. 2, с. 249. См. также: Тулинов А. Ф., Чеченин Н. Г. Каналирование заряженных частиц.—Природа, 1979, № 2, с. 2.

чески постоянной. Наглядной моделью такого поведения положительно заряженной частицы может служить движение шарика в желобе. Понятно, что если энергия поперечного движения положительно заряженной частицы слишком велика (больше величины потенциальной энергии барьера), то частица выходит за пределы канала и явление каналирования не возникает.

Приведенное качественное описание движения каналированной частицы позволяет оценить величину критического угла каналирования. Захват частицы в режим каналирования определяется, как мы показали, соотношением между энергией поперечного движения  $E_{\perp} = E\theta_k^2$  и высотой потенциального барьера  $U_0$ , создаваемого атомами плоскости; таким образом, заряженная частица захватывается в режим каналирования, если угол влета в монокристалл меньше критического угла каналирования  $\theta_k$ :

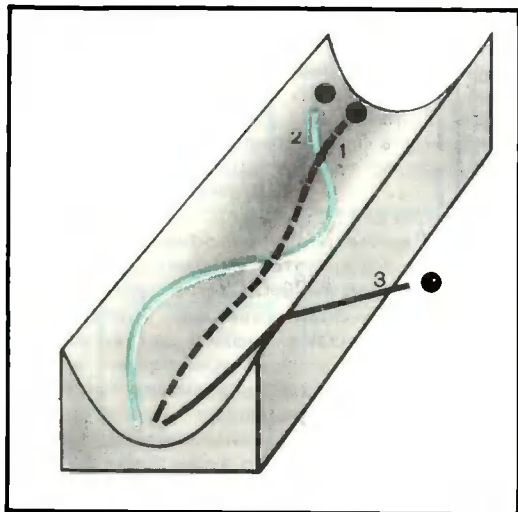
$$\theta_k = \sqrt{U_0/E}.$$

На первый взгляд, представление «стенок» кристаллического канала в виде «гладкой» плоскости может вызвать удивление. Аналогия оказывается хорошей только потому, что при движении вдоль оси канала частица совершает одно колебание от стенки к стенке на больших продольных расстояниях, приблизительно равных сотне межатомных расстояний, так что дискретность в расположении атомов оказывается несущественной. Представим себе положительно заряженную частицу, влетающую в монокристалл под малым углом  $\theta < \theta_k$  по отношению к некоторой кристаллографической плоскости. В этом случае быстрая частица будет когерентно взаимодействовать со всеми атомами, лежащими на участке плоскости с продольной длиной  $l_{\parallel} \geq \hbar/p_{\parallel}$  (где  $p_{\parallel} = \frac{1}{2}r\theta^2$  —

продольный передаваемый импульс,  $\hbar$  — постоянная Планка). Если эта длина велика по сравнению с межатомным расстоянием, то детали расположения атомов на этой длине несущественны для рассеяния и можно, в частности, заменить истинное расположение атомов некоторым усредненным их расположением. Поэтому хорошим приближением для такого рассеяния будет рассмотрение взаимодействия частицы с суммарным потенциалом атомов плоскости, усредненным по их расположению в этой плоскости. В результате усредненный потенциал атомов плос-

кости определяется только расстоянием между движущейся частицей и плоскостью.

Конкретный вид потенциала существенно зависит от характера взаимодействия между движущейся (каналированной) частицей и атомами кристалла, но основные физические закономерности движения частиц при плоскостном каналировании проще проанализировать на примере модельного периодического потенциала Кронига — Пенни, изображенного на рисунке. Для положительно заряженных частиц в поперечном направлении потенциал

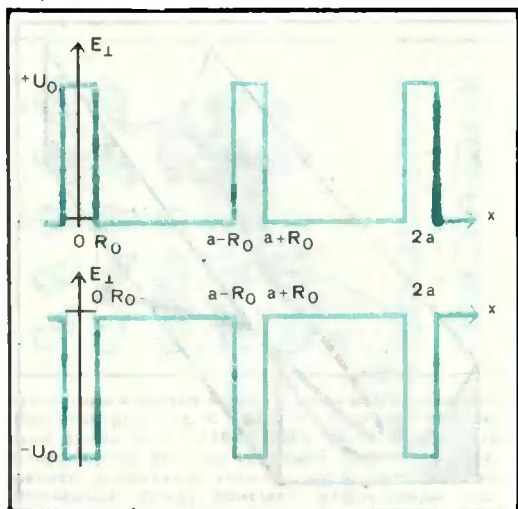


Траектории шарика в желобе при различных значениях его поперечной начальной энергии. Траектории 1 и 2 соответствуют каналированному движению, а траектория 3 соответствует случаю  $E_{\perp} > U_{\text{эф}}$ .

представляет систему потенциальных ям шириной ( $a = 2R$ ) и глубиной  $U_0$ ; расстояние между ямами равно  $2R$ . (Здесь  $a$  — расстояние между кристаллографическими плоскостями,  $R$  — эффективный радиус атома решетки.) Для отрицательно заряженных частиц картина оказывается иной: здесь глубина ям ( $-U_0$ ) и ширина  $2R$ , тогда как расстояние между ямами составляет ( $a = 2R$ ).

Таким образом, условия каналированного движения существенно различны для частиц с различным знаком заряда. Для положительно заряженных частиц потенциал плоскости есть потенциал отталкивания и ширина ямы намного больше ширины барьера ( $a \gg R$ ). Для отрицательно заряженных частиц потенциал плоскости — потенциал притяжения и ширина ямы намного

меньше ширины барьера. Поэтому каналированные позитроны, протоны, ионы движутся в основном по междоузлиям, в области пониженной электронной плотности. Это приводит к уменьшению потерь таких частиц, увеличению длины пробегов и уменьшению вероятности процессов, происходящих при столкновении с ядрами. Каналированные электроны движутся в области, близкой к узлам решетки, что приводит к увеличению потерь, уменьшению длины пробегов и к увеличению вероятности рассеяния на большие углы.



Потенциал Кронига — Пенни для плоскостного каналирования положительно (вверху) и отрицательно заряженных частиц.

Глубина потенциальной ямы  $U_0$  для плоскостного каналирования по порядку величины составляет несколько десятков электронвольт (например, в кремнии для плоскости (110) величина  $U_0 = 25$  эВ). Ширина ямы для позитронов составляет величину порядка  $a$ , т. е. порядка нескольких ангстрем. В то же время для электронов ширина потенциальной ямы определяется эффективным радиусом отдельного атома  $R$  и составляет несколько десятых ангстрема.

Наряду с плоскостным каналированием возможно также осевое каналирование, когда импульс заряженной частицы направлен под малым углом к одной из кристаллографических осей. В этом случае суммарный потенциал атомов, расположенных вдоль кристаллографической оси, можно заменить усредненным двумерным потенциалом атомной цепочки. Этот потенциал обычно называют струнным потен-

циалом. В этом случае движение в поперечном направлении (в плоскости, перпендикулярной кристаллографической оси) определяется эффективным потенциалом, который представляет сумму непрерывного потенциала атомной цепочки плюс центробежная энергия частицы. Представление о движении отрицательно заряженной частицы в режиме осевого каналирования дает схема движения по винтовой линии.

## ОСОБЕННОСТИ ПОПЕРЕЧНОГО ДВИЖЕНИЯ КАНАЛИРОВАННЫХ ЧАСТИЦ

С точки зрения квантовой механики, энергия колебаний каналированной частицы между кристаллографическими плоскостями, т. е. энергия ее движения в потенциальной яме, может иметь лишь определенные, дискретные значения. Иначе говоря, каналированная частица может находиться лишь в определенных энергетических состояниях, которые обозначаются на шкале энергий дискретными уровнями.

В усредненном периодическом потенциале кристаллографических плоскостей энергетические состояния поперечного движения имеют, вообще говоря, зонную структуру. Но в дальнейшем мы будем предполагать, что ширина энергетических зон значительно меньше расстояния между зонами, и можно говорить о различных энергетических уровнях поперечного движения<sup>3</sup>.

Оценки показывают, что число энергетических уровней определяется следующей зависимостью от ширины потенциальной ямы  $d$ , ее глубины  $U_0$  и массы частиц  $m$ :

$$N \sim d \sqrt{m U_0} / \hbar.$$

Отсюда видно, что для тяжелых заряженных частиц (ионов, протонов) число энергетических состояний, которые могут реализоваться при каналировании, велико:  $N \gg 1$ . Это значит, что для описания явления каналирования применим упрощенный, так называемый квазиклассический, подход.

В то же время для легких частиц (электронов и позитронов) существует лишь небольшое число квазисвязанных состояний поперечного движения, и в этом случае анализ существенно усложняется. Здесь следует также напомнить, что для

<sup>3</sup> Это замечание не относится к состояниям вблизи «вертушки» барьера, где зоны существенно уширяются и переходят в сплошной непрерывный спектр.



положительных частиц  $d \sim a$ , а для отрицательных  $d \sim R$  и  $a \gg R$ .

Существует, однако, одно важное обстоятельство, которое позволяет рассматривать в рамках квазиклассического подхода и каналирование легких частиц. Дело в том, что при движении с релятивистскими скоростями их масса не остается той же самой, что и в покое, а возрастает, согласно теории относительности, в  $\gamma$  раз:  $m = m_0 \gamma$ . Здесь  $\gamma$  — так называемый Лоренц-фактор, связанный со скоростью движения частицы  $v$  соотношением  $\gamma = 1 / \sqrt{1 - v^2/c^2}$ . Таким образом,  $m = m_0$  при  $v \ll c$  и  $m \rightarrow \infty$  при  $v \rightarrow c$ . Очевидно, что в релятивистском случае и для легких частиц число энергетических уровней в потенциальной яме будет весьма велико:  $N \sim \sqrt{\gamma} \gg 1$ . В самом деле, если, например, для нерелятивистских электронов в кремнии (при  $U_0 = 25$  эВ и  $R = 0,2$  А) существует один дискретный уровень поперечного движения, то для электронов, скажем, с энергией 50 МэВ ( $\gamma = 100$ ) возникает уже десять уровней поперечного движения.

Движение с релятивистской скоростью интересно для нас не только в связи с увеличением массы. Оказывается, что если бы мы могли двигаться вместе с частицей вдоль оси канала так, что наблюдали бы только колебательные ее движения между кристаллографическими плоскостями (т. е. в потенциальной яме), то глубина потенциальной ямы оказалась бы для нас (и, соответственно, для частицы) в  $\gamma$  раз больше:  $U = U_0 \gamma$ .

Таким образом, в сопутствующей системе координат (а именно о такой системе и шла только что речь) расстояние между энергетическими уровнями  $\Delta E$  оказывается пропорционально  $\sqrt{\gamma}$ :  $\Delta E = U/N \sim \sqrt{\gamma}$ , поскольку, как мы видели, число уровней в яме для релятивистской частицы также пропорционально  $\sqrt{\gamma}$ . Какие же уровни будут заселяться при попадании ускоренных частиц в канал кристалла?

Рассмотрим сначала движение положительно заряженных частиц при нулевом угле влета относительно кристаллографической плоскости. В этом случае частицы, влетающие в монокристалл с малыми прицельными параметрами (меньшими ширины барьера  $R$ ), рассеиваются на углы, превышающие критический угол, и не попадают в режим каналирования. Частицы, которые влетают в монокристалл с прицельными параметрами, превышающими ширину барьера, практически не рассеиваются и захватываются в режим плоскост-

ного каналирования, т. е. заселяют состояния, принадлежащие уровням квазисвязанного поперечного движения. Для положительно заряженных частиц ширина потенциальной ямы значительно больше ширины барьера, поэтому доля каналированных частиц,  $(1 - 2R/a)$ , оказывается близкой к единице.

Для отрицательно заряженных частиц вследствие узости ямы преобладающая доля частиц влетает вне атомной плоскости, т. е. вне области действия потенциала. Как следствие, основная доля электронов при влете параллельно кристаллографической плоскости сосредоточена на уровнях вблизи верхушки ямы<sup>4</sup>. Таким образом, для отрицательно заряженных частиц при нулевом угле влета относительно малая доля частиц,  $(2R/a)$ , попадает в режим плоскостного каналирования, а преобладающая доля частиц заселяет состояния непрерывного спектра<sup>5</sup>.

Следует подчеркнуть, что вероятность заселения наиболее значительна для таких состояний, энергия которых близка к энергии поперечного движения до влета в монокристалл. Изменяя направление влета пучка частиц в монокристалл, можно, вообще говоря, изменять заселенности различных квазисвязанных состояний. При углах влета, превышающих критический угол каналирования, подавляющая часть частиц попадает в состояния непрерывного спектра (которые соответствуют движению частиц в разориентированном кристалле).

<sup>4</sup> Электрон с положительной энергией может совершать колебательное движение между двумя соседними потенциальными ямами. Это явление связано с квантовомеханическим эффектом отражения от потенциальной ямы в том случае, когда энергия частицы меньше абсолютного значения ее глубины.

<sup>5</sup> Строго говоря, вероятности заселения различных состояний определяются квадратами модулей коэффициентов сшивки падающей волновой функции (вид которой зависит от расхождения падающего пучка заряженных частиц) с блоховскими функциями, характеризующими зонную структуру поперечного движения в монокристалле. Коэффициенты сшивки существенно зависят от угла влета частицы в монокристалл, а также от конкретного виде плоскостного потенциала. Следует отметить, что даже в случае нулевого угла влета в результате дифракции на торце монокристалла заселяется не только нижний уровень (зона) с квантовым числом  $n=1$ . Для потенциала Кронига — Пенни вероятность заселения уровней квазисвязанного (каналированного) движения при нулевом угле влета обратно пропорциональна  $n^2$ . Этот результат согласуется с распределением интенсивности при дифракции Фраунгофера на щели (ширина низких зон, обусловленная наличием соседних ям, мала, и можно рассматривать отдельную изолированную яму).

## КВАЗИХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ КАНАЛИРОВАННЫХ ЧАСТИЦ

Вспомним, как с точки зрения квантовой механики выглядит структура изолированного атома водорода. Для электрона, движущегося в электрическом поле ядра, существуют дискретные энергетические состояния (соответствующие связанному движению в атоме) и непрерывный спектр состояний с положительной энергией (соответствующий «оторванному» от ядра свободному электрону). При переходах электрона из одного энергетического состояния в другое (с меньшей энергией) возникает характеристическое электромагнитное излучение.

Аналогично переходы из одной энергетической зоны поперечного движения каналированных частиц в другую должны сопровождаться электромагнитным излучением.

Строго говоря, такое излучение уже не является тормозным<sup>6</sup>; здесь следует говорить о новом механизме электромагнитного излучения, связанном с изменением энергии поперечного движения частицы. Это излучение можно по аналогии с характеристическим излучением в атоме назвать «квазихарактеристическим». При этом квазихарактеристическое излучение возникает при каналировании частиц любого знака.

Учитывая переходы между различными энергетическими состояниями заряженной частицы в монокристалле, интенсивность излучения можно представить в следующем виде:<sup>7</sup>

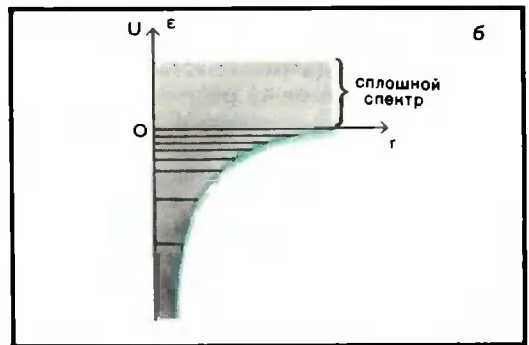
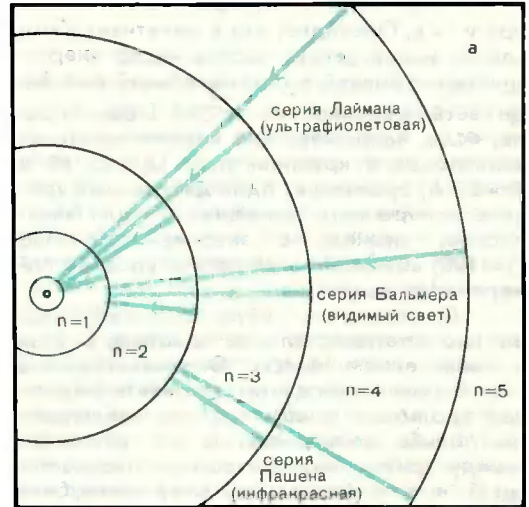
$$I = I_1 + I_2 + I_3 + I_4,$$

где  $I_1$  — интенсивность излучения при радиационных переходах между состояниями непрерывного спектра;  $I_2$  — интенсивность излучения при радиационных переходах из состояний непрерывного спектра на уровни квазисвязанного поперечного движения;  $I_3$  — интенсивность излучения при радиационных переходах между уровнями квазисвязанного поперечного движения;  $I_4$  — интенсивность излучения, обусловленного интерференцией всех перечисленных механизмов.

Первое слагаемое в этом выражении представляет механизм когерентного тормозного излучения, который подробно

исследован в работах М. Л. Тер-Микаеляна<sup>8</sup>. Следует отметить, что интенсивность когерентного тормозного излучения имеет минимум, когда заряженная частица влетает в монокристалл параллельно кристаллографической плоскости или оси.

При углах влета, меньших критического угла каналирования, доминирующим становится механизм квазихарактеристического излучения ( $I_2 + I_3$ ). Рассмотрим его основные особенности. В сопутствующей системе координат переходы между уровнями с разной четностью сопровождаются



Возникновение характеристического излучения. Схема переходов в атоме — а. Схема уровней энергии атома водорода [зависимость потенциальной энергии  $U$  электрона в атоме водорода от расстояния  $r$  до ядра и уровня энергии  $E$  атома водорода] — б.

<sup>6</sup> Излучение, сопровождающее атомные соударения, называют обычно тормозным излучением, так как впервые оно наблюдалось в опытах по торможению высокоэнергетического пучка электронов толстой металлической мишенью.

<sup>7</sup> Здесь не рассматривается вклад переходного излучения в широком смысле слова.

<sup>8</sup> Тер-Микаелян М. Л. Влияние среды на электромагнитные процессы при высоких энергиях. Ереван, 1969.

электромагнитным излучением с частотой, пропорциональной разности энергий колебательного движения  $\Delta E$ . Поскольку излучающая частица движется с релятивистской скоростью, в лабораторной системе координат частота излучения увеличивается из-за эффекта Доплера:

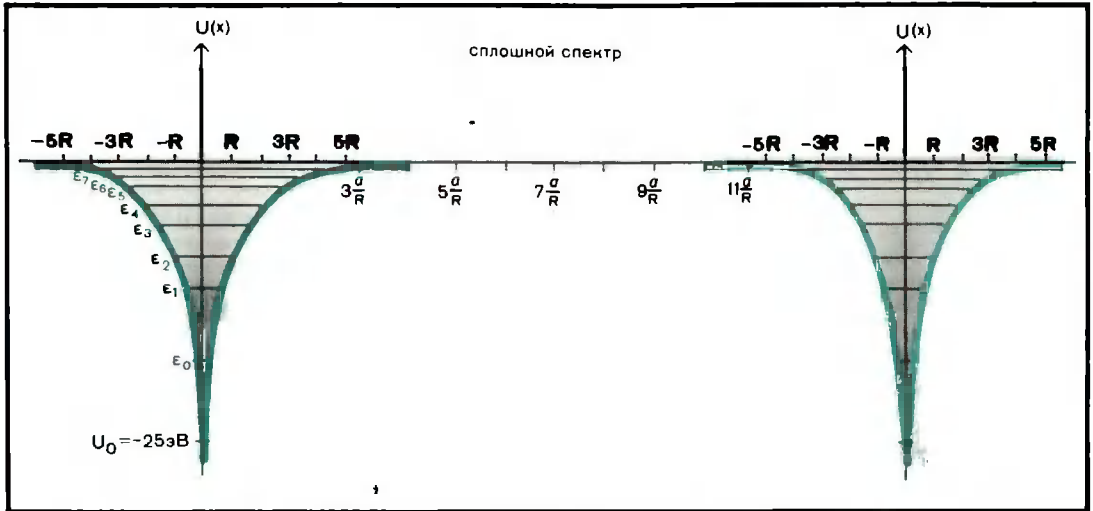
$$\omega(\theta_\gamma) = \frac{\Delta E \sqrt{1-v^2/c^2}}{\hbar(1-(v/c) \cos \theta_\gamma)}.$$

Здесь  $\theta_\gamma$  — угол между направлением излучения и осью канала. Анализ процесса излучения каналированных частиц, сде-

ше, пропорционально  $\sqrt{\gamma}$  и поэтому  $\omega \sim \gamma^{3/2}$ .

Следует отметить, что квазихарактеристическое излучение при плоскостном каналировании в основном линейно поляризовано в плоскости, перпендикулярной кристаллографическим плоскостям, образующим канал.

Все эти свойства квазихарактеристического излучения были подтверждены в экспериментальных исследованиях. В эксперименте на Стэнфордском ускорителе (США)<sup>9</sup> пучок релятивистских позитронов



Структура энергетических зон и радиационных переходов электронов с энергией 56 МэВ, каналированных вдоль плоскости [110] в кремнии.

ланный на основе законов сохранения энергии и продольного импульса, показывает, что  $\theta_\gamma \sim 1/\gamma$ . Таким образом, выражение, связывающее частоту излучения  $\omega$  с разностью энергий поперечного движения в сопутствующей системе координат  $\Delta E$ , существенно упрощается:

$$\omega \approx \gamma \Delta E / \hbar.$$

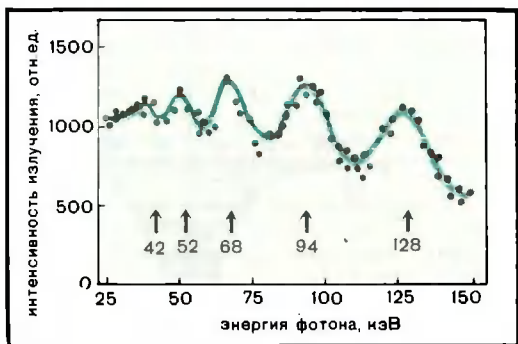
Отсюда можно сделать ряд важных выводов. Максимальная частота квазихарактеристического излучения соответствует, очевидно, случаю, когда частица переходит из неканалированного состояния на «дно» потенциальной ямы, т. е. при  $\Delta E \sim U - U_0 \gamma$ . Следовательно, максимальная частота квазихарактеристического излучения пропорциональна  $\gamma^2$ . Минимальная частота соответствует переходам между соседними уровнями, среднее расстояние между которыми, как уже отмечалось вы-

с энергией 56 МэВ ( $\gamma=111$ ) направлялся в монокристалл кремния толщиной 18 мкм параллельно плоскости (110), причем угол расходимости пучка был меньше критического угла  $\theta_k$ . Поэтому подавляющая часть позитронов захватывалась в режим плоскостного каналирования. Детектирование электромагнитного излучения производилось в направлении, противоположном движению позитронов, в узком интервале углов.

Квазихарактеристическое излучение, как и следовало ожидать, было линейно поляризовано и имело один явно выраженный максимум, положение которого определяется величиной  $\gamma^{3/2}$ . В самом деле, при энергии позитронов 56 МэВ ( $\gamma=111$ ) в потенциальной яме существует большое число состояний квазисвязанного поперечного движения. Пучок позитронов после влета в монокристалл заселяет в основном

<sup>9</sup> Algard M. J., Swent R. L. et al. Nucl. Instr. Meth., 1980, v. 170, p. 7.

состояния в нижней половине ямы. Приблизительная эквидистантность уровней поперечного движения, особенно вблизи дна потенциальной ямы, приводит к тому, что радиационные переходы между соседними уровнями сопровождаются излучением с одинаковой частотой  $\omega \sim \gamma^{3/2}$ . В результате этого и возникает резко выраженный пик почти монохроматического квазихарактеристического излучения. При частотах, отличных от резонансной, излучение в основном определяется тормозным механизмом.



Спектр фотонов, испущенных каналированными электронами с энергией 56 МэВ, движущимися параллельно плоскости  $\langle 110 \rangle$  в кремнии. Изображенный спектр представляет собой результат вычитания из спектра излучения каналированных электронов спектра тормозного излучения в разориентированном кристалле.

В этом эксперименте был также исследован спектр излучения каналированных электронов с энергией 56 МэВ в таком же монокристалле кремния. Следует подчеркнуть, что при этом детектор и коллиматор были расположены вдоль направления падающего пучка и телесный угол регистрации ограничивался величиной  $3 \cdot 10^{-6}$  стерадиан (т. е.  $\Delta\theta_{\text{дет}} \ll 1/\gamma$ ), что позволило измерить (дифференциальный по углу) спектр излучения. На фоне довольно широкого максимума, связанного с излучением при радиационных переходах из состояний непрерывного спектра из состояний непрерывного спектра (так как большая доля электронов движется в неканалированных состояниях) в квазисвязанных состояниях, экспериментально наблюдались резкие пики, соответствующие радиационным переходам между различными уровнями квазисвязанного поперечного движения. Наличие нескольких резких пиков свидетельствует о неэквидистантном характере уровней поперечного движения в потен-

циальной яме для электронов. Полученный спектр квазихарактеристического излучения использовался для определения параметров усредненного потенциала кристаллографической плоскости. Предполагая, что усредненный потенциал имеет экспоненциальную форму, был проведен расчет глубины ( $U_0 = -26,7$  эВ) и ширины ( $R = 0,35 \text{ \AA}$ ) потенциальной ямы с использованием подгонки положения пиков квазихарактеристического излучения.

На электронном пучке Томского синхротрона были проведены исследования спектрального распределения  $\gamma$ -излучения для ультрарелятивистских электронов с энергией до 900 МэВ, проходящих через монокристалл алмаза толщиной 0,35 мм в режиме осевого каналирования (параллельно оси  $\langle 110 \rangle$ )<sup>10</sup>. Регистрация фотонов производилась в относительно широком интервале углов, превышающем эффективный угол излучения ( $1/\gamma$ ). Поэтому в данном случае спектральное распределение имело плавный характер и простиралось до максимальной частоты. Исследования на Томском синхротроне при различных начальных энергиях электронного пучка (600, 750 и 900 МэВ) подтвердили зависимость максимальной частоты от энергии:  $\omega_{\text{max}} \sim \gamma^2$ .

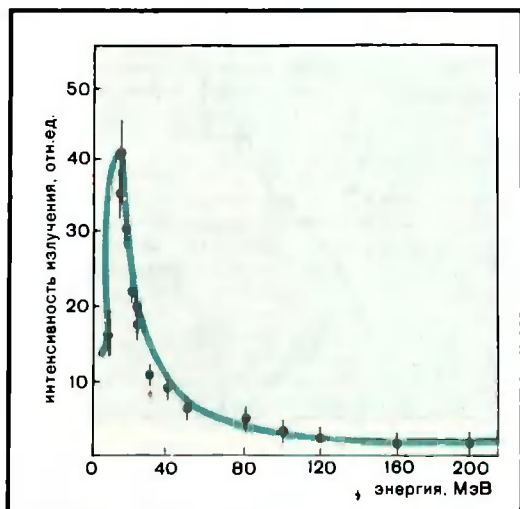
Говоря об интерпретации экспериментальных результатов, следует иметь в виду, что при движении в монокристалле заряженная частица испытывает различные электромагнитные взаимодействия (многократное упругое рассеяние, многократное неупругое рассеяние, радиационные переходы и т. д.), которые приводят к существенному изменению вероятностей заселения состояний непрерывного спектра и уровней квазисвязанного поперечного движения. Поэтому при сравнении теоретических предсказаний с экспериментальными результатами следует учитывать роль маскирующих электромагнитных взаимодействий в монокристаллах, использующихся в экспериментах. Теоретический анализ влияния указанных маскирующих взаимодействий на излучение каналированных частиц достаточно сложен и в настоящее время еще не завершен.

Однако для тонкого монокристалла влиянием таких процессов можно пренебречь, и анализ электромагнитного излу-

<sup>10</sup> Воробьев С. А., Забава В. Н., Калинин Б. Н., Каплин В. В., Потылицын А. П. Письма в ЖЭТФ, 1979, т. 29, в. 7, с. 414.

чения в тонком монокристалле наиболее выпукло демонстрирует физическую картину нового типа излучения при радиационных переходах между уровнями поперечного движения.

Итак, квазихарактеристическое излучение обладает рядом специфических особенностей. Максимум спектрального распределения существенно зависит от энергии падающих частиц. Если частицы движутся параллельно кристаллографическим плоскостям, то излучение оказывается линейно поляризованным. Излучение



Спектральное распределение излучения каналированных [вдоль оси  $\langle 110 \rangle$ ] электронов с энергией 0,9 ГэВ. Приведенный результат представляет собой отношение интенсивности излучения каналированных электронов к интенсивности тормозного излучения в разориентированном кристалле

происходит в узком конусе вблизи направления импульса падающих частиц. Интенсивность излучения в единичный интервал телесного угла и в единичный интервал частот оказывается выше интенсивности тормозного излучения. Следует подчеркнуть, что характеристики излучения (интенсивность, угловое и частотное распределения, поляризация) являются функциями кристаллической структуры и параметров пучка заряженных частиц.

Отсюда следует, что изучение квазихарактеристического излучения каналированных частиц можно рассматривать:

как метод для исследования свойств кристаллов;

как метод для исследования свойств каналированных частиц;

как работу над созданием источника излучения.

Квазихарактеристическое излучение каналированных частиц как источник излучения имеет ряд важных свойств: при определенных условиях здесь можно изменять частоту излучения, которое монохроматично, линейно поляризовано, направлено в узком конусе и характеризуется высокой интенсивностью по сравнению с другими источниками в рентгеновском и  $\gamma$ -диапазоне.

Рассмотренное квазихарактеристическое электромагнитное излучение, возникающее при радиационных переходах между уровнями поперечного движения каналированной частицы, трактуется как спонтанное излучение. Как уже отмечалось, вероятности заселения различных поперечных состояний существенно зависят от угла влета частицы в монокристалл. Следовательно, при соответствующей ориентации пучка и монокристалла возможно создание инверсной заселенности уровней поперечного движения. По-видимому, процессы вынужденного квазихарактеристического излучения можно будет использовать для создания  $\gamma$ -лазера. Следует отметить, однако, что необходимые для осуществления  $\gamma$ -лазера токи частиц оказываются, к сожалению, очень большими и имеют порядок  $10^9$  А/м<sup>2</sup>.

#### РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Калашников Н. П. КОГЕРЕНТНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В МОНОКРИСТАЛЛАХ. М.: Атомиздат, 1980.

Тулинов А. Ф., Чеченин Н. Г. КАНАЛИРОВАНИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ. — Природа, 1979, № 2, с. 2.

## Гидротермальный процесс в океане (70-й рейс «Гломара Челленджера»)

**А. А. Мигдисов,**  
кандидат геолого-минералогических наук

Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского АН СССР  
Москва

Научно-исследовательское буровое судно «Гломар Челленджер» вышло в 70-й рейс из порта Бальбоа (Панама) 10 ноября 1979 г. В состав экспедиции, которую возглавили американские ученые Р. фон Герцен и Д. Гоннорез, вошли специалисты из США, ФРГ, Франции, СССР, Англии и Японии. Судно направилось в юго-восточную часть Тихого океана в район Галапагосского рифта. Цель экспедиции — изучение взаимодействия морской воды с базальтами океанической коры вблизи активных центров ее раздвижения.

Район работ определен тем, что именно здесь предыдущими исследованиями были обнаружены поступающие в морскую воду гидротермальные струи, а в водной толще отмечалось повышенное содержание растворенного марганца. На дне океана в районе Галапагосского рифта были выявлены холмообразные структуры, названные гидротермальными куполами. Купола сложены зелеными глинистыми минералами — смектитами<sup>1</sup> и корками окислов марганца. Размер их от 5 до 50 м в диаметре и от 1 до 20 м в высоту. Эти купола сла-

<sup>1</sup> Смектиты — собирательное название глинистых минералов группы монтмориллонита. Для гидротермальных куполов характерны железистые разновидности смектитов.



Район работ научно-исследовательского судна «Гломар Челленджер» в 70-м рейсе.

гают цепи, протянувшиеся вдоль оси рифта более чем на 20 км.

Первый этап работ в 70-м рейсе «Гломара Челленджера» заключался в комплексном исследовании зоны «открытого» гидротермального режима, где гидротермальные потоки поступают непосредственно в морскую воду, либо в 30—40-метровый осадочный чехол, покрывающий относительно молодые породы (0,4—0,9 млн лет) базальтового фундамента. Участникам рейса предстояло получить новые данные, которые сделали бы картину происхождения куполов более ясной. Для этого, в частности, необходимы были достоверные сведения о последовательности отдельных слоев

осадков, слагающих купола<sup>2</sup>. Кроме того, следовало проверить предположение участников 54-го рейса «Гломара Челленджера», что выявленные ранее геофизическими исследованиями отражающие акустические горизонты обусловлены именно слоями гидротермальных осадков, т. е. дать однозначный ответ на вопрос, имеют эти образования региональное распространение или же они проявляются локально. Ученые ждали также новой информации о характере изменений, возникающих в базальтах фундамента под влиянием «открытой» гидротермальной системы.

На трех станциях (506,

<sup>2</sup> Возможность получения таких данных появилась после 64-го рейса «Гломара Челленджера», когда впервые при бурении в осадочном слое были использованы специальные гидравлические поршневые трубки, поднимающие практически ненарушенную колонку осадков.

507 и 509), расположенных к югу от оси рифта, в области распространения гидротермальных куполов в осадочном чехле было пробурено 10 скважин. Скважины бурились на вершинах куполов, на их склонах и в понижениях между куполами.

Осадочный резерв куполов в разных районах изученной области сложен тремя горизонтами. Верхний из них представляет собою слой кремнисто-карбонатных пелагических осадков толщиной от нескольких сантиметров до 4 м. В самой верхней части этого горизонта в некоторых скважинах обнаружены железо-марганцевые и железистые корки.

Ниже залегает горизонт гидротермальных осадков мощностью 13—28 м. Он составляет, как правило, большую часть вертикального разреза куполов. Для верхней части этого горизонта характерны корки окислов марганца, мощность которых достигает местами 1,4 м. Основную же часть горизонта гидротермальных осадков составляют слои, сложенные смектитами. Анализ окислов марганца и смектитов, проведенный на впервые использованном непосредственно в рейсе рентгеновском дифрактометре, позволил идентифицировать их как тодорокит и нонтронит.

Под горизонтом гидротермальных осадков вскрыты пелагические карбонаты, залегающие непосредственно на фундаменте. В этом горизонте обильны следы ходов илоедов, которые зачастую заполнены смектитами, а иногда содержат конкреции сульфидов до 5 см длиной. В нижней части горизонта пелагических карбонатов, имеющего мощность 10—17 м, обычно встречаются фрагменты базальтового стекла.

Слои марганцевых корок и зеленых смектитов не поддаются стратиграфическому сопоставлению даже в пределах соседних куполов. Мощность гидротермального горизонта на их склонах также резко меняется.

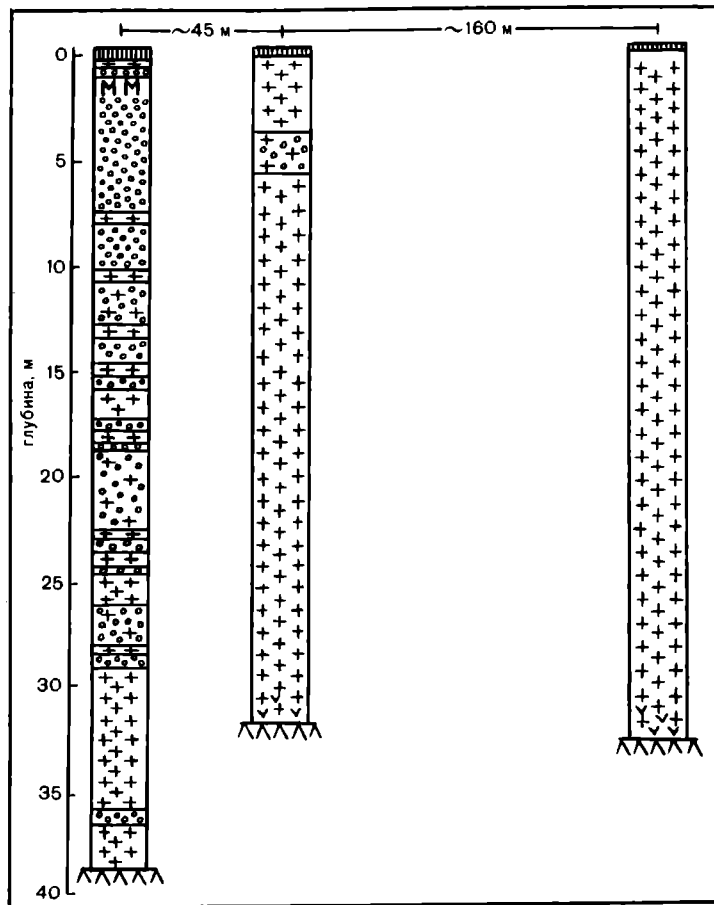
Разрезы осадков за пределами куполов представлены исключительно пелагическими кремнисто-карбонатными и карбонатными илами. Следовательно, гидротермальные осадки не

имеют регионального распространения.





Часть скважин была пробурена без отбора керна с целью изучения теплового потока и состава заключенной в осадках поровой воды. Как и следовало ожидать, значения теплового потока оказались выше над куполами, чем в межкупольных зонах. Увеличение термического



градиента с глубиной и химический состав поровых вод позволяет судить о быстром движении растворов от базальтового фундамента вверх.

Для сравнения на станции 508 были изучены осадки из зоны с низким тепловым потоком, где купола отсутствуют. Расположена она всего в 4 км от станции 507, т. е. возраст



Станция 507. Разрезы осадков на гидротермальном куполе, его склоне и за пределами купола. Хорошо видно, что гидротермальные осадки — окислы марганца и железистые смектиты — широко распространены в пределах купола; на склоне купола их мало, а между куполами они отсутствуют.

-  Форминиферо-кокиолитовые илы
-  те же илы с фрагментами базальтов
-  гидротермальные осадки
-  предполагаемый фундамент

-  окисленный слой осадков
-  окислы марганца

фундамента в обеих точках очень близок. Данные по изменению термического градиента и составу поровых вод свидетельствуют о незначительном поступлении сюда воды, взаимодействовавшей с фундаментом. Осадки имеют кремнисто-карбонатный состав и сплошь пронизаны ходами илоедов, достигающими в отдельных случаях метра и более. Следует отметить прекрасную сохранность остатков раковин кремнистых микроорганизмов в осадках этой станции по сравнению с осадками из области высокого теплового потока. Количественное распределение кремнистых остатков по разрезу также различно. В области низкого теплового потока распространены кремнистые остатки по разрезу осадков практически неизменна. В разрезах же куполов кремнистые остатки обильны в горизонте верхних пелагических осадков, а в горизонте гидротермальных смектитов и в лежащих на фундаменте пелагических осадках они зачастую вовсе отсутствуют. За пределами куполов распространены кремнистые остатки также, как правило, резко уменьшается в средней и нижней части разреза.

Эти наблюдения, а также факт значительного (более чем на 1/3) сокращения суммарной мощности пелагических илов в разрезе куполов и данные по изучению теплового режима и состава поровых вод позволили предположить, что гидротермальные смектиты куполов образуются в результате переработки пелагических кремнисто-карбонатных илов глубинными растворами. Подтверждением этому служат обнаруженные под микроскопом следы частичного или полного замещения кремнистых и карбонатных микрофоссилий смектитом. Приближительные расчеты показали, что для формирования слоев смектита необходимо не только поступление железа с растворами, но и дополнительное поступление кремнезема, поскольку для отложения этого минерала оказалось недостаточно как аморфного кремнезема замещенных осадков, так и кремнезема примыкающих к куполом осадков.

Бурение фундамента вблизи оси рифта (станции 506, 507 и 508) и при небольшой толщине осадочного чехла проходило трудно. Было пробурено шесть скважин, вошедших в фундамент лишь на 3—8 м, причем степень извлечения керна в пяти из них не достигла и десяти процентов. Породы оказались типичными для этого района базальтами, богатыми железом и титаном и лишены следов гидротермального процесса. Отсутствие гидротермальных изменений в верхних метрах базальтового фундамента согласуется с невысокой (~25°C) температурой растворов, поступающих на поверхность. Обнаруженные в базальтах вторичные минералы наиболее распространены в области низкого теплового потока и обязаны своим происхождением низкотемпературным процессам. Изучение полученных при бурении образцов базальтов показало, что поднятые керны принадлежали сильно раздробленному фундаменту.

Бурение пород фундамента на станции 510, расположенной в 90 км к северу от оси Галапагосского рифта, осуществлялось значительно легче. Возраст базальтов составляет здесь 2,7 млн лет, а мощность осадочного чехла достигает 115 м. Скважиной было пройдено 18 м базальтов, которые в отличие от более молодых базальтов этого района содержат мало железа и титана.

Задачей второго этапа экспедиции было изучение измененной, происходящих в фундаменте района с «закрытым» гидротермальным режимом в отличие от «открытого», изучавшегося на первом этапе. Для этого требовалось возможно более глубоко проникнуть в фундамент скважины 504 В, расположенной вблизи Коста-Риканского рифта. Базальты здесь более древние (2—6 млн лет), чем на станции 510, и перекрыты 275-метровой толщей осадков. Фундамент в скважине 504 В был пробурен на глубину 214 м еще в 69-м рейсе, а при повторном вхождении в ту же скважину в нашем рейсе, она была пробурена до глубины 836 м. В результате работы обеих экспедиций был пройден

562-метровый разрез базальтов. Основную его часть составляют одно-двухметровые слои трещиноватых пород и горизонты подричных лав и брекчий. Вторичные изменения базальтов усиливаются вглубь и значительно более интенсивны здесь, чем в области «открытого» гидротермального режима. Цеолиты и окислы железа наиболее распространены в верхней половине разреза. В нижней его половине обнаружена богатая сульфидная минерализация. Наиболее обычные вторичные минералы, обнаруженные в этой скважине, — смектиты, среди которых рентгеновским анализом определен богатый магнием сапонит.

В ходе бурения была осуществлена широкая программа геофизических исследований, включающих каротажные работы по всему разрезу. Часть этих работ проводилась совместно с научно-исследовательским судном «Гиллис» (США). В ряде скважин была измерена температура, которая в забое одной из скважин достигла 120°C.

Закончился 70-й рейс «Гломара Челленджера» 21 декабря 1979 г. в порту Кальяо (Перу). В результате этого рейса удалось выяснить, как устроены гидротермальные купола, доказать локальность распространения гидротермальных осадков и собрать данные, указывающие на формирование этих осадков под действием гидротермальных растворов, поступающих через зоны нарушений в фундаменте. Полученный материал позволяет заключить, что гидротермальный процесс в океане протекает и в настоящее время. Важным этапом в изучении взаимодействия морских вод с базальтами явилось бурение в районе Коста-Риканского рифта, где удалось получить один из самых глубоких разрезов океанической коры. Кроме того, выявлена значительная проницаемость базальтов для циркулирующих в них вод и получены пробы этих вод.

Лабораторные исследования и дополнительная обработка полученного в рейсе материала позволят в дальнейшем выявить новые детали процессов взаимодействия базальтов с морской водой.





## Охотничье поведение сапсана на зимовке

А. Г. Резанов

кандидат биологических наук  
Государственный педагогический институт им. В. И. Ленина  
Москва

Сокол-сапсан (*Falco peregrinus*) — вид, населяющий все материки, за исключением Антарктиды. Гнездовой ареал сапсана охватывает большую часть территории нашей страны. Несмотря на столь внушительное жизненное пространство, численность его повсюду невелика. Например, на территории европейского центра СССР гнездится не более 20—30 пар сапсана<sup>1</sup>. Как редкий и исчезающий вид, сапсан внесен в «Красную Книгу СССР». Во многих странах Западной Европы за последние 20 лет его численность сократилась почти на 80%, и эта птица уже не гнездится во многих районах американского континента.

Особенно слабо изучена жизнь сапсана во время зимовок. Нам посчастливилось наблюдать этих интереснейших и красивых пернатых на зимовке в Кызыл-Агачском заповеднике и на озере Аггёль (Азербайджанская ССР). Численность сапсанов в заповеднике в значительной степени определяется характером зимы. В мягкие теплые зимы увеличивается площадь, благоприятная для зимовки водоплавающих птиц: уток, гусей, лысух можно встретить к северу от Ленкоранской изменности на сотни километров, вплоть до Северного Каспия.



Сапсан в планирующем полете.

Это фото и следующее из кн.: Fischer W. Der Wanderfalk. Wittenberg Lutherstadt, 1968.

В холодные суровые зимы водоплавающие птицы концентрируются в наиболее теплых, богатых кормом местах, например на территории Кызыл-Агачского заповедника. Сапсан в зимнее время питается в основном водоплавающими птицами и чутко реагирует на изменения их численности. Так, в январе 1969 г., когда в заповеднике держался устойчивый снежный покров, на п-ове Сара на 5 км пути мы встречали до 3—5 соколов, отдыхающих на столбах телефонной линии, проходящей вдоль берега Большого Кызыл-агачского залива. В теплые зимы (январь 1971, 1975 гг.) в тех же местах наблюдалось не более 1—2 сапсанов, да и то далеко не каждый день. Соколы держались крайне осторожно, ближе чем на 100—150 м человека не подпускали.

На самом юге п-ова Сара расположена знаменитая Карагачовая роща, куда слетаются на ночевку сотни черных коршунов, десятки орланов-белохвостов и других хищных птиц.

Как-то мы встретили здесь и одиночного сапсана. Птица расположилась у основания толстой ветки на высоте 5—6 м.

Питается сапсан почти исключительно птицами, от него не застраховано ни одно пернатое существо — от жаворонка до гуся включительно<sup>2</sup>. Птиц сапсан добывает в воздухе, нагоняя и схватывая их по-стребиному. Значительно реже сокол делает так называемую ставку, пикируя на жертву с большой высоты и развивая при этом скорость до 100 м в секунду. В такой момент сокола практически не видно. В редких случаях сапсан вспугивает птиц с земли или воды, чтобы потом поймать их в воздухе.

В январе 1973 г. мы изучали поведение птиц на зимовке на оз. Аггёль. Зима была морозная; температура даже днем падала до минус 4—5°. Утром 26 января мы, как обычно, шли маршрутом вдоль полосы тростников, окаймляющих озеро. С другой стороны простиралась заснеженная Мильская степь. Было пасмурно и ветрено. Наше внимание привлекли громкие истошные крики, доносив-

<sup>1</sup> Галушкин В. М. «Труды Окского гос. запов.», 1971, вып. 8.

<sup>2</sup> Холодковский Н. А., Силантьев А. А. Птицы Европы. СПб, 1901.



Ловчий сапсан.

шиеся откуда-то сверху. На высоте примерно 60 м с криками летел огарь, а за ним неотступно следовал сокол. Сапсан подлетал снизу, вынуждая утку набирать высоту. Как только сокол взмывал, утка резко снижалась. Соколу никак не удавалось сделать «ставку». Так продолжалось 3—4 раза. При соприкосновении с сапсаном огарь отбивался лапами. Когда обе птицы оказались над глубоким каналом, впадающим в озеро, сокол предпринял еще одну попытку, утка камнем упала с высоты 40 м в воду и, поднимая тучи брызг, скрылась в тростнике. Сапсан какие-то мгновения пикировал за уткой, но вдруг круто взял вверх. Весь этот захватывающий эпизод длился не более 2 минут. Затем пернатый хищник попытался добыть еще одного пролетающего мимо огаря, но тоже неудачно. Через 15 мин сапсан стал преследовать серого гуся, летящего над озером на высоте 4—5 м. Сокол отставал на 1—2 м, когда гусь резко сел на воду. Еще через 20 мин сапсан спикировал с высоты 300 м на стаю из 40 цыплят. Когда до стаи оставалось 20—30 м, утки успели резко разделиться на две группы и «ставка» окончилась неудачно. Столь неудачная охота — не такое уж необычное явление для сапсана. Известно, что только 1/3 всех нападений заканчивается успехом. В ветренную и дожд-

ливую погоду эффективность охоты снижается.

Детализированных описаний охотничьего поведения сапсана в литературе крайне мало, и все они, как правило, относятся к гнездовому периоду. Поэтому наши наблюдения за охотой сапсана на зимовке помогают лучше понять поведение этого уже малочисленного пернатого хищника.

Способность сапсана развивать скорость до 100 м в секунду и на лету поражать свою жертву с давних времен использовалась человеком. В России охота с соколами, в частности с сапсанами, была любимой потехой знати. В XIV столетии были учреждены даже особые должности великокняжеских слуг — сокольников.

#### Зоология

### Брачные игры сибирского углозуба

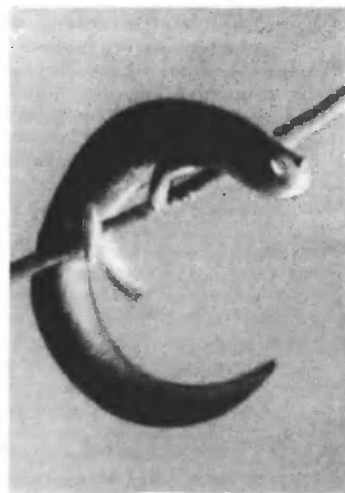
О. В. Григорьев

Биологический институт Сибирского отделения АН СССР  
Новосибирск

Сибирский углозуб — представитель семейства углозубых — интересное и своеобразное хвостатое земноводное, ареал которого охватывает огромную территорию от Камчатки и о-ва Сахалин на востоке до Горьковской области на западе. Особый интерес в биологии углозуба представляет весенний брачный период, в исследовании которого имеется еще много невыясненного.

В течение ряда лет (1970—1977) в Западной Сибири в окрестностях с. Верх Тула (около Новосибирска) мы наблюдали за размножением сибирского углозуба. В небольшом временном водоеме, расположенном в понижении берегового колка, где весенние талые воды сохранились до середины августа, проходили брачные игры, или танцы углозубов.

Танец самца сибирского углозуба состоит из ряда пери-



Сибирский углозуб.

Фото автора.

одически повторяющихся ритуальных движений. Углозуб садится на веточку, удерживаясь за нее лапками, и принимает характерную брачную позу: тело его изогнуто по полуокружности, голова опущена вниз, хвост подогнут. Периодически углозуб как бы дергается всем телом, ударяя при этом телом о веточку; иногда передвигает голову и тело с одной стороны веточки на другую или вытягивается плашмя вдоль веточки и кладет на нее голову. Изредка углозуб как бы заваливается на бок, иногда даже переворачивается вниз спиной, но потом вновь усаживается нормально. Бывает, углозуб опускает голову и как бы высматривает что-то вниз, и изредка зевает, обнажая беловатую внутреннюю полость рта. При этом он беспрерывно, плавными ритмичными движениями машет хвостом.

Танцы углозубов, по многолетним наблюдениям, начинаются в конце апреля и заканчиваются в начале мая. В брачных играх принимают участие от 1 до 14 углозубов. Ток обычно располагается на затопленных ветвях кустарников или на стеблях осоки, сибельника болотного и на других растениях. Углозубы танцуют на некотором расстоянии друг от друга, иногда очень близко — 2—5 см. В брачный период самцы наиболее активны в ночное время. Так, за одни сутки нам удалось

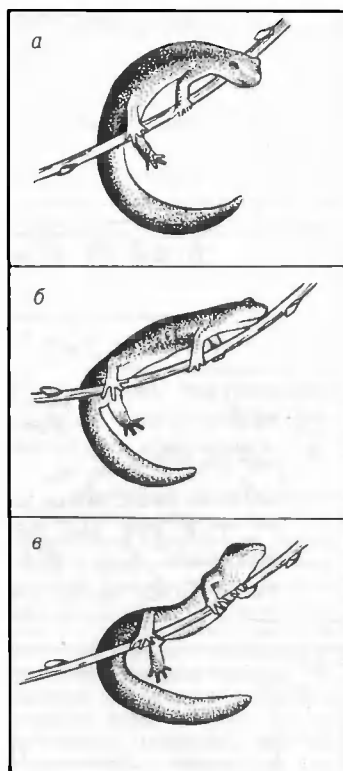
наблюдать их танцы в течение 17 часов. Существует ток несколько дней. Углозубы лишь изредка прерывают танец и уплывают в глубь водоема, но вскоре возвращаются. Ток затухает после того, как самки отложат икру. Откладывает самка икру на тех веточках или стеблях травы, на которых танцевали самцы-углозубы.

Каково назначение брачного танца самцов сибирского углозуба? Во время брачных игр танцующий углозуб обвивает хвостом и удерживает внизу под собой другого углозуба, видимо, нетанцевавшего. Это явление характерно для брачного танца и, вероятно, служит подтверждением, что у земноводных с наружным оплодотворением хвост служит для удержания самки.

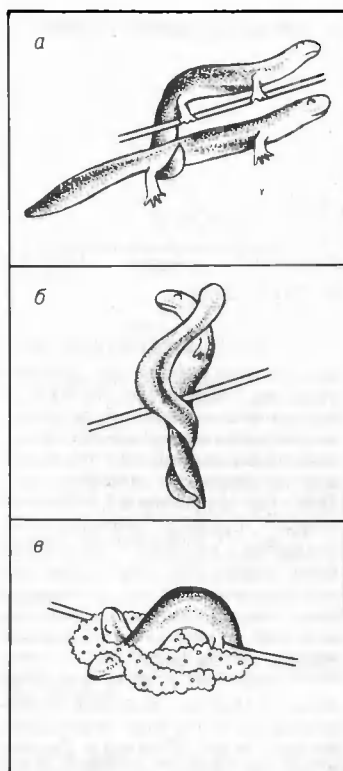
Мы наблюдали, как самка откладывала икру в естественных условиях: температура воды была 12,5 и воздуха — 24°. Углозубы находились на веточке ивы на глубине примерно 5 см от поверхности воды. Самец сидел неподвижно а самка находилась под ним, брюшком вверх. При этом самец, видимо, удерживал самку на весу хвостом. Отложив икру, самка перевернулась в обычное положение и медленно уплыла в глубину водоема. Через 20 секунд самец также покинул место кладки икры. Примерно в 3 см от места кладки икры в позе танцующего находился второй самец, сидевший неподвижно и не принимавший участия в процессе кладки икры.

Интересно, что в Западной Сибири характер брачных игр сибирского углозуба отличается от такового в других частях ареала. Ю. М. Коротков так описывает откладку икры у углозубов в Приморском крае: «самка углозуба укрепились на стебле травы под водой и сделала несколько волнообразных движений телом, после чего к ней устремилось 17 самцов (почти все находившиеся в водоеме). Между самцами завязалась драка, при которой пострадали пальцы у всех дерущихся особей».

По наблюдениям Ю. Б. Пу-



Различные позы в брачном танце самца сибирского углозуба: а — характерная, обычная поза: тело изогнуто по полукружности, голова опущена вниз, хвост подогнут; б — лежит плашмя, параллельно веточке; в — заваливается на бок.



Брачные позы сибирского углозуба: а и б — самец обвивает хвостом самку и удерживает ее под собой; в — положение самки во время откладывания икры.

кинского, в долине р. Бикин углозубы собираются группами в бочажинах на звериных тропах, в небольших ямах, канавах и т. д. Обычно около одной самки собираются 3—4 (редко до 10) самцов. Самцы как бы в медленном хороводе, не обращая внимания друг на друга, по вытянутому эллипсам кружатся вокруг самки. Это происходит в верхних слоях воды, примерно в 10 см от поверхности. Самка, находящаяся в центре круга, обычно держится головой вверх под углом примерно 45° к поверхности воды. При этом, едва перебирая лишь передними лапами, она медленно кружится вокруг вертикальной оси, оставаясь сверху спиной. Самцы же свою орбиту постоянно меняют, но во всех

случаях оказываются животом в сторону самки.

Таким образом, отдельные элементы брачных игр, например танцы самки, кружение в хороводе вокруг самки самцов, драки самцов, характерные для Дальнего Востока, в Западной Сибири не наблюдаются.

Вероятно, что существенные различия в брачных играх углозубов на Дальнем Востоке и в Западной Сибири отражают какие-то глубокие микроэволюционные различия этого вида в разных частях его ареала. Указывает ли брачное поведение сибирского углозуба в данном случае на существование двух разных форм под одним сходным внешне морфологическим обликом, покажут дальнейшие исследования.

<sup>1</sup> Коротков Ю. М. «Зоологический журнал», 1977, т. 56, вып. 8, с. 1258.

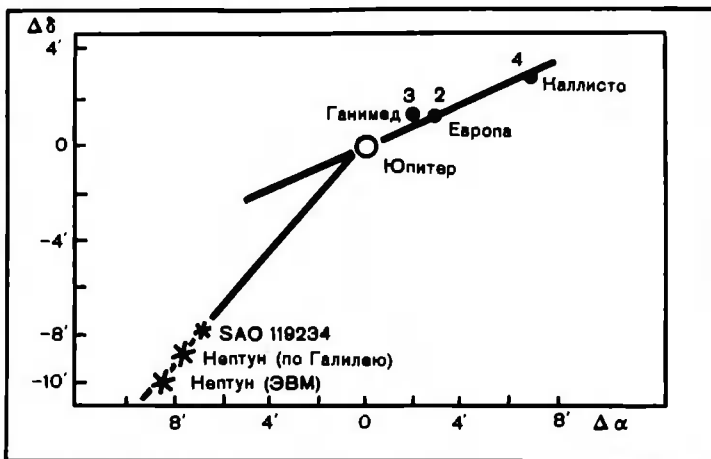
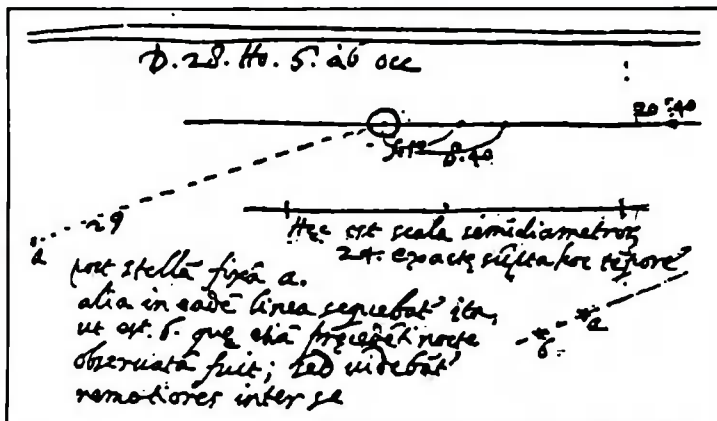
## Астрономия

## Галилей видел Нептун в 1612 году

Спутники Юпитера, кольца Сатурна, пятна на Солнце, горы на Луне, фазы Венеры — это далеко не полный перечень открытий Галилео Галилея, впервые применившего телескоп для астрономических наблюдений. Но оказывается, Галилей видел планету, официальное открытие которой состоялось лишь через 234 года после его наблюдений. Этой планетой был Нептун, история открытия которого полна драматизма. Напомним ее вкратце.

До 1781 г. были известны лишь планеты, видимые невооруженным глазом: Меркурий, Венера, Марс, Юпитер и Сатурн. В конце XVIII в. английский астроном У. Гершель изготавливает телескопы превосходного качества и с их помощью систематически наблюдает звездное небо. В 1781 г. он замечает «звезду», у которой с трудом различим маленький зеленоватый диск: это новая планета — Уран, обращающаяся вокруг Солнца с периодом 84 года по орбите, лежащей за Сатурном. Подняв старые наблюдения, астрономы обнаружили, что они видели Уран и раньше, но принимали его за звезду и неоднократно, почти в течение целого столетия, определяли ее координаты. Когда по этим координатам стали вычислять орбиту Урана, оказалось, что даже после учета возмущений от всех известных тогда планет, его движение отклоняется от расчетного. Причиной могло быть возмущающее действие со стороны еще неизвестной планеты, движущейся за орбитой Урана.

К середине XIX в. реальной стала проблема определения координат неизвестной планеты по отклонениям в движении Урана. Эта громоздкая



Страница журнала наблюдений, в котором Галилей отметил положение Нептуна (сверху). Расчитанное на ЭВМ положение Юпитера, его спутников, звезды SAO 119234, находящейся вблизи Нептуна, и Нептуна [в 23 ч всемирного времени 28 января 1619 г.];  $\Delta\alpha$  и  $\Delta\delta$  — расстояние объектов от Юпитера по прямому восхождению и склонению.

математическая задача была независима и почти одновременно решена французским астрономом У. Лавье и английским — Дж. Адамсом. 23 сентября 1846 г. немецкий астроном И. Галле нашел предполагаемую

планету на расстоянии всего лишь  $1^\circ$  от той точки неба, которую указал ему Лавье по своим вычислениям. Новую планету назвали Нептун. Это открытие по праву считается одним из самых блестящих достижений небесной механики.

Период обращения Нептуна вокруг Солнца около 165 лет, так что со времени ее открытия планета не совершила и одного полного оборота. Это обстоятельство значительно усложняет построение математической теории движения Нептуна, которая необходима хотя бы для того, чтобы обнаружить возмущения

со стороны более далеких, не открытых пока планет. Примером успешного построения такой теории служит все тот же Уран. Исследование неправильностей в его движении, оставшихся необъясненными после открытия Нептуна, привели в 1930 г. к открытию занептуновой планеты — Плутона. Пока это самая далекая планета Солнечной системы, но нельзя поручиться, что за Плутоном нет тел, которые могут проявить себя, возмущая движения Нептуна. Поэтому необходимо изучить перемещения этой планеты за возможно больший промежуток времени.

Такими соображениями руководствовались астроном Паломарской обсерватории (США) Ч. Коваль и профессор истории науки из университета в Торонто (Канада) С. Дрэйк, когда они сравнивали зарисовки и записи из журнала наблюдений Галилея с положением планет, рассчитанным на современной ЭВМ «назад», в XVII в. И вот, что им удалось обнаружить: наблюдая спутники Юпитера 28 декабря 1612 г. и 28 января 1613 г., Галилей зарисовал рядом с Юпитером «звездочку», положение которой почти точно совпадает с расчетным положением Нептуна. Разумеется, диска этой планеты, имеющего видимый диаметр 2",4, Галилей заметить не мог, так как его телескоп давал угловое разрешение ~1'.

Между 28 декабря 1612 г. и 28 января 1613 г. произошло очень редкое событие — затмение Нептуна диском Юпитера. Однако Галилей не отметил в своем журнале положение Нептуна в момент его наибольшего сближения с Юпитером, возможно, не желая вносить путаницу в расположение спутников Юпитера, движение которых он изучал.

Любопытно, что до открытия Нептуна в 1846 г. такое же тесное его сближение с Юпитером произошло еще один раз — в сентябре 1702 г. В то время телескопические наблюдения Юпитера проводились уже достаточно широко, и, возможно, где-нибудь сохранились записи астрономов того време-

ни, в которых отмечено положение Нептуна (до открытия которого оставалось еще 142 года!). Обнаружение этих записей имело бы большое значение для уточнения орбиты Нептуна.

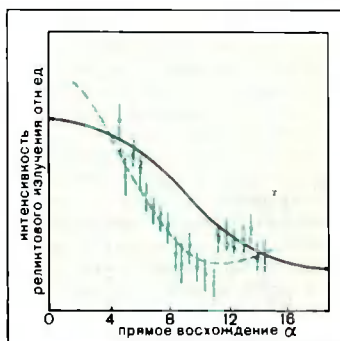
**В. Г. Сурдин,**  
кандидат физико-математических наук  
Москва

Астрофизика

**Обнаружена крупномасштабная анизотропия реликтового излучения**

Измерения, проведенные в радиодиапазоне, показали, что наш мир заполнен не только веществом, но и излучением, которое является отголоском горячей стадии эволюции Вселенной. Наблюдения реликтового излучения<sup>1</sup> показывают, что оно в высшей степени однородно и изотропно. Однако, согласно современным космологическим моделям, должны существовать небольшие нарушения однородности и изотропии реликтового излучения, которые проявляются как флуктуации его температуры в зависимости от направления наблюдения. Эти флуктуации могут быть вызваны первичными неоднородностями в распределении плотности и скорости вещества во Вселенной, причем масштаб этих неоднородностей может быть как меньше горизонта<sup>2</sup>, так и больше его. Угловой масштаб флуктуаций связан с линейными масштабами неоднородностей.

Новый эксперимент по обнаружению анизотропии реликтового излучения был выполнен итальянскими специалистами



Анизотропия реликтового излучения (в относительных единицах); по горизонтальной оси отложено прямое восхождение областей наблюдения (эваториальная координата  $\alpha$ ). Черная кривая соответствует первой гармонике  $A \cos \theta$ , цветная — сумме первой и второй гармоник:  $A \cos \theta + B \sin^2 \theta$ , где  $\theta$  — угол между направлением движения Земли и направлением, в котором проводится наблюдение; амплитуда квадрупольной составляющей  $B$  примерно в три раза меньше амплитуды первой гармоники  $A$ . Точки — экспериментальные данные.

ми Р. Фаббри, И. Гуиди, Ф. Мельхиори и В. Натале (Флорентийский университет). В эксперименте использовался инфракрасный приемник излучения, чувствительный в диапазоне длин волн 0,5—5 мм, который был поднят с помощью баллона на высоту ~40 км. Наблюдения охватили область неба над галактической плоскостью, а также вблизи нее. Статистическая обработка результатов подтвердила ранее уже известный факт, что наше Солнце вместе с Землей движется в направлении созвездия Льва со скоростью порядка 300 км/с, и именно это движение дает основной вклад в анизотропию реликтового излучения, которая описывается так называемой первой гармоникой.

Однако наибольший интерес представляют данные о крупномасштабной анизотропии микроволнового фона. Авторы подчеркивают, что изменение температуры этого фона в разных точках неба нельзя описать, используя лишь первую гармонику; необходимо учитывать квадрупольную составляющую, связанную с крупномас-

<sup>1</sup> Подробнее о реликтовом излучении см.: Зельдович Я. Б., Сюняев Р. А. Лауреаты Нобелевской премии 1978 г. По физике — А. Пензиас и Р. Вильсон. — Природа, 1979, № 1, с. 101.

<sup>2</sup> Подробнее о горизонте см.: Чернин А. Д. Реликтовое излучение, бесконечность и горизонт. — Природа, 1979, № 3, с. 44.

<sup>1</sup> Nature, 1980, v. 287, № 5780, p. 311.

штабной анизотропией реликтового излучения. Согласно современным моделям космологии, крупномасштабная анизотропия может быть вызвана общим анизотропным расширением Вселенной, а также возможным существованием длинноволновых возмущений плотности, превышающих горизонт наблюдателя. Кроме того, она может быть связана с наличием гравитационных волн, длина которых больше 100 Мпс.

Однако, как отмечают сами авторы, наблюдениям был охвачен не столь большой участок неба, чтобы считать обнаружение квадрупольной составляющей реликтового излучения абсолютно надежным.

Physical Review Letters, 1980, v. 44, № 23, p. 1563 (США).

#### Физика

### Четвертая $\Upsilon$ -частица

Стали известны уточненные результаты экспериментов по изучению процесса электрон-позитронной аннигиляции с образованием адронов. Эксперимент проводился на встречных электрон-позитронных пучках (установка «CESR», Корнеллский университет, США)<sup>1</sup>.

Ранее обе работавшие здесь группы наблюдали три узких резонанса на кривой зависимости вероятности процесса аннигиляции от энергии сталкивающихся электронов и позитронов. Эти резонансы были отождествлены с семейством  $\Upsilon$ -частиц ( $\Upsilon^1$ ,  $\Upsilon^2$ ,  $\Upsilon^3$ )<sup>2</sup>. Кроме того, был обнаружен четвертый резонанс, соответствующий еще одной частице этого семейства —  $\Upsilon^4$  с массой  $\sim 10,55$  ГэВ. Его ширина составляет примерно 10 МэВ, что заметно превышает разрешающую способность установок (4,7 МэВ). Это отличает  $\Upsilon^4$  от ранее открытых частиц  $\Upsilon$ -семейства: регистрируемая

в эксперименте ширина соответствующих им резонансов совпадала с разрешающей способностью установки, т. е. на самом деле эти резонансы даже уже, чем наблюдалось в опытах. Квантовая теория связывает ширину резонанса с временем жизни соответствующей частицы: чем резонанс уже, тем стабильнее частица. Исходя из этого  $\Upsilon^4$  должен иметь меньшее время жизни по сравнению со своими собратьями. Иными словами,  $\Upsilon^4$  должны появиться новые способы распада, отсутствующие у сравнительно долгоживущих  $\Upsilon^1$ ,  $\Upsilon^2$  и  $\Upsilon^3$ .

$\Upsilon$ -мезоны рассматриваются как связанные состояния кварк-антикварковой пары с квантовым числом — «прелестью» (b-кварки). Так как знаки всех квантовых чисел у кварка и антикварка противоположны, то сами  $\Upsilon$ -мезоны «прелестью» не обладают. Большая ширина резонанса, соответствующего  $\Upsilon^4$ -мезону, означает, по-видимому, что он может распадаться на частицы с открытой «прелестью», состоящие из обычного и b-кварка. Массы таких частиц определяются в основном массой тяжелого b-кварка; из-за закона сохранения энергии они не могли появиться в распадах предыдущих  $\Upsilon$ -мезонов.

Открытие гораздо более нестабильного  $\Upsilon^4$ -мезона — лишнее подтверждение правильности наших представлений о строении элементарных частиц, оно позволяет оценить массу «прелестного» b-кварка ( $\sim 5$  ГэВ). Сейчас ведутся эксперименты по прямому наблюдению «прелестных» мезонов. Так, в 1979 г. группа физиков из Франции, Англии и США, работавших в ЦЕРНе, наблюдала частицу, возможно, принадлежащую к этому семейству. В опытах пучок ускоренных пионов падал на бериллиевую мишень; возникающие при этом частицы изучались с помощью спектрометра. В спектре масс комбинации частиц  $J/\psi + \text{каон} + \text{пионы}$  был обнаружен резонанс<sup>3</sup>, соответствующий частице с массой 5,3 ГэВ. Однако этот

результат пока не подтвержден другими группами.

CERN Courier, 1980, v. 20, № 4, p. 151 (Швейцария).

#### Физика

### Пущен первый источник синхротронного излучения рентгеновского диапазона

30 июня 1980 г. в первом в мире специализированном источнике синхротронного излучения рентгеновского диапазона «SRFS» (Synchrotron Radiation Source) в Дарсбери (Англия) накоплен электронный ток в 40 мА.

Как известно, одним из наиболее существенных факторов, мешающих ускорению электронов в накопительных кольцах ускорителей, является так называемое синхротронное излучение, возникающее при движении частиц по криволинейной траектории. Длина волны этого излучения зависит от энергии летящей частицы и радиуса ее поворота. Для небольших накопителей электронов с энергией частиц порядка сотен МэВ, а также для синхротронов длина волны синхротронного излучения попадает в диапазон вакуумного ультрафиолета. При энергиях частиц порядка нескольких ГэВ — это уже рентгеновское излучение.

Мощность синхротронного излучения современных накопителей в указанных диапазонах оказалась на много порядков выше, чем мощность излучения любых других рентгеновских источников. Кроме того, это излучение обладает сплошным спектром, позволяющим выбрать из него необходимую длину волны. Весьма важна также характерная прерывистая во времени структура излучения, обусловленная пролетом короткого густка накопленных электронов мимо детектора, и высокая степень его поляризации.

Эти свойства синхротронного излучения и обусловили огромный интерес к нему во всем мире. С конца 60-х годов начинается использование синхротронного излучения синхро-

<sup>1</sup> Об установке «CESR» и первых полученных на ней результатах см.: Природа, 1980, № 8, с. 107.

<sup>2</sup> Подробнее о  $\Upsilon$ -мезонах см.: Природа, 1979, № 2, с. 105.

<sup>3</sup> CERN Courier, 1979, v. 19, № 6, p. 249.

тронов и накопителей электронов и позитронов, построенных для исследований по физике высоких энергий. Возникают крупные центры по использованию синхротронного излучения<sup>1</sup>: Станфорд (США) — накопитель «SPEAR», Гамбург (ФРГ) — накопитель «DORIS», Фраскати (Италия) — накопитель «ADONE», Орсе (Франция) — накопитель «DCI».

В СССР исследования с применением синхротронного излучения ведутся на синхротронах в Москве, Ереване, Томске. Наибольший размах эти работы приобрели в Институте ядерной физики СО АН СССР (Новосибирск) на накопителях «ВЭПП-2» и «ВЭПП-3»<sup>2</sup>.

В настоящее время фронт исследований с помощью синхротронного излучения чрезвычайно широк и охватывает различные области физики, химии, биологии и медицины. Результаты, полученные к настоящему времени, столь значительны, что в ряде стран мира проектируются и строятся накопители электронов, специально предназначенные для получения синхротронного излучения. Первым таким специализированным источником в рентгеновском диапазоне энергий и явился пущенный 30 июня 1980 г. «SR5» в Дарсбери. Его проектные параметры: энергия 2,0 ГэВ, ток 1 А.

В Институте атомной энергии им. И. В. Курчатова в настоящее время сооружается первый в СССР специализированный источник синхротронного излучения. Он состоит из двух накопителей — малого (энергия 450 МэВ) источника синхротронного излучения в диапазоне вакуумного ультрафиолета и большого (2,5 ГэВ) источника в рентгеновском диапазоне. Инжектором для малого накопителя будет служить уже действующий линейный ускоритель элект-

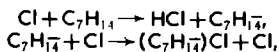
ронов «Факел» (60 МэВ). Разработчиком и изготовителем этих накопителей является ИЯФ СО АН СССР. Пуск малого накопителя намечен на 1982 г., большого — на 1985 г.

**А. Н. Артемьев,**  
кандидат физико-математических наук  
Москва

#### Физика

### Охлаждение вызывает взрыв

В. А. Бендерский, Е. Я. Мищенко, А. А. Овчинников и Г. Г. Филиппов (Институт химической физики АН СССР) открыли цепную экзотермическую реакцию в смеси метилциклогексана с хлором (с выделением 1,2 эВ энергии на один элементарный акт реакции):



скорость протекания которой при низких температурах (60 К) на несколько порядков выше, чем при более высоких. Для начала реакции концентрация радикалов должна была составлять  $(3-7) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ , что достигалось освещением смеси светом азотного лазера (337 нм). Рост скорости реакции оказался настолько резким, что при температуре меньше 60 К происходило взрывное воспламенение смеси.

Смесь состояла из равных молярных количеств реагентов и при температуре меньше 140 К представляла стеклообразное твердое вещество, которое было помещено в плоскую кварцевую кювету с расстоянием 0,1 см между передней и задней стенками. Взрыв происходил спустя 1-8 мин после освещения передней стенки образца светом лазера. В поверхностном слое начиналась фотодиссоциация молекул хлора, сопровождавшаяся накоплением радикалов  $\text{C}_7\text{H}_{13}^{\cdot}$ . Когда их поверхностная концентрация достигала критического значения, скорость реакции резко возрастала, поверхностный слой смеси воспламенялся и реакция распространялась в глубь образца со скоростью  $\sim 10^2 \text{ см/с}$ ; при этом сама поверхность образца и при-

легающая к ней стенка кюветы разрушались.

Переход от медленной реакции к взрыву имел место и тогда, когда образец вначале был активирован светом при более высоких температурах (60-80) К, а затем уже охлаждался до температуры меньше 60 К. Критическая температура взрывного протекания реакции оказывалась тем выше, чем дольше активировался образец.

Взрыва не происходило, если активированные светом образцы отжигались вблизи точки плавления или когда концентрация хлора была примерно в 3 раза меньше молярной.

По мнению авторов, взрывное протекание реакции обусловлено накоплением активных радикалов в освещаемом поверхностном слое и последующим их образованием в ходе распространения фронта реакции. Увеличение скорости реакции при низких температурах вызвано наличием микротрещин, понижающих порог начала реакции.

Письма в ЖЭТФ, 1980, т. 32, вып. 6, с. 429-432.

#### Физика

### Звук переносит электронно-дырочные капли

В 1975 г. Л. В. Келдыш и С. Г. Тиходеев установили, что звуковая волна достаточно большой амплитуды и малой длины, распространяющаяся в кристалле полупроводника, может увлечь за собой каплю электронно-дырочной жидкости<sup>1</sup>, создавая, таким образом, механизм внутрикристаллической ее транспортировки<sup>2</sup>. Как показали их оценки, для получения, скажем, в полупроводнике германия потен-

<sup>1</sup> Подробнее об этих установках см.: А з и м о в Я. И., Хо з е В. А. Тяжелые кварки и лептоны. — Природа, 1979, № 5, с. 9.

<sup>2</sup> Подробнее об этих установках см.: А м у с ь я М. Я., Мо ку л ь с к а я Т. Д. Первый советско-английский семинар по синхротронному излучению. — Природа, 1979, № 7, с. 103.

<sup>1</sup> Подробнее об электронно-дырочной жидкости см.: Ба га е в В. С., По к р о в с к и й Я. Е. Электронно-дырочные капли в полупроводниках. — Природа, 1978, № 3, с. 3.

<sup>2</sup> Келдыш Л. В., Тиходеев С. Г. Письма в ЖЭТФ, 1975, т. 21, с. 582.

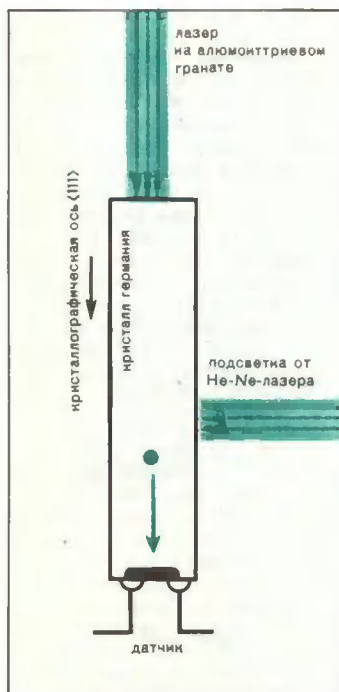


Схема эксперимента по обнаружению переноса электронно-дырочных капель звуком. Цветной кружок — движущаяся электронно-дырочная пара.

циальной ямы с нужными для локализации электронно-дырочных пар параметрами требуется звуковая волна с перепадом давления в ней  $\sim 2 \cdot 10^3$  кбар/см.

Недавно В. С. Багаев, М. М. Бонч-Осмоловский, Т. И. Галкина, Л. В. Келдыш и А. Г. Поляков (Физический институт им. П. Н. Лебедева АН СССР) получили первое экспериментальное подтверждение того, что такой перенос капель звуком действительно имеет место. Перенос электронно-дырочной жидкости вдоль оси  $\langle 111 \rangle$  монокристалла очень чистого германия (концентрация примесей  $\sim 10^{12}$  атомов в кубическом сантиметре) при температуре 1,7—2,5 К осуществлялся волной сжатия с перепадом давления  $\sim 10$  кбар/см. Звуковая волна создавалась путем облучения торца кристалла германия мощным световым импульсом длитель-

ностью  $\sim 10$  нс от лазера на алюмоиттриевом гранате (1,06 мкм). Воздействие столь короткого, но мощного светового импульса вызывало чрезвычайно быстрый разогрев тонкого слоя вблизи торца, сопровождавшийся столь же быстрым его тепловым расширением. В свою очередь расширяющийся слой посылал вдоль оси  $\langle 111 \rangle$  кристалла звуковой импульс, который распространялся к противоположному торцу, где регистрировался датчиком. Для образования на пути волны капли электронно-дырочной жидкости кристалл облучался сбоку лучом He-Ne-лазера (1,52 мкм). Расстояние от облучаемой области до торца с датчиком меняли от нуля до 4 мм; при больших расстояниях эффект не наблюдался. Когда это расстояние было меньше 4 мм (длина кристалла вдоль оси  $\langle 111 \rangle$  8,2 мм), датчик регистрировал два следовавших друг за другом сигнала: один приходил со скоростью продольной звуковой волны (5530 м/с), другой — со скоростью поперечной волны (3200 м/с).

Подтверждением того, что звук переносил именно электронно-дырочные капли, служила специфическая температурная зависимость амплитуды сигналов (амплитуда пропорциональна концентрации неравновесных носителей в движущейся вместе со звуковой волной потенциальной яме). Эта зависимость оказалась типичной для изменения числа электронно-дырочных пар в жидкой фазе на пороге их конденсации; с уменьшением температуры ниже 2,5 К их концентрация, а следовательно, и амплитуда сигналов резко возрастала.

Письма в ЖЭТФ, 1980, т. 32, вып. 5 с. 356—360.

Физика

### «Исчезающие зеркала»

Г. А. Аскарьян и Б. М. Манзон (Физический институт им. П. Н. Лебедева АН СССР) предложили и экспериментально исследовали применение металлизированных полимерных



Получение импульсов различной длительности с крутым фронтом при использовании «исчезающего зеркала».

пленок в качестве нового класса зеркал, быстро испаряющихся при попадании на них достаточно мощного светового излучения. В качестве таких зеркал может быть использована, например, обычная лавсановая пленка, покрытая слоем алюминия толщиной в несколько сот ангстрем<sup>1</sup>.

При большой мощности светового потока такое пленочное зеркало лишь в начале светового импульса хорошо отражает ( $K_{отр} \sim 95\%$ ) падающее на него излучение, затем очень быстро тонкий металлический слой испаряется и отражение прекращается.

Такие зеркала могут широко применяться в лазерной технике. Например, пропускающая и отражающая мощный лазерный импульс от пленки, можно получать импульсы различной длительности с крутым фронтом. Еще больший эффект дает их применение в качестве зеркал самого лазерного резонатора. Исчезая, такое зеркало приводит к резкому уменьшению добротности резонатора, прекращая генерацию излучения, т. е. служит своеобразным оптическим затвором. Использование такого затвора позволяет избавиться от повторных импульсов, которые возникают, если для

<sup>1</sup> Природа, 1980, № 12 с. 92.



изменения (модуляции) добротности применяется краситель. Кроме того, теперь не возникает свободная генерация излучения, следующая за гигантским импульсом, когда для модуляции добротности используются методы, позволяющие лишь включить добротность резонатора.

Если применить такое «исчезающее зеркало» в качестве выходного зеркала лазера с модулированной добротностью, то можно получить более короткие и мощные импульсы, чем при обычной модуляции добротности.

Письма в ЖТФ, 1980, т. 6, № 8, с. 467.

#### Техника

### Обработка поверхностей с помощью электронных ускорителей

В Институте сильноточной электроники СО АН СССР (Томск) исследуется возможность промышленного использования сильноточных наносекундных электронных ускорителей для термической обработки металлических поверхностей, а также для поверхностной стерилизации продуктов пищевой, фармацевтической и косметической промышленности. Как показали эксперименты, обработка поверхности пучком электронов низкой энергии выгодно отличается от существующих лазерных и радиационных методов меньшей стоимостью ускорителей, их экономичностью, малогабаритностью и простотой управления. По сравнению с лазерами ускорители позволяют получать однородные электронные пучки большего сечения, просто регулировать энергию и длительность импульса, обладают большим коэффициентом полезного действия. Эти устройства, в отличие от стандартных  $\gamma$ -изотопных источников радиации и больших ускорителей высоких энергий, обеспечивают поверхностное поглощение больших доз на один импульс пучка и не создают объемной активации объектов.

Особенность таких сильноточных ускорителей — большая плотность электронного тока ( $1-3 \cdot 10^3$  А/см<sup>2</sup>) — достигается за счет применения диодов со взрывной эмиссией электронов. В результате ускоритель работает в импульсном режиме, «выстреливая» электронные сгустки длительностью 20—50 нс.

Оказалось, что для термической обработки металлических поверхностей больше всего подходят электронные пучки с энергией 10—20 кэВ. В экспериментах с медью при энергии пучка 15 кэВ, длительности импульса 20 нс и максимальной плотности энергии  $2,5 \cdot 10^7$  Вт/см<sup>2</sup> нагрев поверхностного слоя толщиной  $\sim 10^{-4}$  см происходил со скоростью  $10^{11}$  град/с. Нагрев сопровождался поверхностным пластическим течением металла, возрастанием на 20% его микротвердости и увеличением плотности дислокаций до  $10^{10}$  см<sup>-2</sup>. В действие электронного пучка на поверхность кремния с имплантированными ионами фосфора или мышьяка восстанавливало нарушенное при имплантации кристаллическое состояние, а при больших дозах имплантации приводило к возникновению приповерхностного р-п-перехода.

Для поверхностной стерилизации использовался пучок электронов с энергией 150 кэВ. В качестве объектов, подлежащих уничтожению, был взят ряд микроорганизмов (сенные палочки, стафилококки, вибрионы). Как показали результаты, электронный пучок более эффективен, нежели обычные  $\gamma$ -изотопные источники, при несравненно меньшем времени обработки поверхности.

Доклады АН СССР, 1980, т. 235, № 5, с. 1120—1122; № 6, с. 1383—1386.

#### Физика атмосферы

### Гамма-излучение и волны в атмосфере

А. М. Гальпер, В. Г. Кириллов-Угрюмов, Н. Г. Лейков, Б. И. Лучков (Московский ин-

женерно-физический институт) обнаружили, что интенсивность атмосферного  $\gamma$ -излучения с энергией больше 40 МэВ испытывает короткопериодические колебания с относительной амплитудой около 10%. Проанализировав свои данные, полученные в последние годы с помощью аэростатов, поднятых на высоту 30—40 км, они установили, что основной период этих колебаний составляет около 5 мин. Это значение в точности соответствует характерному периоду тах называемых колебаний солнечного диаметра<sup>1</sup>. Отсюда вытекало заманчивое предположение, что в межпланетном пространстве существует быстродействующий, но пока неизвестный механизм передачи солнечных колебаний к Земле. Однако, как выяснилось в последнее время, колебания потока  $\gamma$ -излучения можно объяснить и земными причинами — например, волнообразным движением воздушных масс.

Действительно, хорошо известно, что плотность воздуха, сила и направление ветра и другие свойства атмосферы периодически изменяются как вблизи земной поверхности, так и в верхней атмосфере. Это явление называют внутренними гравитационными волнами. Их относительная амплитуда обратно пропорциональна корню квадратному из плотности воздуха, а периоды колебаний на высоте 30—40 км в средних широтах несколько меньше 4,8 мин, а в тропиках — 4,5 мин. Изучение волнообразных структур в серебристых облаках показало, что внутренние гравитационные волны, распространяющиеся в горизонтальном направлении, имеют длину 10—20 км.

На рассматриваемой высоте  $\gamma$ -кванты рождаются в основном при распаде нейтральных пионов, которые, в свою очередь, образуются при ядер-

Речь идет о колебаниях условной границы поверхности Солнца. Согласно данным измерений советских и зарубежных астрономов в колебаниях солнечного диска обнаружены периоды от 160 до 5 мин. Механизм этого явления пока неясен.

ных взаимодействиях космических лучей с частицами воздуха. При этом интенсивность  $\gamma$ -излучения в заданном направлении пропорциональна толщине слоя атмосферы над детектором. Отсюда видно, что периодические колебания плотности воздуха, вызванные прохождением внутренних гравитационных волн, должны приводить к колебаниям интенсивности  $\gamma$ -излучения. Однако пока данные прямых наблюдений внутренних гравитационных волн в стратосфере довольно скудны.

По-видимому, влияние внутренних гравитационных волн сказывается также на результатах измерений потока вторичных космических частиц в стратосфере. Кроме того, эти волны могут искажать результаты наблюдений внеземных  $\gamma$ -источников (за счет быстрых и неравномерных по различным направлениям вариаций «фонового», т. е. атмосферного,  $\gamma$ -излучения). Не исключено, что их роль может оказаться заметной в вариациях вторичных компонент космических лучей на уровне моря и в астрономических наблюдениях, где важен учет прозрачности атмосферы.

Письма в ЖЭТФ, 1980, т. 31, с. 693—696.

#### Вирусология

### Небные миндалины — новый источник интерферона

В настоящее время почти единственным средством лечения вирусных инфекций является интерферон, который стимулирует образование клетками антивирусного белка и тем самым защищает их от болезнетворного действия самих вирусов<sup>1</sup>. Испытания, проведенные на животных и в клинике, показали его несомненную терапевтическую ценность при лечении

не только вирусных, но и онкологических заболеваний.

Однако широкому введению интерферона мешает его крайне ограниченное производство, так как препарат получают главным образом из клеток крови доноров. Поэтому во многих странах ведутся интенсивные поиски новых источников интерферона.

Исследования, проведенные Г. Л. Тохадзе, Л. Я. Поволоцким, Л. Д. Кривохатской, Ф. И. Ершовым и А. С. Новохатским (Институт вирусологии АМН СССР), М. Сугияма с сотрудниками (Япония) и Дж. Вильсоном с сотрудниками (США), показали, что интерферон можно получать из клеток небных миндалин, которые удаляются при хронических тонзиллитах.

Клетки миндалин выделяли путем щадящей трипсинизации<sup>2</sup>, что обеспечивает их высокую устойчивость и продуктивность. Из одной миндалины в среднем получали  $5 \cdot 10^8$  жизнеспособных клеток. Повышенной выработки интерферона удалось добиться в результате предварительной инкубации клеток при 37°С в специальной среде, содержащей телячью сыворотку. В качестве стимуляторов выработки интерферона были успешно использованы не только вирусы, но и даунитчатые РНК фага, а также полиинозиновая и полицитидиловая кислоты, которые повышали выход этого препарата, если интерферон вырабатывался в среде, содержащей поликатион ДЭАЗ-декстран.

Установлено, что интерферон клеток миндалин близок по своим биологическим свойствам лейкоцитарному интерферону, используемому в клиниках. Это обстоятельство может облегчить применение интерферона клеток миндалин для терапии. Проведенный расчет показывает, что небные миндалины одного человека могут служить источником получения

более 100 000 противовирусных единиц<sup>3</sup> интерферона.

Интерферон и его индукторы. М., Медицина, 1980, с. 102—110.



Биохимия

### Инсектицид из томатов

Энтомологи неоднократно отмечали гибель мелких насекомых, попадающих на листья некоторых видов дикого томата. Листья у этих растений покрыты многочисленными жесткими волосками, выделяющими токсические вещества.

Недавно американским исследователям из Университета Северной Каролины удалось изолировать и определить химическую структуру этого вещества, обладающего инсектицидным действием. Им оказался 2-тридеканон, относящийся к классу кетонов ( $\text{CH}_3\text{COC}_{11}\text{H}_{23}$ ).

Воздействуя на различных насекомых — вредителей томатов 2-тридеканон, синтезированным химическим путем, исследователи установили, что это вещество очень токсично: его смертельная концентрация для насекомых — 17,5 мг на 1 см<sup>2</sup> поверхности листа. Они определили также содержание 2-тридеканона в листьях у дикого и культурного томатов. У дикого томата содержание 2-тридеканона было достаточно высоким и в пересчете на единицу поверхности листа соответствовало тем значениям концентраций вещества, которые обладают инсектицидным действием. У культурных томатов содержание 2-тридеканона оказалось в 72 раза меньше, чем у дикого вида. Отсюда понятно, почему культурные сорта томатов чаще поражаются насекомыми.

Авторы предлагают два возможных пути практического применения вновь открытого инсектицида для защиты культурных томатов от насекомых-

<sup>1</sup> Подробнее об интерфероне см.: Кобринский Г. Д. Интерферон. — Природа, 1981, № 1, с. 20.

<sup>2</sup> Трипсинизация — обработка ткани трипсином, в результате разрушаются межклеточные перегородки и получают отдельные клетки.

<sup>3</sup> 1 единица интерферона — это то наименьшее его количество, которое способно обеспечить противовирусную защиту в системе клеток.

вредителей: выведение новых сортов с повышенным содержанием природного инсектицида путем скрещивания культурных форм томатов с диким видом, а также использование искусственно синтезируемого 2-тридеканона или его химических аналогов. Однако реализация этих возможностей допустима лишь после тщательной проверки действия 2-тридеканона на организм человека.

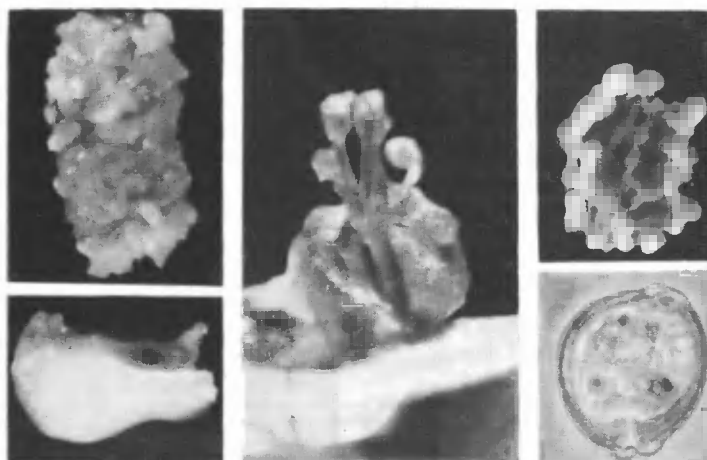
Science, 1980, v. 207, № 4433, p. 888—889 (США).

Физиология растений

**Цветущие растения женьшеня из культуры тканей**

Метод регенерации целых растений в культуре тканей дает возможность быстро и в больших количествах размножать единичные экземпляры растений без изменения их генотипа<sup>1</sup>. Применение этого метода имеет особое значение для сохранения и размножения таких редких и ценных лекарственных растений, как женьшень. Впервые зародышеобразные структуры в культуре изолированных тканей женьшеня были получены Р. Г. Бутенко с сотрудниками еще в 1968 г.<sup>2</sup> Однако до последнего времени регенерировать целые растения женьшеня из культуры изолированных тканей не удавалось. Недавно этого добились китайские исследователи из Института ботаники на Тайване, тщательно подбирая состав питательной среды.

В стерильных условиях они культивировали кусочки корня зрелого растения на питательной среде с агаром, содержащей сахарозу, минеральные соли, витамины и растительные гормоны (2,4-дихлорфеноксиусусную кислоту и кинетин), и



Регенерация цветущих растений женьшеня в культуре изолированных тканей: слева, сверху — скопление зародышей, развившихся из каллуса [увел. в 4 раза]; слева, внизу — отдельные зародыши [увел. в 30 раз]; в центре — цветонос с цветками, развившийся из изолированного зародыша [увел. в 3 раза]; справа, сверху — цветок с хорошо развитыми пыльниками [увел. в 7,5 раза]; справа, внизу — зрелая пыльца [увел. в 375 раз].

получили каллус — бесформенную клеточную массу. В период наиболее быстрого роста каллуса питательную среду заменили на свежую, в которую добавили изопентениладенин, а концентрации растительных гормонов уменьшили. На следующем этапе, когда шло формирование зародышей, состав питательной среды снова изменили, исключив кинетин и изопентениладенин, и вновь снизив концентрацию 2,4-дихлорфеноксиусусной кислоты. Зародыши, достигнув длины 2—3 мм, прекращали развиваться. Чтобы побудить их к дальнейшему развитию, зародыши были изолированы от каллуса и помещены на разбавленную в 2 раза основную питательную среду с добавлением бензиладенина и гибберелловой кислоты. Через некоторое время апикальная меристема (верхушечная образовательная ткань), расположенная между двумя семядолями зародыша, развивала цветонос с зонтиком из 3—5 цветков. Цветки были таких же размеров и строения,

как и у нормальных растений. Лишь у некоторых цветков количество тычинок было больше. Нормально развивалось и около 90% пыльцевых зерен.

Описанным способом цветущие растения женьшеня были получены за месяц культивирования ткани, в то время как в природе женьшень зацветает только через 3 года с момента прорастания семени.

Nature, 1980, v. 284, № 5754, p. 341—342 (Великобритания); Theoretical and Applied Genetics, 1980, v. 57, № 3, p. 133—135 (ФРГ).



Ботаника

**Угнетающее действие пыльцы**

За последние годы в Индии широко распространился сорняк американского происхождения *Parthenium hysterophorus* L., интенсивно вытесняющий как культурные, так и дикорастущие растения. У соседних с этим сорняком растений усыхают цветки, опадают еще незрелые плоды. При этом на листьях и цветках угнетенных растений обнаружены скопления пыльцы сорняка.

Индийские ботаники из Университета в Бангалоре установили, что причиной столь широкого распространения *P. hysterophorus* является угнетающее действие его пыльцы на прорастание пыльцы других растений: предотвращая опыле-

См.: Бутенко Р. Г., Попов А. С. Банк клеток растений — возможности и проблемы. — Природа, 1979, № 4, с. 3.

<sup>2</sup> Подробнее см.: Бутенко Р. Г., Шамина Э. Б. Клетка in vitro — модель развития растения. — Природа, 1970, № 12, с. 21.

ние и развитие плодов, сорняк препятствует их размножению. Сам же сорняк цветет практически круглый год, производя огромное количество пыльцы, которая разносится ветром и насекомыми на значительные расстояния.

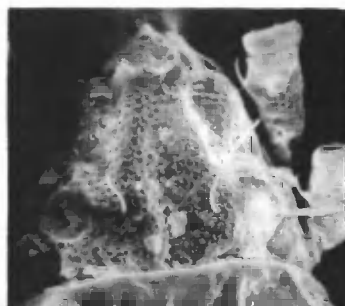
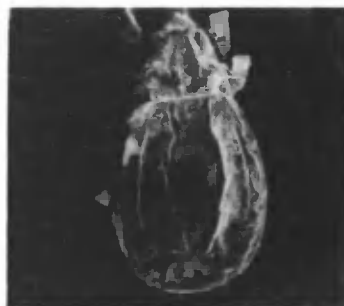
При анатомическом изучении цветков различных растений, которым на рыльца вместе с родственной пыльцой наносили пыльцу *P. hysterophorus*, исследователи наблюдали в большинстве случаев только прорастание пыльцы сорняка. Степень угнетения родственной пыльцы зависела от количества пыльцы сорняка и вида растения. Аналогичное действие оказывали и водные экстракты пыльцы сорняка. Индийские ботаники установили также, что и в условиях культуры у большинства исследованных растений прорастание пыльцы тормозится или предотвращается полностью под воздействием пыльцы сорняка и ее экстрактов. Наряду с этим отмечено, что пыльца сорняка, попадая на листья других растений, оказывает угнетающее действие на синтез хлорофилла. Хотя видимых симптомов пожелтения листьев не выявлено, содержание хлорофилла в них заметно снижается.

Таким образом, обнаружено новое явление — аллелопатическое<sup>1</sup> действие пыльцы. *New Phytologist*, 1980, v. 84, № 4, p. 739—746 (Великобритания).

#### Биология

### Мамонты и микрофауна

При любой новой находке мамонта возникает старый вопрос: почему наши «соседи по биосфере», сосуществовавшие с человеком десятки тысяч лет, довольно быстро вымерли на рубеже голоцена и плейстоцена? Повинен ли в их гибели человек или для этого были иные, в первую очередь климатические причины? Так формулируются две наиболее распространенные



Новые виды панцирных клещей из захоронения мамонта на р. Юрибей: вверху — *Neonothrus* sp. nova, внизу — *Svalbardia rostralis* sp. nova (общий вид и увеличенная верхняя часть).

точки зрения. В последние годы в нашей стране найдены и подробно исследованы два захоронения мамонтов: мамонтенок в верховьях р. Колымы<sup>1</sup> и взрослый мамонт на р. Юрибей на Гыданском п-ове. Из раскопов были отобраны образцы торфа и песка с растительными остатками. Анализ микрофауны из этих образцов дал весьма интересные результаты.

Известно, что по некоторым группам микрофауны, в том числе по остаткам панцирных клещей<sup>2</sup>, можно представить себе облик фауны в целом и экологическую обстановку того

времени. Из указанных захоронений мамонтов нами было отобрано свыше 90 экземпляров панцирных клещей — орибатид. Из-за плохой сохранности часть микрофауны оказалось невозможным определить до вида; часть относится к широко распространенным современным формам (*Ceratoppia bipilis*, *Trichoribates novus*), но некоторые виды с несомненностью принадлежат к неизвестным в современной фауне видам из родов *Neonothrus*, *Svalbardia*, *Ceratoppia*, *Diapterobates* и, видимо, к новому роду — *Tutoridens*. Найден и современный эндемик Сибири — вид *Parachipteria sibirica*.

Весь облик фауны — холодолюбивый; обнаруженные рода обычны ныне в северной Палеарктике. Невозможно с абсолютной уверенностью говорить, что найденные нами и частично описанные новые виды орибатид из захоронений мамонтов нигде в настоящее время в Сибири не встречаются, ибо почвенное население многих районов Северо-Востока Сибири, и в частности реликтовых степенных участков на севере Якутии, остается неизученным. Но о микрофауне почв Пале-

<sup>1</sup> Шило Н. А. Находка мамонта на ручье Киргилых в Магаданской области. — *Природа*, 1978, № 1, с. 18.

<sup>2</sup> Кривоулицкий Д. А., Друк А. Я., Ласковская Л. М. Использование панцирных клещей в биостратиграфии. — *Природа*, 1980, № 2, с. 112.

<sup>1</sup> От греч. «взаимно» и «страдание».

арктики известно уже столь много, что с уверенностью можно утверждать: если эти новые виды и живут еще где-то донныне, то только как редкие реликтовые формы. В изученных же нами «мамонтовых» отложениях эти виды были обильны и составляли не менее половины всех обнаруженных особей, а по числу видов — еще больше.

Современные панцирные клещи — группа исключительно устойчивая к любым антропогенным воздействиям; они остаются одним из последних реликтов в ландшафте, преобразованном человеком. Так что в изменении их фауны и возможной гибели отдельных видов человек вряд ли повинен. А это дает новые дополнительные факты в пользу гипотезы о естественных причинах гибели мамонтов из-за коренной ломки всей биоты на рубеже плейстоцена и голоцена в связи с изменением климата. Возможно, человек ускорил гибель этих гигантов, но не более того.

**Д. А. Криволицкий,**  
доктор биологических наук  
**А. Я. Друк**

Институт эволюционной морфологии и экологии животных им. А. Н. Северцова АН СССР  
Москва

## Медицина

### Лечение коронарного атеросклероза

Один из методов лечения коронарного атеросклероза (закупорки коронарных артерий) — хирургическое вмешательство: создается «обходный» путь для сердечного кровотока. Это достигается с помощью здорового кровеносного сосуда, который обычно берется из сосудов ног больного. Сосуд вшивают в здоровые участки закупоренной коронарной артерии выше и ниже места тромба. Такая операция весьма сложна и небезопасна, больной должен находиться в клинике не менее двух недель.

А. Грюнциг и его коллеги (Цюрихский университетский госпиталь, Швейцария) предложили новый метод лечения:

внутри заблокированного сосуда вводят баллон из поливинилхлорида, надувают воздухом и с его помощью прижимают атеросклеротическую бляшку к артериальной стенке. Через несколько секунд воздух выпускают и удаляют баллон из кровеносного сосуда. Прижаты к артериальной стенке атеросклеротические бляшки обычно не возвращаются в прежнее положение. Больной во время операции бодрствует, не подвергаясь воздействию общего наркоза, что делает операцию еще более безопасной, боли он при этом не испытывает. При проведении подобной операции пациенты находятся в госпитале в среднем не более двух дней. Если операция проходит успешно, больной уже не испытывает загрузочных болей и приток крови к сердцу заметно улучшается.

Всего с 1977 по 1980 гг. этой операции подверглись 300 пациентов — жителей Европы и Америки. Многие из них находятся под наблюдением врачей уже в течение года и чувствуют себя по-прежнему хорошо.

По мнению специалистов-кардиологов, операция, предложенная Грюнцигом, имеет большое будущее.

Science, 1980, v. 208, No 4448, p. 1127—1130 (США).

## Антропология

### Развенчание рамапитеков!

Одним из крупнейших достижений второй половины нашего столетия в области палеоантропологии и филогенетической истории человека считалось открытие ископаемых приматов, получивших название рамапитеков (*Ramapithecus*). Правда, первая находка была сделана значительно раньше — в 1934 г., когда американский антрополог Дж. Льюис обнаружил фрагмент верхней челюсти ископаемого примата в нижнеплиоценовых отложениях Сиваликских холмов (Индия) и описал его под названием рамапитека короткомордого. Автор обратил

внимание на ряд особенностей этой челюсти (небольшой клык, параболическая форма зубной дуги и др.), сближающих ее с человеческой. Однако в то время находка большого впечатления не произвела. Интерес к рамапитеку пробудился спустя почти 30 лет, когда Л. Лики в 1961 г. обнаружил в Кении в верхнемиоценовых отложениях обломок верхней челюсти ископаемого примата, которому дал название *Kenyanthropus wickeri*. Найденный фрагмент оказался очень сходным с первой находкой рамапитека из Сиваликских холмов. Абсолютный возраст кенияпитека 14 млн лет. Хотя Лики и дал этому примату отличное от рамапитека родовое наименование, он, однако, не отрицал сходства кенияпитека с рамапитеком.

В начале 60-х годов американские приматологи Э. Саймонс и Д. Пилбим, обстоятельно исследовав обе находки и выявив поразительное сходство между ними, посчитали необходимым отнести их к одному роду даемому наименованием *Ramapithecus punjabicus*. На основании глубокого сравнительно-анатомического анализа они нашли также настолько большое сходство между рамапитеками и австралопитековыми, что сочли возможным включить рамапитеков в семейство гоминид в качестве древнейших его представителей. Рамапитеков стали считать непосредственными предшественниками австралопитековых на эволюционной ветви, ведущей к человеку. К этому мнению присоединилось большинство антропологов. Значение этого открытия едва ли можно было переоценить: фактически было найдено важное «недостающее звено» между жившими 20—25 млн лет назад ископаемыми древесными человекообразными обезьянами — дриопитеками и перешедшими к двуголому хождению и использованию орудий австралопитековыми, древнейшие из которых жили около 5 млн лет назад.

Костные остатки близких к рамапитекам приматов за последние годы были найдены также в Венгрии, Турции, Греции, и рамапитеков стали рассматривать как крупную систематическую группу высших приматов,

стоявшую на филогенетической линии, ведущей к человеку. В течение почти 15 лет (с 1965 г.) все это казалось совершенно бесспорным. Однако в самые последние годы стали появляться работы, призывающие к генеральному пересмотру таксономического и филогенетического положения рамапитеков в системе гоминиоидов.

Наиболее фундаментальное исследование принадлежит американскому приматологу Л. Гринфилду. Подробно изучив все материалы по рамапитекам (азиатским, африканским и европейским), сравнив их с данными по евразийским и африканским дриопитекам (в том числе по сивапитекам), Гринфилд пришел к выводу, что по совокупности 36 признаков зубов и челюстей рамапитеки практически не отличаются от миоценовых сивапитеков. Последние были родственными дриопитекам человекообразными обезьянами и рассматривались обычно как исходная общая предковая группа для современных антропоидов и человека. Гринфилд категорически отрицает наличие каких-либо специфически гоминидных признаков у рамапитеков и, исходя из этого, предлагает упразднить род *Ramapithecus*, а все азиатские, африканские и европейские формы рамапитека включить в род *Sivapithecus* в качестве отдельных видов.

Из концепции Гринфилда вытекает, что в верхнем миоцене (12—14 млн лет назад) еще не обособилась эволюционная линия, ведущая к гоминидам, а, следовательно, дивергенция понгидной и гоминидной ветвей эволюции произошла значительно позже.

Полагаю, что далеко не все антропологи согласятся с этой точкой зрения. Не так легко пожертвовать рамапитеками, с которыми связана почти двадцатилетняя история развития идей в области филогении человека. Но проблема

поставлена и требует дальнейшего изучения.

**М. И. УРЫСОН,**  
кандидат биологических наук  
Москва



Охрана природы

## Гренландский кит в Обской губе

В августе 1980 г. во время геокриологических исследований прибрежных районов Восточного Ямала (в районе пос. Сё-Яха) были обнаружены на расстоянии 60 м от берега, в литоральной зоне, остатки хвостового плавника, черепа и позвоночника крупного китообразного. Изучение этих остатков позволило заключить, что они принадлежат особи гренландского кита (*Balaena mysticetus*). Судя по размеру сохранившейся лопасти плавника, общий размах лопастей близок к 4 м, а общая длина кита — около 12 м. Такие размеры характерны для молодых, не достигших физической зрелости гренландских китов.

Хорошая сохранность дермы и сухожилий плавника, слабая деформированность костей свидетельствуют о сравнительно недавней гибели животного (не более нескольких, максимум — 20 лет назад). Судя по месту расположения находки — в 400 км от открытых частей Карского моря, в глубине Обской губы, — можно утверждать, что кит погиб в самой губе, а не в открытом бассейне Карского моря.

Известно, что еще в первой половине XIX в. гренландские киты были обычны в водах Баренцева моря, а у Новой Земли их интенсивно промыслили. В 30-х годах нашего столетия остатки трех гренландских китов были встречены непосредственно в акватории Обской губы (на литорали о-ва Шокальского у входа в губу, на берегу Тазовского п-ова, в 100 м от уреза воды, и у пос. Мыс Каменный, в 1,5 км от берега). В 1949 г. скелет гренландского кита был найден в 30 км южнее Маточкина Шара

на Новой Земле<sup>1</sup>. Все эти находки говорят о том, что в прошлом Обскую губу гренландские киты посещали достаточно часто. Однако в последние десятилетия гренландские киты в Карском море не наблюдались. В связи с резким сокращением численности Шпицбергенской популяции гренландских китов, особи которой только и могут заходить в Карское море, вообще возникли сомнения в ее сохранности.

Эта популяция находится в наиболее плачевном состоянии. Если численность Чукотско-Беринговоморской популяции за последние десятилетия выросла от нескольких сот до нескольких тысяч особей, если имеются обнадеживающие сведения о некотором увеличении Западно-Гренландской популяции (отдельные киты и небольшие группы все чаще наблюдаются в Западной Атлантике и, возможно, общая численность популяции уже достигла нескольких сот)<sup>2</sup>, то относительно Шпицбергенской популяции достоверных сведений нет. Сам факт находки остатков молодого гренландского кита в Обской губе крайне интересен, ибо он подтверждает существование, а возможно, и начавшееся увеличение численности и этой популяции.

До сих пор обнаружение остатков крупных морских млекопитающих в плейстоценовых морских отложениях приводилось в качестве доказательства глубоководного режима накопления этих осадков. Находка остатков кита в современных мелководных отложениях ставит под сомнение однозначность такой интерпретации.

**Ю. К. Васильчук**  
**А. В. Яблоков,**  
доктор биологических наук  
Москва

<sup>1</sup> Greenfield L. — American J. of Physical Anthropol., 1979, v. 49, № 2, p. 527.

<sup>1</sup> Томили А. Г. Звери СССР и прилегающих стран. Т. IX. Китообразные. М., 1957, с. 47—48.

<sup>2</sup> Берзин А. А., Яблоков А. В. Зоол. ж., 1978, т. 57, вып. 12, с. 1771.



Охрана природы

## Изучается калифорнийский кондор

Калифорнийский кондор (*Gymnogyps californianus*) — одна из самых редких птиц на Земле. Орнитологи считают, что в живых осталось всего 20—30 особей и численность их продолжает уменьшаться на 1—2 птицы в год. Специалисты почти не располагают надежными данными о возрастном и половом составе популяции, условиях спаривания, гнездования, питания, причинах смертности кондора и т. д. Понятен поэтому энтузиазм, с которым было воспринято сообщение, что 14 мая 1980 г. сотрудники группы по изучению кондора, созданной Управлением рыболовства и охраны природы США совместно с Национальным орнитологическим обществом им. Одюбона, впервые наблюдали, как кондор высидывает птенцов.

Еще в начале марта орнитологи Дж. С. Огден и Н. Снайдер заметили в Национальном заповеднике Анджелес Форест (штат Калифорния) пару кондоров, устроивших гнездо в неглубоком углублении на скалистом уступе высотой в сотню метров. Точное место их нахождения скрывалось из опасения, что появление любопытных спугнет птиц. 15 марта самка снесла единственное яйцо белесого цвета размером около 12 см в диаметре. Вплоть до появления птенца орнитологи поочередно вели круглосуточные наблюдения с помощью мощного телескопа, с трудом установленного на скале в полукилометре от гнезда. Родители высидывали яйцо без перерыва, их смены длились от 3 до 7 суток. 11 мая птенец разбил скорлупу и вскоре показался на свет (размер его был с кулак). Так впервые удалось установить, что период инкубации длится у кондора 58—59 суток.

Когда возраст оперившегося птенца достиг 45 дней, орнитологи и фотографы с помощью скалолазов добрались до гнездовья. Птенец был с осторожностью измерен и осмот-



Птенец калифорнийского кондора.

рен. Были взяты обломки яичной скорлупы для анализа на содержание пестицидов — считают, что они служат причиной утончения скорлупы, что приводит к разрушению яйца при насиживании.

Неудачей окончилась попытка изучения второго новорожденного кондора, обнаруженного в заповеднике Сеспе, расположенном к северу от Санта-Барбары в Калифорнии. Этот примерно двухмесячный птенец, сидевший в гнезде на узком горном уступе, внезапно умер, когда биолог-скалолаз взвешивал его (вес около 5 кг). Хотя с ним обращались столь же осторожно, как и с первым, птенец отреагировал на появление человека крайне возбужденно, отчего, вероятно, и наступила его смерть. Тело было взято в зоопарк Сан-Диего для вскрытия.

Несмотря на подобные неудачи, американские орнитологи продолжают надеяться на восстановление популяции калифорнийского кондора. Немало здесь зависит от успеха в изучении птиц, включая их спаривание в неволе с последующим выпуском птенцов в естественную среду. Однако до сих пор эти усилия оказывались безрезультатными в связи с чрезвычайной пугливостью кондоров и недоступностью мест их обитания.

Smithsonian Institution Scientific Event Alert Network Bulletin, 1980, v. 5, № 6, p. 15—16 (США).

Геология

## Открыт новый бассейн калийных солей в Восточной Сибири

Впервые в мировой практике крупное месторождение калийных солей открыто на основе научного прогноза и проведения целенаправленных исследовательских работ.

Еще в 1976 г. на территории Непско-Гаженского района, расположенного в верховьях р. Нижней Тунгуски на севере Иркутской области, геологи в нефтепоисковых скважинах установили характерные для пластов калийных солей геофизические аномалии, а затем был вскрыт первый калиеносный пласт карналлитовых пород<sup>1</sup>. В результате направленного поискового бурения в 1978—1979 гг. многолетние поиски калийных солей в Восточной Сибири, проводившиеся Иркутским геологическим управлением совместно с учреждениями Сибирского отделения АН СССР и другими организациями, увенчались успехом: был выявлен Непский калиеносный бассейн площадью свыше 22 000 км<sup>2</sup>. Высококачественные сильвинитовые залежи находятся здесь на глубине 600—900 м. Общие их запасы, по предварительным оценкам, составляют 120—130 млрд т.

На совещании Межведомственной комиссии по координации поисков фосфоритов и калийных солей в Сибири и на Дальнем Востоке, которое в сентябрь 1979 г. рассматривало результаты поисковых работ в Непском бассейне, было рекомендовано ряду учреждений Министерства геологии СССР и Академии наук СССР совместно с сотрудниками МГУ и других организаций продолжить в XI пятилетке общие поиски и детальные разведочные работы в Непском калиеносном бассейне, включая бурение, специальные геофизические, геохими-

<sup>1</sup> Карналлит ( $MgCl_2 \cdot KCl \cdot 6H_2O$ ), как и сильвин ( $KCl$ ), — один из наиболее распространенных минералов месторождений калийных солей.

ческие и гидрогеологические исследования, составление структурной карты бассейна, разработку технико-экономических обоснований эксплуатации его месторождений.

Геология и геофизика. 1980, № 8, с. 136—137.

#### Геофизика

### Неравновесный уран в диагностике подземных вод

Изотопы урана  $^{234}\text{U}$  и  $^{238}\text{U}$ , переходя из горных пород в природные воды, из-за разных физических свойств разделяются. Это обстоятельство можно использовать для изучения подземных вод. Формирующиеся в различных породах, содержащих уран, эти воды имеют и разную величину отношения  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U} = \gamma$ . Другими словами, значение  $\gamma$  — это своеобразная метка для вод, по которой можно проследить подземный поток или определить контуры подземного водного бассейна (по гидрогеологическим данным — картам гидронизогипс и т. п. — обычно можно определить лишь общее направление потоков).

П. И. Чалов, Т. В. Тузова, А. И. Тихонов (Институт физики и математики АН КиргССР, Фрунзе), используя этот метод, построили изотопную модель формирования и циркуляции подземных вод Алаарча-Аламединского месторождения подземных вод в Северной Киргизии. Содержание урана и его изотопный состав определялись в водах буровых скважин, естественных выходах подземных вод и в поверхностных водах по всей площади месторождения (более 300 источников).

Поскольку для одного и того же потока значение  $\gamma$  остается постоянным (для времени движения вод, малого по сравнению с периодом полураспада  $^{234}\text{U}$ ), по изолиниям  $\gamma$  удалось выделить источники, из которых формируются индивидуальные и смешанные потоки, направления их движения, области смещения потоков, а также границы месторождения.

Так, в западной части месторождения существует Алаарчинский подземный поток ( $\gamma \sim 1,17$ ), созданный поверхностными и подземными водами конуса выноса р. Ала-Арча; в центральной части — Аламединский подземный поток ( $\gamma \sim 1,27$ ), сформированный водами конуса выноса р. Аламедин. Оба эти потока выходят в пределы Чуйской впадины. В восточной части месторождения выделяется Норус-Иссыккатынский подземный поток ( $\gamma \sim 1,11$ ), а с севера и северо-востока месторождение ограничено Чуйским подземным потоком ( $\gamma \sim 1,56$ ), направленным в основном по долине р. Чу. Между этими подземными потоками прослеживаются области смещения вод, происхождение которых пока неизвестно.

Предложенная авторами изотопная модель соответствует гидрогеологическим представлениям о формировании и циркуляции подземных вод Алаарча-Аламединского месторождения. Изотопный индикатор, кроме того, позволил получить дополнительную, качественно новую информацию. Авторы установили, что перемещающиеся подземные воды не имеют гидравлической связи с поверхностными водами рек и оросительных каналов — при их «пересечении» конфигурация изолиний  $\gamma$  не нарушается.

Таким образом, новый метод, основанный на использовании изотопных соотношений урана, можно применять для решения как научных, так и практических задач гидрогеологии.

Доклады АН СССР, 1980, т. 252, № 1, с. 72—75.



Геохимия

### Мониторинг углеродистых соединений

В лаборатории природных углеродистых веществ географического факультета МГУ разрабатываются научные и методические основы мониторинга углеродистых соединений, в том числе полициклических аромати-

ческих углеводородов (ПАУ). ПАУ широко распространены в окружающей природной среде. В ландшафтную обложку они попадают двумя путями: из недр (продукты вулканической и поствулканической деятельности, нефть, битуминозные вещества и др.) и из различных технических систем (производства по переработке горючих ископаемых, транспортные средства, отопительные системы и т. д.). Слежение за уровнем концентрации ПАУ особенно необходимо вследствие канцерогенных свойств многих из этих молекул.

Среди известных методов идентификации индивидуального состава ПАУ наиболее эффективны методы, основанные на исследовании тонкой квазилинейчатой структуры электронных спектров многоатомных молекул. Эти методы отличаются высокой чувствительностью (в чистых растворителях до  $10^{-11}$  г), малым количеством исходной многокомпонентной смеси (сотые доли мг), минимальной степенью предварительной химической обработки, мягким воздействием на вещество во время анализа; кроме того, они позволяют многократно повторять анализ и одновременно определять в сложной смеси отдельные, даже изомерные молекулы.

В нашей лаборатории разработан количественный и качественный анализ ПАУ, основанный на использовании эталонных аналогов, спектрального фракционирования и безэталонной идентификации входящих в сложную смесь соединений. Наиболее оптимальные результаты дает сочетание тонкоструктурной люминесцентной спектроскопии и спектрофлуориметрии — метода, основанного на использовании двух сканирующих монохроматоров для получения спектров флуоресценции, фосфоресценции, спектров возбуждения люминесценции и приемов селективного и синхронного возбуждения изучаемых объектов. На основе разработанных методов в различных природных и техногенных объектах (горные породы, минералы, почвы, донные отложения, природные и сточные воды, атмосферные осадки, аэрозоли воздуха, нефти и их фракции, продукты пиролиза органического



го вещества, выхлопные газы двигателей и т. д.) определено к настоящему времени более 60 незамещенных и замещенных ароматических углеводородов и их групп.

Созданная в лаборатории природных углеродистых веществ монография «Атлас квазилинейчатых спектров люминесценции ароматических молекул», а также подготовленная к печати Т. А. Теплицкой и Т. А. Алексеевой работа о спектрофлюориметрических методах анализа ароматических углеводородов природных и техногенных сред позволят широко внедрить мониторинг полициклических ароматических углеводородов.

**В. Н. Флоровская,**  
доктор геолого-минералогических наук  
Москва

Геотектоника

**Обнаружено продолжение Байкальской рифтовой зоны**

Расшифровка космических снимков района трассы Байкало-Амурской магистрали, подтвержденная полевыми исследованиями, показала, что Байкальская рифтовая зона протягивается не только до р. Олекмы, как считалось до сих пор, но и далее на восток, возможно, до Удской губы Охотского моря.

Л. Г. Васютин (Научно-производственное объединение «Аэрогеология» Министерства геологии СССР) составила по космическим снимкам фотогеологическую карту, охватывающую территорию от Ангары до Татарского пролива. На ней выделен ряд неизвестных ранее крупных структур. В частности, Байкальская рифтовая зона про-

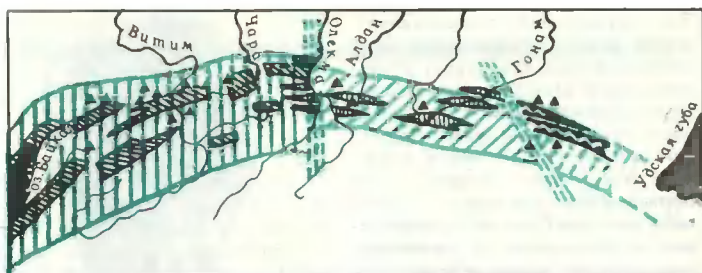








Схема строения Байкальской рифтовой зоны по данным космической фотосъемки.

-  границы рифтовой зоны
-  глубинные разломы
-  эпицентры землетрясений

зоны рифтогенеза:

-  интенсивного
-  растущего
-  зарождающегося

рифтовые структуры:

-  впадины байкальского типа
-  зарождающиеся впадины
-  грабен-долины

слежена от оз. Байкал на 700 км через Ангаро-Баргузино-Муи́нскую систему впадин до Чарско-Токкинской впадины и далее к истокам рек Зeya и Мая. Только на протяжении этой зоны установлено 20 различных рифтовых структур (см. схему).

На западе полоса рифтов (до Олекминского глубинного разлома) характеризуется серией впадин байкальского типа. Восточнее Олекмы рифтовая зона смещена на 60—70 км к югу; здесь она выражена в рельефе широтно ориентированными «зарождающимися» впадинами. К востоку от р. Гонам зона рифтов смещается еще на 20—30 км южнее по глубинному Тыркандинскому разлому. На этом участке она прослеживается в виде крупных грабен-долин рек Тусканец, Зeya, Мая и др.

Строение зоны рифтов достаточно сложное. Оно изменяется по направлению с запада на восток. В западной части крупные впадины заполнены рыхлыми отложениями неоген-четвертичного возраста, имеющими толщину до 2000 м; восточнее расположены более мелкие структурные аналоги рифтов, заполненные осадочными толщами в несколько сот метров. В средней части зоны (между Олекминским и Тыркандинским разломами) в зарождающихся впадинах слой отложений не превышает 100 м. Рифтовые грабен-долины в восточной части зоны заполнены совсем незначительно.

Для всей рифтовой зоны характерны очень большая амплитуда новейших тектонических движений (до 2 км), высокая сейсмичность (до 9 баллов), интенсивное проявление базальтового вулканизма. Вулканизм раньше всего (в олигоцене) проявился на западе зоны, позже — в центральной ее части (плиоцен) и затем — на востоке, у истоков Зей (поздний плиоцен-плейстоцен). Возраст отложений во впадинах указывает, что и процесс образования рифтов шел с запада на восток в кайнозойскую эру. В этом же направлении перемещалась магматическая активность региона в мезозойскую эру: основная эпоха гранитообразования и вулканизма в Забайкалье относится к триасу-юре, в Центральном Становике — к верхней юре — нижнему мелу, а на востоке, в Токинском Становике — к нижнему — верхнему мелу.

Байкало-Становой регион, охваченный процессом рифтогенеза, расположен между Сибирской платформой и Монголо-Охотским складчатым поясом.

<sup>1</sup> Теплицкая Т. А., Алексеева Т. А., Вальдман М. М. Атлас квазилинейчатых спектров люминесценции ароматических молекул. М.: Изд-во МГУ, 1978.

Эта территория представляет собой особую подвижную геотектоническую структуру, отличающуюся огромными масштабами магматической деятельности при почти полном отсутствии процесса накопления осадков. Устойчивая тенденция к образованию сводовых поднятий в Байкало-Становом регионе, его мобильность и проницаемость для магм обусловили формирование своеобразных внутриконтинентальных рифтов, развившихся в геологически недавнее время.

Экспресс-информация ВНИИ экономики минерального сырья и геологоразведочных работ Министерства геологии СССР, 1980, вып. 3, с. 1—12.

#### Археология

### Антропоморфная подвеска с Охотского побережья

Северо-Восточно-Азиатская комплексная археологическая экспедиция лаборатории археологии, истории и этнографии Северо-Восточного комплексного научно-исследовательского института Дальневосточного научного центра АН СССР ведет под руководством Н. Н. Дикова систематические исследования на севере Дальнего Востока. В полевой сезон 1980 г. Северо-Западно-Охотский отряд этой экспедиции обнаружил на стоянке в бухте Токарева (п-ов Хмидевского), в ее культурном слое на глубине 20 см, очень интересную подвеску в виде объемного изображения головы человека (см. третью страницу обложки). Возраст стоянки на основании полученной радиоуглеродной даты ( $3540 \pm 60$ ) можно отнести к середине II тыс. до н. э. Изготовлена эта уникальная подвеска из небольшой овальной гальки коричневатого цвета и имеет длину 34 мм, ширину 25 мм, толщину 11 мм. В верхней части просверлено биконическое отверстие диаметром 0,7—0,3 см.

На подвеске дан реалистический портрет древнего



Лицевая и оборотная стороны подвески-амулета.

приморского жителя середины II тыс. до н. э. Широкое уплощенное лицо с острым подбородком, прямой и высокий лоб, глубоко посаженные узкие и слегка раскосые глаза, небольшой узкий нос. Глубоко прорезанный рот полуоткрыт. Выражение лица суровое и мужественное. Проточенными линиями изображены на подвеске волосы и одежда. Волосы прямые, ровно подрезанные, с пробором в челке. Ниже лица изображен, вероятно, меховой нагрудник. Такие же нагрудники есть в традиционной одежде коряков, чукчей и у некоторых групп эскимосов. На оборотной стороне волосы отделены от одежды глубоко проточенной линией. Выделен также небольшой воротник. Остальные линии на спинке одежды носят, вероятно, декоративный характер. На боковых сторонах в нижней части подвески нанесены по две параллельных горизонтальных насечки.

Вероятнее всего, подвес-

ка служила амулетом. Это — культовое изображение защитника, охранителя. Древний художник в своем изделии достоверно отразил этнические черты и облик окружающих его людей. Следует отметить высокое мастерство художника, его наблюдательность и умение обрабатывать камень.

Этот амулет — первое высокохудожественное антропоморфное изображение, найденное на территории Охотского побережья.

Стоянка бухты Токарева относится к североохотской неолитической культуре. Древнее ее население занималось собирательством моллюсков, охотой на птиц, наземных и морских млекопитающих. В основном, вероятно, использовались орудия и методы, применявшиеся при охоте на наземных животных. На стоянке нами обнаружено множество каменных орудий: наконечники стрел и копий, тесла, ножи, скребки и проколки. Найденны также фрагменты тонкостенной (0,5 см) керамики без орнамента. Ни одна из известной стоянок североохотской культуры керамика до сих пор не была обнаружена<sup>1</sup>.

А. И. Лебединцев,  
начальник Северо-Западно-Охотского отряда экспедиции  
Магадан

<sup>1</sup> Более подробное описание стоянки, ее стратиграфии, датировки см.: Лебединцев А. И. Новые археологические памятники северо-западного побережья Охотского моря. — В кн.: Новейшие данные по археологии Севера Дальнего Востока. Магадан, 1980, с. 89—94.

## От осцилляторов к квантам: идеи, тексты, люди

**И. Ю. Кобзарев,**

доктор физико-математических наук

Институт теоретической и экспериментальной физики

**А. Е. Леви,**

кандидат философских наук

Институт философии АН СССР  
Москва

### Black-Body Theory and the Quantum Discontinuity, 1894-1912

THOMAS S. KUHN

T. S. Kuhn. BLACK-BODY THEORY AND THE QUANTUM DISCONTINUITY, 1894—1912. N. Y., 1978.

Книга историка науки Томаса Куна (США) «Теория черного тела и квантовая дискретность», вышедшая в 1978 г. в издательстве Оксфордского университета, является детальным исследованием того, как формировалось представление, что справедливость формулы Планка для энергии гармонического осциллятора связана с дискретностью его энергетических состояний, а сама механика, которой такой осциллятор описывается, отлична от классической. Рассказ заканчивается в тот мо-

мент, когда эта точка зрения стала широко распространенной среди физиков, интересовавшихся квантовой проблемой.

Тщательно документированный, основанный на скрупулезном анализе всей совокупности первоисточников (научных статей, книг, переписки, черновиков работ) рассказ о том, что происходило в избранный автором период, и составляет содержание монографии Т. Куна, представляющей собой прекрасный образец современной профессиональной истории физики.

Конечно, история физики, вообще говоря, так же стара, как и сама физика: долгое время физики писали ее сами. Ее можно найти во введениях, исторических экскурсах и обычных ссылках в научных статьях, монографиях и учебниках; обширные фрагменты текстов по истории физики содержатся в рецензиях, некрологах и юбилейных речах. Но, конечно, к историографии такого типа обычно не предъявлялись требования, давно уже ставшие стандартными для профессиональных историков: история должна писаться на основе максимально полного выявления совокупности (корпуса) первичных документов (источников), относящихся к сюжету исследования, и писаться так, чтобы читающему было ясно, на базе каких источников делаются те или иные утверждения. Отсюда та присущая непрофессиональной истории физики примесь недостоверности — от небольших неточностей до полной мифологичности, которая сейчас так раздражает историков науки.

Возьмем наугад одну из лучших статей физиков об истории физики — юбилейную статью Эйнштейна 1927 г. «Механика Ньютона и ее влияние на формирование теоретической физики». Мы найдем там в целом очень точный анализ места механики Ньютона в развитии физики, но, закончив характеристику теоретических основ не-

бесной механики Ньютона, Эйнштейн продолжает: «На основе вышеизложенного Ньютону удалось объяснить до мельчайших деталей движения планет, Луны и комет...»<sup>1</sup>. В известной степени так можно сказать о том, что Ньютон делал в теории Луны — здесь он действительно учитывал действие Солнца и некоторые из характерных «деталей» движения Луны он объяснил. Но в теории планет Ньютон вообще не продвинулся дальше вывода законов Кеплера. Единственная оценка взаимных возмущений Юпитера и Сатурна, которую он сделал в «Началах», ошибочна; теория же, описывающая детали движений планет, была в какой-то степени завершена только в работах Лапласа, больше чем через столетие после «Начал».

Можно счесть неточности такого рода несущественными, но есть более серьезные вещи. В текстах по истории науки, которые можно найти в учебниках и вообще в научной литературе, почти всегда идет речь о достижениях и результатах, признанных научным сообществом выдающимися. Даже при составлении библиографии к научным статьям обычно происходит оценка и выбор. Таким образом, реальный процесс развития науки, в котором вклады разных масштабов образуют одну неразрывную ткань, оказывается почти всегда вынесенным за скобки<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Эйнштейн А. Собр. науч. трудов, т. IV. М.: Наука, 1967, с. 82.

<sup>2</sup> Одним из лучших исключений из этого правила являются речи, произносимые при вручении Нобелевских премий. Сложившаяся, по-видимому, сейчас традиция предполагает, что лауреат расскажет личную историю своих результатов и назовет по возможности с максимальной полнотой те работы и события, которые подготовили его собственные достижения.

В какой степени историк может выявить, описать и проанализировать реальный ход вещей — вопрос для истории науки почти, а может быть, просто столь же сложный, как и для общей истории. Во всяком случае, в результате нескольких лет работы Т. Кун написал историю «квантовой дискретности» в первое ее десятилетие, в которой участвует около 90 действующих лиц (число авторов в списке оригинальных работ, рассмотренных в книге), полную интересных деталей и сложно сплетенных взаимосвязей.

Чтобы рассказать историю квантовой дискретности, Т. Куну потребовалось около 250 страниц основного текста и примерно 100 страниц очень содержательных примечаний, которые желательно тоже прочесть, хотя они и напечатаны мелким шрифтом: именно там выясняется документальная база основного текста и содержится обсуждение работ других историков на эту же тему. Коротко говоря, именно здесь выясняется профессиональная основа исследования.

Мы не будем пытаться пересказать содержание книги Т. Куна: интерес исследования такого рода — в деталях, а не в обобщениях. Кроме того, один из авторов этой рецензии недавно излагал свой вариант реконструкции событий 1900—1911 гг.<sup>3</sup>, и в том, что касается фактической стороны дела, обе версии в основном совпадают, хотя, разумеется, обширное исследование Т. Куна содержит детали, которые либо не могли уместиться в краткой статье, либо остались за пределами круга источников, на основе которых она была написана.

Тому, кто захочет познакомиться с историей первого десятилетия квантовой теории в подробном описании, мы советовали бы начать с хорошо документированной книги А. Германна (ФРГ) «История начального периода квантовой теории» (A. Hermann. Frühgeschichte der Quanten Theorie. Baden, 1965); в этой книге содержатся публи-

кации ряда важных архивных материалов, и, кроме узкой темы эволюции теории осциллятора, рассмотрена также и вторая линия, связанная с гипотезой световых квантов Эйнштейна. В этом смысле книга Германна дает более полную картину событий — при менее детальном анализе проблем собственно теоретических. Что касается последних, то здесь книга Т. Куна незаменима: в ней можно найти и сведения о том, когда и где Больцман писал в первый раз о флуктуациях, и датировку первого известного сейчас письма Планка, в котором ясно сказано, что осциллятор должен делиться энергией  $h\nu$ , и много других интересных и важных сведений.

Для читателя книги Т. Куна может оказаться не вполне очевидным выбор хронологических рамок — 1894—1912, вынесенных в заглавие книги, но не мотивируемых явно. Однако всем, кто прочтет ее, станет ясно, в чем дело: несмотря на то что в событиях участвует много физиков, в книге все же есть главный герой — Макс Планк. 1894 год — это год, когда он начал работать над проблемой черного излучения (первая статья вышла в 1895 г.). В 1912 г. Планк закончил работу над вторым изданием «Лекций по теории черного излучения», в которых были подведены итоги развития теории в предшествующий период. В этом же году вышли завершающие статьи серии работ Планка по так называемой 2-й теории черного излучения, где он широко применял для описания черного излучения вероятностные представления (и тем самым, возможно, подготовил появление классической работы Эйнштейна 1916 г., где был дан последовательный статистический вывод формулы Планка для плотности энергии черного излучения).

Здесь уместно подчеркнуть, что работы Планка 1900 г. содержали две совершенно новые формулы: формулу для средней энергии осциллятора  $\bar{E}(\nu)$  и формулу для спектральной плотности энергии черного излучения  $\rho(\nu)$ . Установление связи между ними, как и вывод каждой из них, стали в формальном смысле невозможными, как

только Планк ввел в статистический расчет конечные элементы энергии. Книга Т. Куна существенно выиграла бы в ясности, если бы все это было четко сказано. Понимания позиции теоретиков тех лет нельзя достичь, если не учитывать, что любой из них предполагал (часто бессознательно) очевидным то, что в действительности тогда, до появления последовательной квантовой теории в конце 20-х годов, совершенно нельзя было ни обосновать, ни оправдать, хотя по существу эти предположения часто были правильными. Скажем, Эйнштейн в 1900—1920 гг. обычно предполагал справедливой гиббсову статистику, — но ее обоснование, построенное Гиббсом и независимо Эйнштейном, использовало гамильтонову механику; коль скоро те, кто занимался квантовой теорией, принимали к выводу, что в атомной области гамильтонова механика не действует, обоснование потеряло силу. Тем не менее статистическая часть рассуждений Планка 1900 г. или работ Эйнштейна 1905 или 1906 гг. сейчас выглядит безупречной — основные гипотезы статистической физики справедливы и в квантовой области, но тогда это было неизвестно.

Как видно уже из заглавия книги, а также из предисловия и самого текста, в центре внимания Т. Куна находился вопрос, когда и кем было понято, что справедливостью формулы Планка для  $\bar{E}(\nu)$  связана с тем, что энергия осцилляторов может принимать только дискретные значения  $E = nh\nu$ . Нельзя не согласиться, что Планк так не думал очень долго — его гипотеза заключалась в том, что только обмен энергией между осциллятором и полем происходит порциями  $h\nu$ , но осциллятор с дискретными уровнями в этот период почти всегда казался ему, видимо, совершенно невозможной вещью, а модификацию уравнений электродинамики на «малых расстояниях» вблизи осциллятора, которая приводила бы к обмену дискретными порциями, он не допускал. (В статьях Планка 1900 г. вообще не дается интерпретации порций энергии  $E = h\nu$ , но подчеркивается возможность того, что они конечны, а не равны нулю.) В очень

<sup>3</sup> Кобзарев И. Ю. А. Эйнштейн, М. Планк и атомная теория. — Природа, 1978, № 3. с. В.

сдержанной форме эта точка зрения появляется в лекциях Планка 1906 г., в совершенно четком виде — в письме к В. Вину 1906 г., и потом постоянно. Т. Кун склонен думать, что Планк пришел к такому пониманию под влиянием писем и работ Эйнштейна и П. Эрэнфеста, но надо сказать, что последний первоначально настаивал совсем на другом. Кроме того, если принять версию Т. Куна, получится, что до 1906 г. Планк «вообще ничего» не думал о происхождении «порций энергии», хотя это довольно странно для человека, для которого думать — профессия. В действительности на локализацию порций энергии  $E=h\nu$  в обмене поля с осциллятором прямо указывал характер самого вывода в работе Планка 1900 г. — вероятнее всего, он это и предполагал, хотя более существенно, что в 1900 г. Планк вывел формулы для  $\bar{E}(\nu)$  и  $\varrho(\nu)$  и так или иначе ввел дискретные порции энергии  $E=h\nu$ , и именно это стало основой всех последующих работ по квантовой теории.

Надо сказать, что многие излагаемые в книге реконструкции хода мысли Планка в те или иные моменты не кажутся нам удачными. Например, Т. Кун присоединился к версии Л. Розенфельда, согласно которой Планк пришел к своему статистическому выводу формулы для  $\bar{E}(\nu)$  почти вслепую, начав с уже полученной им эмпирически правильной формулы для  $\varrho(\nu)$ , а затем преобразовывая формулы, пока не пришел к выражению, которое можно было отождествить с формулой для числа размещений из учебника по теории вероятностей. Нам кажется, что и Л. Розенфельд и Т. Кун недооценивали квалификацию М. Планка; коль скоро он вообще решился воспользоваться статистическими методами Больцмана, которых до этого по вполне рациональным причинам избегал, то понять, как надо поставить и решить задачу об ансамбле осцилляторов, было, наверное, нетрудным делом для теоретика, так владевшего методами теоретической физики своего времени, как Планк.

Если вернуться к истории квантовой дискретности, то несомненно, что дискретные уровни осциллятора в работах Планка

1900 г. отсутствовали, первое известное нам появление их в литературе произошло независимо в статьях Эйнштейна и Эрэнфеста 1906 г. С присущей ему смелостью и энергией мысли Эйнштейн уже в 1907 г. применил гипотезу о дискретных уровнях к колебаниям атомов в твердых телах и в той же статье, обсуждая смысл формулы Планка, писал, что законы движения молекул должны отличаться от законов движения тел повседневно опыта, так что доступное для них множество состояний «меньше, чем для тел повседневного опыта». Заметим, что следующая фраза статьи как бы отдает дань точке зрения Планка. «Мы должны при этом предполагать механизм передачи энергии таким, что энергия элементарных образований может принимать только значения  $0, (R/N)\beta\nu, 2R/N\beta\nu$ ».<sup>4</sup>

Т. Кун излагает все это как вещи до него неизвестные и даже считает, что он основал «историографическую ересь» (с. 126). Работы историков физики, в которых введение уровней  $E=h\nu$  приписывалось бы Планку, в книге не указаны. Из чтения предисловия к книге Т. Куна можно вынести впечатление, что автор пересматривает в основном свои собственные взгляды предшествующего времени.

Если обратиться к известной книге американского исследователя Д. Бом «Квантовая теория», где основы квантовой теории обсуждаются подробно, то ее автор, найдя среднюю энергию осциллятора с уровнями  $E_n=h\nu$ , дальше подчеркивает: «Первоначальная гипотеза Планка заключалась не в представлении о квантовании осцилляторов поля излучения, как это было только что изложено, он предполагал, что излучение находится в равновесии с осцилляторами вещества стенок полости, что эти осцилляторы вещества могут излучать и поглощать энергию электромагнитного поля только квантами с энергией  $E=h\nu$ ».<sup>5</sup> Учитывая,

что Бом не указывает вообще никаких дат, его формулировка адекватна и выводу Планка и его явно сформулированной точке зрения 1900—1910 гг. Конечно, можно найти тексты, где Планку приписывается и введение уровней  $E=h\nu$ . Но считать точку зрения Т. Куна сенсационной новой нет оснований.

Т. Кун не называет Планка «создателем квантовой теории» и не говорит, что начало квантовой теории было положено Планком в 1900 г. Разумеется, такого рода высказывания всегда содержат большой элемент условности, и можно было бы понять Т. Куна, если бы он вообще не пользовался подобной терминологией. Но тогда желательна последовательность. Между тем Т. Кун все же, приведя цитируемую выше фразу из работы Эйнштейна 1906 г., где Эйнштейн говорит о дискретных уровнях осциллятора, пишет, что эта фраза «в некотором смысле возмещает рождение квантовой теории». Но если вообще думать, что задача о точном установлении момента рождения теорий имеет смысл, разрешима и интересна, то, конечно, можно привести убедительные доводы в пользу канонической даты 14 декабря 1900 г. — дня, когда Планк докладывал о своем статистическом выводе, в котором были использованы конечные «элементы энергии», равные  $h\nu$ . Ведь именно результаты этой работы легли в основу всего дальнейшего развития и находились в центре внимания физиков, занимавшихся квантовыми проблемами вплоть до появления работы Бора, где была дана квантовая формула для уровней энергии атома водорода.

Небезынтересно вспомнить ретроспективную оценку этого периода, данную в Нобелевской лекции Нильса Бора, произнесенной в 1922 г. Сказав, что «начало этой (квантовой) теории было положено, как известно, в 1900 г. Планком...», Бор перешел к работам Эйнштейна: «Удивительный результат Планка стоял вначале совершенно особняком в естественных науках. Однако, благодаря важным работам Эйнштейна в этой области, через несколько лет указанный вывод нашел широкое применение...».

<sup>4</sup> Эйнштейн А. Собр. науч. трудов, т. III. М.: Наука, 1966, с. 137.

<sup>5</sup> Бом Д. Квантовая теория. М.: Физматгиз, 1961, с. 32.

Упомянув прежде всего работы Эйнштейна по теории теплоемкости, Бор сказал о световых квантах и эйнштейновской теории излучения, но гипотезу световых квантов отклонил. Дальше говорится: «В последующие годы были предприняты попытки применить квантовые представления к вопросам строения атома, причем центр тяжести переносился то на одно, то на другое следствие, полученное Эйнштейном из результатов Планка. Из наиболее известных попыток в этом направлении, не давших, однако, никаких определенных результатов, я не могу не упомянуть работы Штарка, Зоммерфельда, Хазенёрля, де Гааза и Никольсона<sup>6</sup>. Упомянув еще как важную работу Бьеррума, предсказавшего, что ротационные спектры молекул должны быть квантованными, Бор перешел к описанию модели Резерфорда и изложению своих работ.

Не должен ли историк физики попытаться выйти за пределы сопоставления документов, фактов и основанных на них рассказов о сцеплении событий? Можно, например, пытаться построить, как сейчас любят говорить, «модель» процесса. Предыдущая книга Т. Куна «Структура научных революций» (первое издание вышло в США в 1962 г., русский перевод — в 1975 и 1977 гг.), вызвавшая шумное внимание историков науки, философов и социологов, содержала попытку построить что-то вроде универсальной схемы развития науки, согласно которой периоды роста «нормальной науки», когда исследования ведутся на основе принимаемой «научным сообществом» специалистов «парадигмы», сменяются научными революциями и созданием новых парадигм. В книге было рассмотрено несколько образцов революций (наиболее обстоятельно — появление системы Коперника и революция в химии, связанная с реформами Лавуазье) и сделана попытка дать универсальное описание характера исследовательской деятельности членов «научного сообщества» в нор-

мальной фазе и в фазе революции. Мы не будем здесь возвращаться к оценке сущности и степени адекватности модели Т. Куна как по причине того, что книга уже обсуждалась в журнале «Природа», так и потому, что описание самого Т. Куна не слишком определено и допускает разные толкования, и не случайно. Очевидно, что и характер деятельности исследователей и сами революции очень разнообразны; например, коперниканская и квантовая революции происходили на столь разном научном и социальном фоне, что для того, чтобы уложить их в одну схему, пришлось бы сделать ее почти лишенной содержания.

Так или иначе, но в рецензируемой здесь книге Т. Кун не пользуется предложенной им терминологией и не обсуждает, по какой модели происходила революция, связанная с появлением теории квантов. Нет нужды строить гипотезы, почему Т. Кун так поступил. Мелегко, конечно, установить, как выглядели «нормальная наука» и соответствующая «парадигма» за год до первой работы Планка — разные люди верили и не верили в разные вещи — но, может быть, совсем не в этом дело. Не будем здесь пытаться ни выяснять еще раз, в чем, собственно, состояла «модель Т. Куна», содержащаяся в «Структуре научных революций», ни сравнивать эту модель с «экспериментальным материалом», содержащимся в новой книге, ни предлагать еще новую модель. Ограничимся только одним замечанием.

Вряд ли кто-нибудь будет оспаривать, что «научные революции» приводят к новому «видению». Физикам очень давно было известно понятие «кар-

тина мира» (механическая, электромагнитная). Еще Пуанкаре пользовался понятием кризиса — эквивалентом «научной революции», и даже сам термин «научная революция» имеет почтенный возраст — он встречался еще у Лавуазье<sup>7</sup>. Если задать вопрос, как возникает «новое видение» — новая парадигма, то, конечно, ясно, что оно создается отнюдь не внезапным скачком и не происходит в голове одного человека — это есть результат сложного и многоэтапного переходного процесса. Солнце до Коперника «видел» в центре Солнечной системы Аристарх, Коперник все еще «видел» эпициклы, Кеплер «увидел» эллиптические орбиты. Постепенно от Ж. Роберваля до Ньютона формировался образ взаимно тяготеющих планет, движущихся по сложным траекториям, близким к эллипсам Кеплера. Только после Ньютона это «видение» стало «нормальной наукой», в рамках которой Л. Эйлер, А. Клеро, П. Лаплас и другие рассчитывали движения небесных тел. В обширном и тщательном исследовании Т. Куна подробно описано, что «видели» Планк и Эйнштейн и как менялась их «картина» осциллятора, но не случайно, что создание той «парадигмы», которой пользуется современный теоретик — мира гильбертовых векторов, в котором наблюдаемым соответствуют собственные значения эрмитовых операторов, — оказалось далеко за хронологическими рамками книги.

Мы не будем здесь углубляться в эти проблемы: хотя программы и общие точки зрения влияют на поведение исследователей, все же физика в большей степени движется вперед за счет конкретных результатов.

Должны ли мы сказать, что моделей исторических процессов вообще не надо ни строить, ни обсуждать, так как действительность никогда в них не укладывается? Мы думаем, что

<sup>7</sup> Гинзбург В. Л. Как развивается наука? Замечания по поводу книги Т. Куна «Структура научных революций». — Природа, 1976, № 6, с. 73; Левин А. Е. Модель науки в первом приближении. — Природа, 1976, № 10, с. 59; Грязнов Б. С. Философские «парадигмы» Т. Куна. — Природа, 1976, № 10, с. 63; Кедров Б. М. О революционном характере развития естествознания. — Природа, 1976, № 10, с. 68.

<sup>6</sup> Бор Н. Избр. науч. труды, т. 1. М.: Наука, 1970, с. 423.

<sup>8</sup> То, что это понятие появилось именно во Франции в XVIII в., видимо, не случайно — в предреволюционный период политическая терминология была в большой моде.

нет. Попытка построить схему процесса всегда заставляет по-новому взглянуть на него, и даже если построенная модель нас потом и не удовлетворит, она все же может указать новую точку зрения на действительность и новые цели и методы ее изучения. В этом смысле попытка Т. Куна описать типовую структуру научной революции не составила исключения. Рецензенты «Структуры научных революций» обращали внимание на то, что предлагаемая Т. Куном схема (модель) научной революции носила социологический или, как выразился один из них, американский социолог науки Б. Барбер<sup>9</sup>, квазисоциологический характер. Предлагалась некоторая схема поведения научного сообщества в нормальной и революционной фазе, и таким образом подчеркивалось, что развитие науки есть не просто развитие абстрактных идей — оно предполагает акты выбора программы, оценки, дискуссий, которые происходят в научном сообществе.

Хотя эти аспекты не преобладают в «Теории черного тела», но они все же явно присутствуют в ней. Живая реальность споров, попыток переубеждения и поисков взаимопонимания, столкновений и взаимодействий интересов — все, что в науковедении 70-х годов получило название «переговоров между учеными» и к чему посвящается много исследований — все это явно ощутимо в книге.

Важность и революционность «первого» шага осознавалась постепенно, по мере того как вокруг результата Планка, ставшего центром кристаллизации, появлялись следующие результаты и по мере их накопления становилась все более ясной необходимость радикальной перестройки всего аппарата теории. Может быть, самой яркой чертой, которая заслуживает большего внимания, чем ей уделено в книге, является зыбкость и противоречивость ситуации: по мере того как становилось ясным, что в мире атомных явлений классическая механика

не действует, все выводы и доказательства — основной инструмент теоретика — теряли силу. Выделить из классической физики понятия и закономерности, сохранившие силу в квантовой теории, можно было, только опираясь на интуицию и данные опыта, а некоторые противоречия не удавалось устранить до завершения квантовой теории в 1925—1927 гг.

Т. Кун не ставил перед собой задачу дать социологическое исследование квантовой революции — выяснить, как перестраивалось научное сообщество физиков под ее влиянием, но даже на основе содержащегося в его книге материала легко сказать, чего не происходило — не было внезапного появления новой парадигмы, вокруг которой формировался бы отряд ее сторонников; не было и раскола, сразу разделившего научное сообщество на традиционалистов и новаторов, скорее происходил долгий и сложный процесс приспособления и привыкания научного сообщества к новым идеям и возможностям — короче говоря, революция была не мутацией научной специальности, а скорее адаптивной реконструкцией.

Может быть, книга оказалась бы более интересной, если бы автор все же попытался использовать основные понятия своей старой модели. Есть вопросы, которые в книге не обсуждаются: что представляло собой сообщество физиков в 1900—1910 гг.<sup>10</sup>, как выглядело то сообщество, внутри которого возникла собственно квантовая теория — сообщество профессиональных теоретиков, как шло выделение сообщества квантовых теоретиков, начавших разрабатывать новую парадигму, какова была, пользуясь терминами «Структуры научных революций», «дисциплинарная матрица» этого сообщества, каковы

были «символические обобщения», «метафизические парадигмы», «ценности», «образцы»? Поясним, что первые два термина соответствуют, по-видимому, примерно «основным теоретическим понятиям» и «представлениям о реальности». Исследование этих аспектов, наверное, дало бы много интересного: например, Планк начиная с 1894 г. охотно включал в свой набор «символических обобщений» линейный осциллятор (пришедший в его работы, наверное, из работ Х. А. Лоренца), но не включал атомов (принятие им бальмановской атомистики в 1900 г. было для него революцией с одним участником). А. Зоммерфельд, сменив около 1904 г. занятие теорией смазки на занятие теорией электронов, сменил и «ценности» и «образцы» и т. д. Конечно, исследование всего этого круга вопросов требует привлечения новых, нестандартных источников (скажем, типа списков тем диссертаций по физике, наверное, имеющихся в европейских университетах). Без этого, оставаясь в рамках уже сформировавшегося корпуса источников (статьи, книги, письма), история квантовой революции может легко начать вырождаться во что-то вроде приоритетных споров или бесплодных попыток выяснить, в какой, собственно, момент родилась квантовая теория.

В связи с этим обратим внимание на одно любопытное обстоятельство. После выхода в свет «Структуры научных революций» Т. Кун прослыл человеком, покушающимся на методологическую чистоту классической историографии науки. Шестнадцать лет спустя он опубликовал новую монографию, в значительной мере выдержанную в традициях именно этой, «текстологической» историографии. Но многие рецензенты вновь недовольны — книга, по их мнению, получилась «ретроградной». По-видимому, это означает, что сейчас необходимость изучать не только филиацию (развитие в преемственной связи) абстрактных идей, но и то, как она реализуется внутри научных сообществ, уже стала очевидной всем историкам науки.

<sup>10</sup> Много интересных сведений по этой теме можно найти в работе: Forman P., Heilbron J. L., Weart S. Physics circa 1900: Personal, Findings and Productivity of the Academic Establishments. Historical Studies in Physical Sciences, v. 5. Princeton and London, 1975.

<sup>9</sup> Barber B. Am. Sociol. Rev., v. 28, 1963, April, p. 298.

Подводя итоги, мы все же можем сказать, что в рамках избранной автором конкретной темы и корпуса источников монография Т. Куна не имеет себе равных по полноте охвата и богатству деталей. Это серьезный вклад в историографию первого

десятилетия квантовой теории. Было бы целесообразно перевести книгу Т. Куна на русский язык, чтобы сделать ее более доступной читателям. Надо думать, что ее будут читать не только профессиональные историки науки — она интересна и

для любого физика, который захочет узнать, как происходило формирование квантовой теории, если не по первоисточникам, то из рассказа, надежно ими обоснованного.

## НОВЫЕ КНИГИ

### Физика

**ПРОБЛЕМЫ СОВРЕМЕННОЙ ФИЗИКИ.** Сб. статей к 100-летию со дня рождения А. Ф. Иоффе. Отв. ред. А. П. Александров, Л.: Наука, 1980, 587 с., ц. 4 р. 30 к.

Абрам Федорович Иоффе (1880—1960) — выдающийся ученый, создатель одной из крупнейших физических школ в нашей стране, основатель и первый директор Физико-технического института АН СССР, носящего теперь его имя. Трудно переоценить ту роль, которую он сыграл в становлении и развитии советской физики. В сборнике, посвященном столетию со дня рождения этого выдающегося ученого, публикуются как оригинальные, так и обзорные статьи по физике полупроводников, физике ядра и плазмы, биофизике, проблемам преобразования энергии и другим вопросам современной физики. Основная часть статей написана учениками и ближайшими сотрудниками А. Ф. Иоффе по физико-техническому институту и Институту полупроводников АН СССР.

Особый интерес вызывают воспоминания академиков А. П. Александрова, Н. Н. Семёнова, Я. Б. Зельдовича, Ю. Б. Харитона и В. М. Тучковича об их встречах и работе с А. Ф. Иоффе. Воссоздается атмосфера семинара Иоффе по новой физике сначала в Политехническом институте (1915—1917 гг.), а затем (с 1918 г.) — уже в стенах Физико-технического института, рассказывается о роли Иоффе в постановке фундаментальных

и прикладных исследований в этом институте, а затем в организации советской физики и воспитании ее кадров.

### Физика

М. Уиньон. **ЗНАКОМСТВО С ГОЛОГРАФИЕЙ.** Пер. с англ. А. Н. Кондрашовой. Под ред. и с предисл. А. И. Ларкина. М.: Мир, 1980, 191 с., ц. 55 к.

В наше время каждому, кто интересуется достижениями науки, известно, что голограмма — это нечто, напоминающее объемную фотографию, получаемую с помощью лазера. Книга молодого английского физика М. Уиньона представляет собой попытку дать широкому читателю более четкое представление о физических принципах голографии и о возможных применениях этого явления.

В первых главах рассказывается о природе света и зрения, об источниках света и изобретении лазера. Говорится о роли лазеров в экспериментах по осуществлению управляемого термоядерного синтеза, об их использовании в системах связи, в метрологии, военном деле и, наконец, в голографии. Лишь после этого читатель знакомится с методами получения плоских и объемных голограмм, узнает об их применении в качестве инструмента исследования (голографические микроскопы, голографическая интерферометрия, голографические запоминающие устройства, фурье-голография и т. п.) и широких перспективах использования го-

лографии во многих сферах нашей жизни, включая систему образования, телевидение и кино.

Внимание читателей, которые следят за популярной литературой по голографии, привлекут два нетрадиционных раздела — «Голография как изобразительное искусство» и «Делайте голограммы сами».

### Физика

В. Н. Оравский. **ПЛАЗМА НА ЗЕМЛЕ И В КОСМОСЕ.** Изд. 2-е, Киев: Наукова думка, 1980, 202 с., ц. 35 к.

В книге рассказывается о четвертом состоянии вещества — плазме, о явлениях, происходящих в ней, и о возможном использовании плазмы, созданной искусственно. Повышенный интерес к физике плазмы в наши дни связан, в первую очередь, с проблемой управляемого термоядерного синтеза. Познакомив читателя с основными закономерностями в поведении плазмы, автор говорит о термоядерном синтезе, о магнито-гидродинамических (МГД) генераторах, создание которых является одной из центральных задач современной энергетики. И, конечно же, не мог остаться без внимания вопрос о различных плазменных явлениях в космосе, т. е. о происхождении и структуре магнитного поля Земли, о магнитных бурях и полярных сияниях, о процессах, происходящих в звездах — молодых, старых и умирающих.

Книга написана для широкого круга читателей.



---

 Математика
 

---

Ю. И. Гнявдерман. **ВООРУЖИВШИСЬ ИНТЕГРАЛОМ.** Отв. ред. Г. П. Акилов. Новосибирск: Наука, 1980, 191 с., ц. 35 к.

Математические модели, отображения, булевы алгебры, распознавание образов, графы, аффинные пространства, бифуркации... Эти понятия из собственности «чистых» математиков все чаще переходят в обиход таких еще недавно нематематических наук, как химия и биология. Молекулярная спектроскопия и автоматизация диагностики заболеваний, законы развития популяций и природа химических реакций, теория биологической эволюции и законы сосуществования сообществ животных — вот примеры проблем, где современная математика является не только и не столько аппаратом для получения численных данных, сколько языком для рассуждений и инструментом для поиска ответов, катализатором при синтезе различных, казалось бы далеких друг от друга научных направлений.

Об этом в популярной и увлекательной форме рассказано в книге. Она рассчитана на школьников старших классов и студентов первых курсов, являясь для них введением в новые области науки — математическую химию и математическую биологию.

---

 Биология
 

---

В. Г. Борзенков, А. С. Северцов. **ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ БИОЛОГИЯ: РАЗМЫШЛЕНИЯ О ПРЕДМЕТЕ.** М.: Знание, сер. «Биология», 1980, № 9, 64 с., ц. 11 к.

Развитие биологии в XX в. породило оживленные дискуссии среди специалистов вокруг предмета теоретической биологии — особой дисциплины, которая не только обобщила бы достижения биологии, но и, объяснив все известные биологические закономерности, предсказывала бы еще неизвестные. Обсуждение возникающих в связи с этим вопросов требует хорошей ориентации как в сфере оснований биологического знания, так и в области современной логики и методологии науки.

Не случайно один из авторов брошюры, посвященной теоретической биологии, — биолог, а другой — философ.

В брошюре анализируется спектр существующих точек зрения на пути построения теоретической биологии, фиксируются доминирующие идеи того или иного подхода (описательность, физикализм, системность и историзм), ставится вопрос о возможных формах их синтеза. Обсуждаются и методологические вопросы, связанные с сущностью теоретического знания, критериями научных законов, соотношениями объяснительной и предсказательной функций законов и теорий. Это позволяет авторам поставить вопрос о теоретическом статусе таких построений в биологии, как, например, законы генетики, теория естественного отбора и др. Демонстрируется важная роль теории эволюции Дарвина в качестве метатеоретического фундамента современной биологии.

---

 Биология
 

---

С. Д. Дарлингтон, Л. Ф. Ла Кур. **ХРОМОСОМЫ.** Методы работы. Пер. с англ. В. Е. Барского, Н. А. Ляпуновой, В. С. Соколовского. Под ред. и с предисл. Н. Н. Воронцова. М.: Атомиздат, 1980, 198 с., ц. 2р. 80 к.

Эта книга, написанная известными английскими генетиками, членами Лондонского Королевского общества, выдержала 6 английских изданий. На ней воспитано не одно поколение цитогенетиков. Последнее издание существенно переработано с учетом методического прогресса, достигнутого в исследовании хромосом.

Книга служит введением в методики хромосомного анализа. В ней описывается необходимое лабораторное оборудование, методы прижизненного наблюдения хромосом, способы фиксации и приготовления хромосомных препаратов. Показаны способы анализа хромосом на основе использования микрохимических методов. Русское издание снабжено ссылками на соответствующие реактивы и оборудование, используемые в лабораториях СССР.

Краткая глава «Описание результатов» содержит реко-

мендации по форме и стилю написания научных статей. Приведенные в ней шесть рекомендаций авторам интересны и полезны для специалиста в любой области знаний: они написаны с юмором, кратки и афористичны.

К русскому изданию С. Дарлингтон написал яркое предисловие, в котором он подчеркивает, что «хромосомы идут впереди организма. Они идут первыми в наследственности, в развитии и в эволюции». «Хромосомы, — пишет автор, — показали нам, что если мы нуждаемся в наследственности для понимания эволюции, то мы также нуждаемся в эволюции для понимания наследственности». С. Дарлингтон воздает дань классическим исследованиям Н. И. Вавилова и С. Г. Навашина и их учеников в изучении хромосом.

В предисловии редактора перевода рассмотрено значение постановки задачи, выбора адекватного поставленным задачам объекта исследования и соответствующего этим задачам методического арсенала эксперимента.

---

 География
 

---

Г. А. Карпов. **В КАЛЬДЕРЕ ВУЛКАНА.** М.: Наука, сер. «Человек и окружающая среда», 1980, 96 с., ц. 45 к.

Автор рассказывает об одном из самых красивых мест Камчатки — кальдере вулкана Узон. Она находится всего в 180 км от Петропавловска-Камчатского, рядом с знаменитой Долиной Геизеров. Места эти входят в территорию Кроноцкого государственного заповедника, созданного с целью охраны редких зверей и растительности Камчатки. Но кальдера вулкана Узон и сама по себе — уникальное явление природы. В этой громадной чаще, возникшей на месте некогда активного вулкана, сосредоточено множество термальных источников и теплых озер. Горячие воды Узона настолько богаты растворенными солями, что ученые буквально собственными глазами могут следить здесь за процессами образования минералов. Вот уже много лет кальдера вулкана Узон вхо-

дит в число наиболее интересных объектов, изучаемых сотрудниками Института вулканологии ДВНЦ АН СССР<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> См. статью в специальном номере нашего журнала, посвященном науке на Дальнем Востоке: На б о к о С. И. Образование руд и минералов в вулканических областях. — Природа, 1979, № 8, с. 83.

### География

**Ю. Г. Саушкин. ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ НАУКА В ПРОШЛОМ, НАСТОЯЩЕМ, БУДУЩЕМ.** Пособие для учителей. М.: Просвещение, 1980, 269 с., ц. 80 к.

В книге одного из старейших профессоров МГУ Ю. Г. Саушкина рассказывается о том, что в настоящее время в географии наряду с продолжающейся дифференциацией усиливается и противоположный процесс — интеграция, которая должна привести к единству географической науки, ее внутренней теоретической целостности. Много страниц автор отводит взаимодействию природы и общества. По мнению Ю. Г. Саушкина, решать этот вопрос должны, в первую очередь, географы, поскольку география охватывает и природные факторы общественного развития, и социально-экономическую сущность процесса взаимоотношения человека со средой его обитания.

В книге дана характеристика крупнейших географических школ и направлений, много страниц посвящено проблемам охраны природы. И хотя автор адресует книгу только учителям, она будет интересна для более широкой читательской аудитории.

### История науки

**И. Д. Рожанский. РАЗВИТИЕ ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ В ЭПОХУ АНТИЧНОСТИ** (ранняя греческая наука «о природе»). М.: Наука, 1979, 483 с., ц. 1р. 90 к.

Книга вышла в серии «Библиотека всемирной истории естествознания», издаваемой Институтом истории естествознания и техники АН СССР под редакцией чл.-корр. АН СССР С. Р. Микулинского. В центре книги стоит проблема формирования рационального отношения человека к миру, важнейшим проявлением которого и является сложное историческое образование, получившее название «научного естествознания». В соответствии с такой задачей автор рассматривает прежде всего возникновение и функционирование понятия «природы», носящего поистине всеобъемлющий характер, но вместе с тем четко ограничивающего сферу преднаучных религиозно-мифологических представлений от возникающего рационального или научного подхода к миру. Если анализ генезиса идеи «природы» раскрывает предпосылки формирования научно-философских представлений о структуре материи, об основных элементах, лежащих в основе всего многообразия явлений природы, то анализ идеи «космоса» позволяет раскрыть формирование основ научной астрономии.

Характерной особенностью книги является органическое сочетание глубокой историко-филологической эрудиции ее автора с содержательным анализом историко-философских идей и понятий, образующих фундамент науки сегодняшнего дня. Автор показывает, каким сложным был не только процесс формирования рацио-

нального отношения человека к миру, но и само познание возникновения и развития этого отношения.

### Науковедение

**НАУЧНАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ: СТРУКТУРА И ИНСТИТУТЫ.** Составление, общая редакция и вступительная статья Э. М. Мирского и Б. Г. Юдина. Пер. с англ. и нем. Л. А. Седова, М. К. Петрова, А. П. Огурцова. М.: Прогресс, 1980, 430 с., ц. 1 р. 60 к.

Среди многочисленных подходов к изучению науки одно из центральных мест занимают поиски органической специфики научной деятельности. В сборнике переводов, осуществленных научоведами-профессионалами, сделаны попытки выделить и определить эту ситуацию применительно к научным дисциплинам и обеспечивающим их существование механизмам. В нем выявляются характеристики научного исследовательского объединения, которые позволяют определить его место в рамках более крупного образования (дисциплины, отрасли науки), сравнить отдельные объединения между собой с помощью объективированных показателей (величина, структура отношений, темпы изменений).

В сборнике представлены главные направления по изучению дисциплинарного строения науки, сложившиеся в зарубежном науковедении к настоящему времени. Среди авторов — Т. Парсонс, Н. Сторер, И. Шпигель-Резинг, П. Вайнгарт, Р. Уитли и др. Они рассматривают такие вопросы как отношения между научными дисциплинами, сопротивление и восприимчивость науки к внешнему руководству, соперничество в науке, конструируют модели развития теоретических групп в социологии.

Художник П. Г. АБЕЛИН  
Художественные редакторы:  
Л. М. БОЯРСКАЯ, Д. И. СКЛАР  
Корректоры:  
Т. Д. МИРЛИС, М. Б. РЫБИНА,

Сдано в набор 7.01.81.  
Подписано к печати 12.02.81.  
Т—02736  
Формат бумаги 70×100 1/16.  
Офсет  
Усл.-печ. л. 10,4 Уч.-изд. л. 15,2.

Чеховский полиграфический комбинат Союзполиграфпрома Государственного комитета СССР по делам издательства, полиграфии и книжной торговли. г. Чехов Московской области.

Адрес редакции:  
Москва, ГСП-1,  
Мароноовский пер., 26.  
Тел. 238-24-56, 238-26-33

Бум. л. 4  
Тираж 82 000 экз. Зак. 30



Подвеска-амулет с изображением древнего приморского жителя Охотского побережья. Найдена одним из отрядов Северо-Восточно-Азиатской комплексной археологической экспедиции на стоянке в бухте Токарева в 1980 г. См. в номере: Лебединцев А. И. Антропоморфная подвеска с Охотского побережья.

Цена 50 коп.  
Индекс 70707

