

ISSN 0032-874X

З ПРИРОДА

1979



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

Академик
А. И. БЕРГ

Академик
Ю. В. БРОМЛЕЙ

Доктор биологических наук
А. Л. БЫЗОВ

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

Заместитель главного редактора
В. А. ГОНЧАРОВ

Член-корреспондент АН СССР
Б. Н. ДЕЛОНЕ

Доктор физико-математических наук
С. П. КАПИЦА

Академик
Б. М. КОЧЕТКОВ

Доктор физико-математических наук
И. Ю. КОБЗАРЕВ

Член-корреспондент АН СССР
Н. К. КОСЧЕТКОВ

Член-корреспондент АН СССР
В. Л. КРЕТОВИЧ

Академик
К. К. МАРКОВ

Доктор философских наук
Н. Ф. ОВЧИННИКОВ

Заместитель главного редактора
В. М. ПОЛЫНИН

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

Заместитель главного редактора
доктор биологических наук
А. К. СКВОРЦОВ

Доктор геолого-минералогических наук
М. А. ФАВОРСКАЯ

Заместитель главного редактора
кандидат технических наук
А. С. ФЕДОРОВ

Член-корреспондент АН СССР
В. Е. ХАИН

Член-корреспондент АН СССР
Р. Б. ХЕСИН

Академик
Н. В. ЦИЦИН

Доктор географических наук
Л. А. ЧУБУКОВ

Академик
В. А. ЭНГЕЛЬГАРТ

Доктор биологических наук
А. В. ЯБЛОКОВ



— символ межправительственной программы ЮНЕСКО «Человек и биосфера» (The Man and the Biosphere). Этим символом обозначены материалы, которые журнал «Природа» публикует в рамках участия в деятельности этой программы. См. статью «Международная программа ЮНЕСКО «Человек и биосфера», «Природа», 1979, № 1.

На первой странице обложки. Так представляют себе астрофизики дисковую аккрецию вещества, истекающего из нормальной звезды на черную дыру. Существование черных дыр — одно из важнейших предсказаний общей теории относительности Эйнштейна. См. материалы, посвященные столетию со дня рождения А. Эйнштейна: «Эйнштейн 1879—1979».

Рисунок Н. И. Семенова.

На четвертой странице обложки. Подводный аппарат «ОСА-3». См. статью Б. И. Васильева «Обитаемые подводные аппараты в морской геологии».

Фото Ю. Н. Егорова.

Редакция рукописей не возвращает.

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

В НОМЕРЕ

АЛЬБЕРТ ЭЙНШТЕЙН 1879—1979

Эйнштейн А. К исследованию состояния эфира в магнитном поле	3
Зельдович Я. Б. Альберт Эйнштейн, его время и творчество	5
Кобзарев И. Ю. А. Эйнштейн, М. Планк и атомная теория	8
Визгин Вл. П. Эйнштейн и другие. К истории создания общей теории относительности	27
Чернин А. Д. Реликтовое излучение, бесконечность и горизонт	44
Ромпе Р. А. Эйнштейн и берлинские физики в конце 20-х годов	54
Болотовский Б. М. Уникальное издание	58

РЕЦЕНЗИИ

Груздев А. Д. Способ укладки ДНК в хромосоме	62
--	----



Глазовская М. А. Способность окружающей среды к самоочищению	71
--	----



Львов П. Л. К сохранению редких растений и фитоценозов Дагестана	80
--	----

Васильев Б. И. Обитаемые подводные аппараты в морской геологии	88
--	----

Ильин А. В. Рельеф дна океана и новая глобальная тектоника	93
--	----

КРАСНАЯ
КНИГА

Тормосов Д. Д., Филатов И. Е. Ладожская нерпа — объект исследования	103
---	-----

НОВОСТИ НАУКИ

108

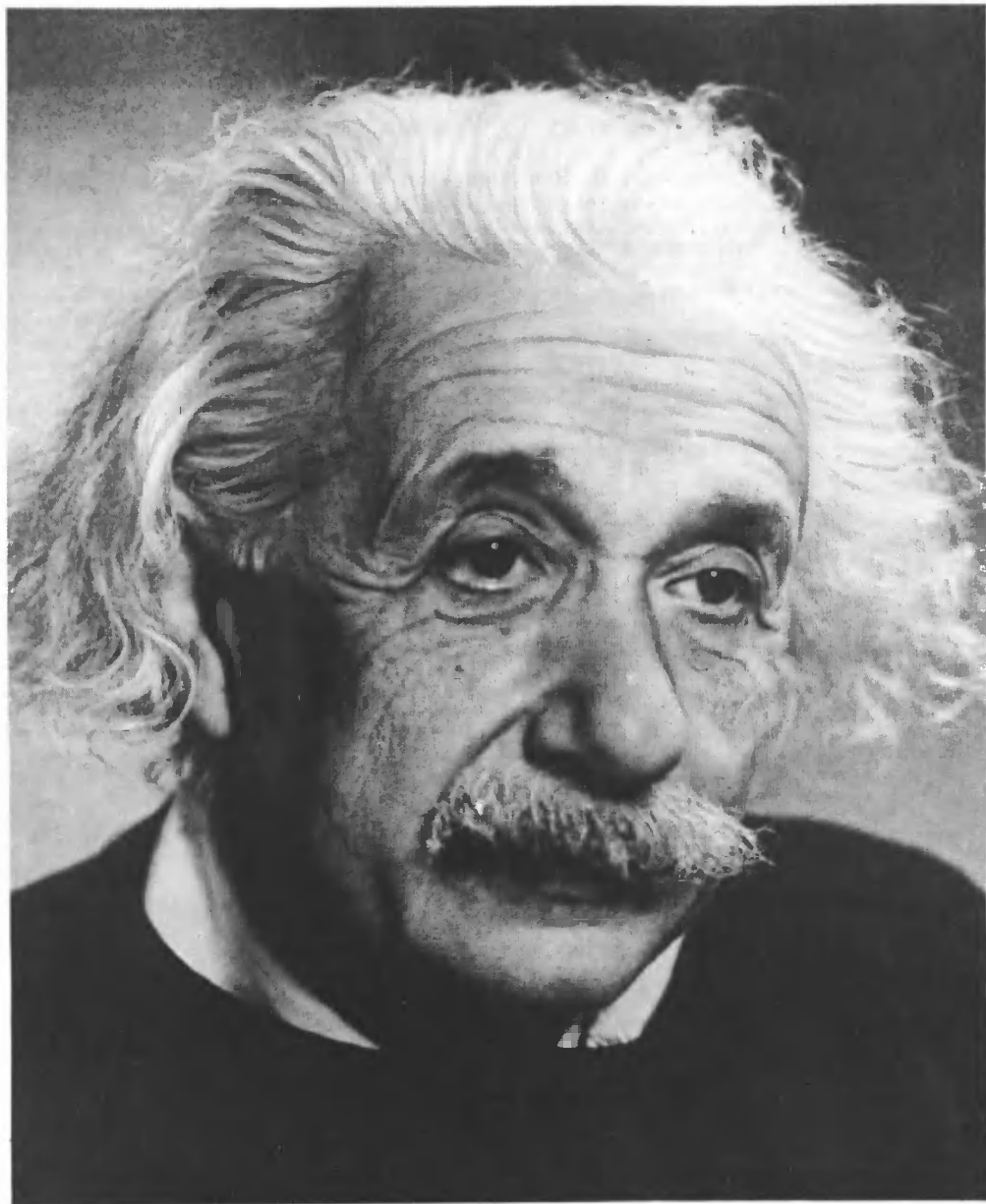
НОВЫЕ КНИГИ

124

В КОНЦЕ НОМЕРА

Гельман Э. Е. «Блистательнейший химиатр и архиатр Мегаполи-танский Анджело Сала»	126
--	-----

АЛЬБЕРТ ЭЙНШТЕЙН
1879—1979



A. Einstein

К исследованию состояния эфира в магнитном поле

А. Эйнштейн

Впервые на русском языке публикуется первая сохранившаяся попытка Эйнштейна написать научную работу. Скорее всего, Эйнштейн не делал усилий, чтобы ее напечатать; как видно из письма Эйнштейна, которое ей предшествует, она была послана им его дяде Цезарю Коху, который в течение ряда лет с вниманием и заботой относился к пробуждающемуся интересу Эйнштейна к математике и физике. Письмо и работа были найдены историком физики Ягдишом Мехрой в архиве Эйнштейна в Принстоне (США). Как оно туда попало — неизвестно. Датировка 1894—1895 гг. указана самим Эйнштейном в 1950 г. Обстоятельства, упоминаемые в письме, скорее говорят в пользу 1895 г. Перевод сделан с текста, опубликованного в ФРГ в журнале «Physikalische Blätter» (1971, Ausg. 9, S. 388—391). Работа является ярким выражением увлеченности молодого Эйнштейна проблемами «состояемости эфира».

Мой дорогой дядя, я очень рад, что несмотря на то, что мы уже давно не имели возможности увидеться, а я так безобразно ленив насчет писания писем, ты все еще интересуешься, что я поделываю. И все же я долго колебался, прежде чем отослать тебе это мое сочинение, так как оно относится к очень специальному вопросу и, кроме того, еще несколько наивно и несовершенно, что, конечно, естественно для такого юнца, как я. Если ты вообще не прочтешь это мое произведение, то я не обижусь; во всяком случае, ты должен оценить его, как робкую попыт-

ку побороть в себе нелюбовь писать, унаследованную мной от обоих родителей.

Как ты, наверно, уже знаешь, я собираюсь в Цюрихский политехникум. Тут есть, однако, значительные трудности, так как для этого мне следовало бы, собственно говоря, быть по крайней мере двумя годами старше. В следующем письме мы напишем, что из этого получится.

Сердечный привет дорогой тете и трем славным малышам.

Твой Альберт

Нижеследующие строки представляют собой первую, неприятную попытку изложить несколько простых соображений, относящихся к этому нелегкому вопросу. Я с тяжелым сердцем втиснул их все вместе в эту рукопись, которая напоминает скорей программу, чем научную работу. Я должен просить не считать это проявлением поверхностности, так как у меня не было никаких материалов, для

того чтобы проникнуть в проблему глубже, чем это можно было сделать с помощью одних размышлений. Я надеюсь, что снисходительность благосклонного читателя будет соответствовать той скромности, с которой я предлагаю ему эти строки.

Электрический ток при своем возникновении приводит окружающий его эфир в некоторое кратковременное дви-



А. Эйнштейн. 1895 г., Цюрих.

жение, природа которого пока еще точно не определена. Вопреки тому, что причина этого движения — электрический ток — остается, движение прекращается, эфир переходит в некоторое потенциальное состояние и вызывает магнитное поле. То что магнитное поле является потенциальным состоянием, доказывается существованием постоянных магнитов, поскольку закон сохранения энергии исключает здесь возможность состояния движения. Движение эфира, которое вызывается электрическим током, будет продолжаться до тех пор, пока действующие движущие силы не будут скомпенсированы эквивалентными пассивными силами, которые обуславливаются деформациями, вызванными движением самого эфира.

Удивительные опыты Герца гениальнейшим образом продемонстрировали динамическую сущность этих явлений, распространение этих движений в пространстве и их качественную тождественность со светом и теплом. И вот я думаю, что для познания электромагнитных явлений было бы важно подвергнуть детально экспериментальному исследованию также и потенциальные состояния эфира

в магнитных полях всех типов; или, другими словами, измерить упругие деформации и действующие деформирующие силы.

Любое упругое изменение эфира в некотором направлении в произвольной (свободной) точке можно обнаружить по изменению скорости распространения волны в эфире в этой точке и в этом направлении. Скорость волны пропорциональна квадратному корню из величины упругих сил, которые обуславливают распространение, и обратно пропорциональна массе эфира, которую эти силы приводят в движение. Поскольку, однако, изменения плотности, вызываемые упругими деформациями, в большинстве случаев незначительны, ими, вероятно, можно пренебречь и в этом случае. Таким образом, с большой точностью можно сказать: корень квадратный из отношения, в котором изменилась скорость распространения (длина волны), равен отношению, в котором изменилась упругая сила.

Я не отваживаюсь ответить на вопрос, какой вид эфирных волн, свет или электромагнитные колебания, и какой метод измерения длины волны более всего пригодны для изучения магнитного поля; в конечном счете это и не имеет значения.

Если вообще окажется возможным установить изменение длины волны, распространяющейся в каком-нибудь направлении в магнитном поле, то можно будет решить на опыте вопрос, влияют ли на скорость распространения только компоненты упругого состояния, параллельные направлению распространения, или также и перпендикулярные к нему. Действительно, очевидно *a priori*, что в любом регулярном магнитном поле, будь оно цилиндрического или пирамидального¹ типа, упругие состояния в какой-то точке совершенно одинаковы во всех направлениях, перпендикулярных к направлению силовой линии, и различны в направлении силовой линии. Поэтому если направить поляризованную волну перпендикулярно к силовой линии, то скорость распространения будет зависеть от ориентации плоскости поляризации — если перпендикулярная к направлению распространения волны компонента упругой силы вообще влияет на скорость распространения.

¹По-видимому, Эйнштейн представлял здесь соответственно пучок параллельных силовых линий с постоянной плотностью и пучок сходящихся в точку силовых линий, изотропный в некотором телесном угле. (Прим. перев.)

Вероятнее всего, однако же, что это не так, хотя явление двойного лучепреломления говорит как будто бы в пользу такой возможности.

Если бы вопрос о том, как три компоненты упругого напряжения влияют на скорость эфирной волны, был разрешен, можно было бы приступить к исследованию магнитного поля. Для того, чтобы ясно понять, в каком состоянии находится эфир в присутствии такого поля, следует различать три случая.

1. Силовые линии, сходящиеся пирамидально в северном полюсе.

2. Силовые линии, сходящиеся пирамидально в южном полюсе.

3. Параллельные силовые линии.

Во всех этих случаях нужно измерять скорость распространения волны в направлении силовых линий и перпендикулярно к ним. Несомненно, что если только удастся создать достаточно точные приборы для измерения длины волны, то таким образом можно будет обнаружить и упругие деформации, и причину их возникновения.

Самой интересной, но и самой тонкой проблемой является прямое экспериментальное исследование магнитного поля, возникающего вокруг электриче-

ского тока, поскольку в этом случае исследование упругого состояния эфира позволили бы нам² в какой-то мере проникнуть в таинственную сущность электрического тока. Если только предложенные выше исследования вообще ведут к цели, то мы можем, руководствуясь аналогией, сделать достоверные выводы также и о состоянии эфира в магнитном поле, окружающем электрический ток.

Количественное исследование абсолютных величин плотности и упругой силы эфира, по-моему, можно будет начать только при наличии качественных результатов в сочетании с достоверной картиной явлений. Я должен еще добавить только одно: если бы оказалось, что длины волн не пропорциональны $\sqrt{A+k}$, где A а priori означает упругие силы эфира, т. е. константу, которую мы должны найти эмпирически, а k означает переменную силу магнитного поля, пропорциональную, разумеется, исследуемым упругим силам, то причину этого следовало бы искать в изменении плотности приведенного в движение эфира, вызванном упругой деформацией.

Прежде всего должно оказаться возможным обнаружить существование пассивного сопротивления, связанного с возникновением магнитного или электрического тока, которое пропорционально длине участка тока и не зависит от сечения и материала проводника.

Перевод Я. А. Смородинского

²Здесь текст оригинала содержит грамматическое несогласование и допускает альтернативное чтение: исследование... позволит нам. (Прим. перев.)

Альберт Эйнштейн, его время и творчество

Академик Я. Б. Зельдович

В настоящее время наука переживает пору расцвета, появления новых идей и новых фактов. Необычайно расширяются практические применения науки.

Естественное желание в такой момент — оглянуться, обратиться к истории, попытаться понять, когда и в какой форме был заложен фундамент современной науки. Исполняющееся столетие со дня рождения Альберта Эйнштейна — хороший повод для такого обзора. На протяжении

значительной части последних ста лет с именем Эйнштейна были связаны самые принципиальные изменения в наших представлениях о природе. Теория относительности изменила самые фундаментальные представления о пространстве и времени, квантовая теория открыла новые закономерности микромира. Эйнштейну довелось еще участвовать и в завершении предыдущего, классического этапа развития физики. Именно его работы по теории броунов-

ского движения мельчайших частиц в жидкости послужили окончательным доказательством того, что атомы и молекулы существуют реально, а не являются удобными фикциями.

Квантовая теория была создана М. Планком, А. Эйнштейном, Н. Бором и нашла законченное выражение в работах Л. де Бройля, В. Гейзенберга, Э. Шредингера, Р. Фейнмана. Роль Эйнштейна здесь была значительна (об этом пишет в своей статье «А. Эйнштейн, М. Планк и атомная теория» И. Ю. Кобзарев). Вот выдержка из изложения доклада Эйнштейна о возникновении света, сделанного им на собрании Физико-математического рабочего сообщества в Берлинском университете 23 февраля 1927 г.: «Затем, 27 лет назад Планк своей теорией излучения, как выразился Эйнштейн, посадил физикам в ухо большую блоху, которая, впрочем, была сначала еще маленькой, так что многие не замечали ее»¹; но сам Эйнштейн не упустил блоху, скорее он ее подковал, как кузнец Левша, пользуясь замечательным инструментом теории флуктуаций.

Может быть, следует подробнее остановиться на последних квантовых работах Эйнштейна: на открытии индуцированного излучения (1917) и на статистике Бозе — Эйнштейна. Значение первой как основополагающей для лазеров отмечено в упоминавшейся статье И. Ю. Кобзарева. Подчеркнем лишь методическую сторону дела: конкретной квантовой теории атома и теории его излучения еще не существовало; однако Эйнштейн, пользуясь термодинамическими аргументами, выдвигает принцип соответствия: будущая неизвестная теория не сможет изменить более общих законов термодинамики. Этот принцип позволяет получить некоторые выводы будущей теории задолго до того, как эта теория построена и закончена.

В 1924 г. Ш. Бозе построил статистическую теорию излучения как теорию ансамбля неразличимых частиц — фотонов. Эйнштейн немедленно применил те же формулы к газу из сохраняющихся частиц, таких как атомы гелия, и обнаружил своеобразное поведение такого газа при низкой температуре, появление «конденсата», состоящего из покоящихся частиц. Сегодня мы знаем, что здесь заложены основы объяснения сверхтекучести и сверхпроводимости. Нужно ли в короткой заметке

говорить об этих работах, упоминать о теории размыва русел рек, вязкости растворов, распространении звука и т. д., откладывая изложение того, что было главным делом жизни Эйнштейна? Ответ определяется не только высокой объективной ценностью самих этих термодинамических, квантовых и макроскопических работ; важно еще, что они характеризуют широту знаний и интересов Эйнштейна, тот фон всеобъемлющего творческого владения всей современной ему физикой, на котором возникли его эпохальные работы.

Специальная теория относительности зарождалась под влиянием исследований электромагнитных явлений. Уравнения Максвелла для полей несли в себе зародыши конфликта с представлениями об абсолютном пространстве и времени. Поскольку свет есть электромагнитные колебания, то именно оптика — оптика движущихся сред, оптические явления на нашей движущейся планете взрывали гипотезу эфира, взрывали ньютоновские представления о пространстве и времени.

Лучшие умы начала века — Х. Лоренц, А. Пуанкаре, А. Эйнштейн — искали решение этих противоречий, искали объяснения того, что движение Земли вместе со всей аппаратурой не может быть обнаружено никаким опытом. Лоренц и Пуанкаре, безусловно, внесли огромный вклад в создание теории относительности. Они показали, как изменение длины движущегося тела и другие эффекты компенсируют друг друга как раз так, что абсолютное движение остается необнаружимым.

Эйнштейн сумел найти поистине революционный подход, выдвинув постоянство скорости света в качестве исходного постулата, определяющего свойства самого комплекса — пространства и времени. В этом комплексе уже не осталось места для светоносного эфира. В созданной им теории относительности абсолютными стали световые конуса, тогда как раньше абсолютным считалось время.

Естественным следствием теории относительности явилась формула, связывающая энергию и массу, $E=mc^2$, во всей ее общности, хотя еще раньше догадывались, что электромагнитные поля имеют массу, которая связана с энергией поля. Эйнштейн понял универсальность связи между энергией и массой и предложил применить ее к атомному ядру (1905). Возникла возможность использовать таблицу атомных весов при подборе ядерного топлива. Хотя превращение водорода

¹ Эйнштейн А. Собрание научных трудов, т. 3. М., 1966, с. 525.

(обыкновенного, легкого водорода, протонов) в гелий до сих пор не осуществлено в лабораторий, тем не менее благодаря формуле $E = mc^2$ астрофизики очень давно знают, что водород — главное топливо, питающее энергию звезд.

Земные применения этой формулы хорошо известны. Умолкли голоса тех, кто еще в 30-е годы, вдохновленный фашистской «идеологией», опровергал теорию относительности. Сейчас эта теория стала инженерной наукой при расчете ускорителей. И, может быть, получая первое понятие о теории относительности еще в школе, современное поколение недооценивает ее революционизирующего влияния на все научное мышление: в свете этой теории оказалось, что даже такие «простые» и «наглядные» понятия, как одновременность событий, неизменная длина стержня, правило сложения скоростей, — подлежат анализу и переосмыслению!

Теория относительности в этом смысле служила примером при построении квантовой теории. Де Бройль в 1924 г. заметил сходство релятивистских законов преобразования энергии и импульса частицы, а также частоты и волнового вектора волны — и высказал гениальную догадку, что движение каждой частицы связано с волновым процессом. Еще важнее, что теория относительности разрушила наивный (вульгарный) механистический подход к физике, к природе. Для создания последовательной квантовой теории нужна была раскованность в выборе математических методов описания природы; такая раскованность возникла после создания теории относительности, введения пространства Минковского с мнимой координатой. Но нужно было соединить раскованность с железной дисциплиной при сопоставлении конечных выводов математической теории с классической механикой и с опытом. Известно, что Эйнштейн до конца жизни так и не признал современной квантовой теории, включающей вероятностные концепции. Тем не менее еще в период, предшествовавший созданию квантовой теории в ее современной форме, он много сделал для ее развития и конкретными трудами, и через общую перестройку физики.

Теория относительности вызывает /дивление и гордость за человечество. С точки зрения эволюционной психологии, понятно, что существа (обезьяны, предки человека), чувства и мозг которых лучше оценивали расстояния, интервалы времени,

скорости, получали преимущество в борьбе за существование и продолжение рода. Но каким образом появилась у человека способность к абстрактному мышлению, примером которого является открытие теории относительности?!

Обратимся к общей теории относительности (ОТО), т. е. к современной теории тяготения. История ее создания обрисована в статье Вл. П. Визгина «Эйнштейн и другие (к истории создания общей теории относительности)»; роль общей теории относительности в космологии и вклад нашего соотечественника А. А. Фридмана в эту область описана в статье А. Д. Чернина «Реликтовое излучение, бесконечность и горизонт»; связь с современной астрономией — пульсарами, черными дырами и квазарами изложена в статье автора, которая будет опубликована в журнале «Земля и Вселенная» (1979, № 2). Не будем здесь повторять эти конкретные сведения при всем их значении, ограничимся краткой общей оценкой ОТО.

Поражает логическая строгость и завершенность ОТО, основанной на минимуме исходных данных — на факте одинакового ускорения всех тел в поле тягести. Эйнштейн делает предположение, что пространство и время являются кривыми — в том же смысле, в котором Н. И. Лобачевский, Я. Больяи, Г. Риман рассматривали кривые пространства. И этого минимума исходных посылок оказывается достаточно для построения теории со всеми предсказаниями, часть из которых блестяще подтвердилась, тогда как другие (например, существование гравитационных волн) указывают пути современным исследователям.

Общая теория относительности проливает новый свет и на соотношение массы и энергии. Так, в 1962 г. автор данной статьи показал, что, в принципе, за счет гравитационных сил в энергию может перейти и 50%, и 90% и даже 99% массы любого вещества — однако в очень искусственном, практически не реализуемом случае.

Последние 30 лет своей жизни (1925—1955) Эйнштейн с немногочисленными сотрудниками пытался построить «единую теорию поля», объединяющую тяготение и электромагнетизм. Настоящность, трудолюбие, энтузиазм Эйнштейна в этот период вызывают огромное уважение. Он мог бы вполне заслуженно почтить на лаврах, а вместо этого напряженно, мучительно трудился; казавшиеся близкими успехи сменялись разочарованиями. Обычно об этом периоде не говорят, так

как в целом ощутимых прямых результатов не осталось.

Но проходят десятилетия, и мы со все большим почтением относимся к постановке задачи в самом общем смысле. На наших глазах развиваются единые теории — теории, объединяющие слабое и электромагнитное взаимодействие, на очереди их объединение с теорией ядерных сил и сильного взаимодействия. Сама тенденция к объединению теорий плодотворна. Когда-нибудь — рано или поздно — придет и синтез теории элементарных частиц с теорией тяготения. Этот синтез будет очень не похож на «единую теорию поля» 1925—1955 гг., и все же мы должны будем вспомнить и оценить устремления Эйнштейна. Уже сейчас в теории элементарных частиц фундаментальную роль играют нелинейные теории поля. Вспомним же, что ОТО явилась первой нелинейной теорией — теорией, в которой нелинейность появилась как естественное следствие геометрической формулировки теории.

Сейчас возникает нелинейная квантовая теория тяготения; ее общепризнанный лидер — С. Хоукинг (Великобритания), открывший квантовое испарение малых черных дыр, сопровождающееся превращением всей массы в энергию. Эйнштейн представлял себе элементарные частицы как сингулярные точки пространства (вроде вершины конуса). В настоящее время актуален вопрос о квантовых флуктуациях топологии пространства и сингулярностях

в вакууме, об их связи со свойствами элементарных частиц — стабильностью и массой.

На долгом и трудном пути познания природы мы снова и снова находим идеи, восходящие к Эйнштейну. Что обусловило такую исключительную роль Эйнштейна в науке, культуре, во всей жизни человечества? Нет сомнения, что наряду с талантом, гениальностью, одаренностью — выбирайте название по своему вкусу — высшие достижения немислимы без высших человеческих качеств.

Как хорошо сказал Б. Пастернак:

«Цель творчества — самоотдача.

А не шумиха, не успех»...²

Доброжелательность и демократизм Эйнштейна, огромная концентрация внимания, благородная цель познания природы, его музыкальность — в прямом и переносном смысле — вот что первым приходит на ум. Не только физики, но и люди, далекие от науки, чувствовали человеческое тепло, исходившее от Эйнштейна; смерть его в 1955 г. ощущалась как потеря для всего человечества.

Сегодня, через сто лет после того, как началась эта светлая плодотворная жизнь, пример Эйнштейна, жизненность его идей вдохновляют нас.

² Пастернак Б. Стихотворения и поэмы. М.—Л., 1965, с. 447.

А. Эйнштейн, М. Планк и атомная теория

И. Ю. Кобзарев,

доктор физико-математических наук

Институт теоретической и экспериментальной физики
Москва

А. Эйнштейна знают сейчас прежде всего как создателя частной и общей теории относительности, но для физиков, принадлежавших к одному поколению с ним, его роль выглядела в начале века иначе; для них он был прежде всего одним из теоретиков, работавших вместе с другими над созданием атомной и прежде всего квантовой теории. Так видел себя и сам Эйнштейн, конечно, не случайно выбрав-

ший для лекции при вступлении в свою первую профессорскую «должность» в 1909 г. тему «О роли атомной теории в новейшей физике»¹. Через 4 года М. Планк, представляя Эйнштейна в Бер-

¹ Зеелиг К. Альберт Эйнштейн. М., 1966, с. 95, дальше эта книга цитируется как Зеелиг.

линскую академию наук, упомянув о «революционных следствиях этого нового представления о времени» (относительности одновременности), написал дальше: «Как бы ни была фундаментальна эта идея Эйнштейна для развития основ физики, ее применения лежат пока на самых границах измеримого. Намного значительней для практической физики было его вмешательство в другие вопросы, стоящие сейчас на переднем плане. И прежде всего, он был первым, кто продемонстрировал значение квантовой гипотезы для энергий атомных и молекулярных движений...».

Работу 1905 г. о квантах света, единственную отмеченную явно при присуждении Эйнштейну в 1921 г. Нобелевской премии, М. Планк упомянул в 1913 г. так: «То, что он в своем теоретизировании иногда, может быть, и метит мимо цели, как, например, в его гипотезе квантов света, не следует ставить ему в очень уж тяжкую вину». Не «следует ставить» и Планку в «очень уж тяжкую вину» это суждение. Как мы увидим, его возражения против гипотезы квантов света были очень серьезны, а предлагавшийся Эйнштейном ответ ошибочен. Много позже, в 1927 г. ответ дала копенгагенская интерпретация квантовой механики, но он казался Эйнштейну неприемлемым, и для него «загадка квантов» так и осталась нерешенной.

На дороге, приведшей Эйнштейна в Принстон, где он почти до самой смерти пытался решить заново проблему квантов, было много резких поворотов; здесь будет описано только ее начало.

ЭЙНШТЕЙН В ШВЕЙЦАРИИ

Началом рассматриваемого здесь отрезка времени выбран 1901 г. — год появления в основном немецком физическом журнале «Annalen der Physik» (в дальнейшем упоминаемом просто как «Annalen»²) статьи Эйнштейна «Следствия из явлений капиллярности»; концом — 1911 г. В этом году был проведен первый Сольевский конгресс, посвященный квантовой теории, где были подведены итоги первых 10 лет ее развития и где Эйнштейн делал доклад «К современному состоянию проблемы удельной теплоемкости». В этом же году была опубликована статья «О влиянии силы тяжести на распространение света», на-



А. Эйнштейн. 1908 г., Берн.

чавшая серию работ Эйнштейна по теории гравитационного поля, ставшей основным объектом его усилий в следующие четыре года.

Все это десятилетие (1901—1911) Эйнштейн провел в Швейцарии, куда он приехал еще в 1895 г. поступать в Цюрихский политехникум (Eidgenössische Technische Hochschule — Федеральную высшую техническую школу). Здесь он, провалившись на вступительных экзаменах по современному языку и истории, поступил в кантональную школу в Аарау, дававшую право на прием без экзаменов в Политехникум, которым он и воспользовался в 1896 г., поступив на факультет, готовивший преподавателей математики и естественных наук. Эйнштейн окончил Политехникум в 1900 г., некоторое время не имел постоянной работы, а с 1902 по 1909 г. занимал место эксперта сначала III, а потом

²В этом журнале печаталось большинство работ А. Эйнштейна, написанных в первом десятилетии.

II класса в Бернском патентном бюро. В 1909 г. он стал экстраординарным профессором в университете в Цюрихе, в 1911 г. уехал в Прагу (ординарным профессором) и вернулся в 1912 г. в Цюрих, чтобы вскоре, покинув его, переехать в Берлин.

Все эти годы Эйнштейн жил вдали от круга профессиональных теоретиков; такие его друзья как М. Бессо, М. Соловин в физике были дилетантами. Архив тех лет не сохранился, в двух войнах погибла значительная часть переписки, возникшей после 1905 г. (в том числе почти все письма Эйнштейна Планку); таким образом, свидетельство об этом периоде работы Эйнштейна очень мало. Тем не менее ход работы этих лет отражен уже в самих его статьях. Эти статьи, анализируемые в контексте работ других теоретиков, дополненные немногими свидетельствами современников и тем, что опубликовано сейчас из сохранившихся писем и документов, как мне кажется, все же позволяют в некоторой степени понять, какие притяжения и отталкивания, успехи и неудачи определяли тогда работу Эйнштейна, хотя некоторые детали, наверное, никогда не удастся узнать.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА В КОНЦЕ XIX ВЕКА

Бессо, познакомившийся с Эйнштейном где-то около 1897 года, вспоминал о нем, как о «молодом человеке со страстным интересом к науке, поглощенном проблемами осознания атомов и эфира» (письмо № 151, 1947 г.³). Интересы 18-летнего Эйнштейна скорее всего соответствовали картине мира, которую в 70-е годы имел Дж. Максвелл (1831—1879), занимавшийся в последние годы жизни исследованием процессов переноса (т. е. диффузии и др.) в рамках кинетической теории газов и проектами опытов для обнаружения движения Солнечной системы относительно эфира. В 90-е годы образованному теоретику такие интересы скорее всего показались бы ложно направленными, в особенности, если бы речь зашла об атомах, и особенно в Германии.

Наверное, не многие физики разделяли совсем уж крайнюю точку зрения Э. Маха и В. Оствальда, считавших, что

атомы — это вообще неудачное измышление, но очень многие, по-видимому, согласились бы с тем, что это не вопрос, которым следует заниматься. Планк, занявший после смерти Г. Кирхгофа в 1889 г. кафедру теоретической физики в Берлинском университете, с 1894 г. действительный член Берлинской академии и, так сказать, теоретик № 1 Германии, писал в 1891 г.: «Между тем развитие кинетической теории газов, последовавшее за ее первыми блестящими результатами, по-видимому, не оправдало ожиданий; любая попытка развить эту теорию более тщательно приводила к пугающему умножению трудностей. Каждый, кто изучает работы тех двух исследователей, которые наиболее глубоко проникли в проблемы молекулярных движений, — Максвелла и Больцмана — не сможет избежать впечатления, что физическая проницательность и математическое искусство, обнаруженные ими при преодолении этих проблем, не найдется в желательном соответствии с плодотворностью результатов»⁴.

Слова Планка, в известном смысле, правильно отражали положение вещей. Атомная теория конца века — это прежде всего кинетическая теория газов, и в ней, как казалось, новых результатов не было. Можно было бы думать, что после экспериментального подтверждения в 1866 г. поразительного предсказания Максвелла о независимости вязкости газа от его плотности (1860) следовало бы поверить в кинетическую теорию, но результат Максвелла остался изолированным, и многие как-то перестали его учитывать. Огромная работа, проделанная Больцманом, приведшая к кинетическому уравнению и статистической интерпретации энтропии, не дала конкретных результатов, которые можно было бы сравнивать с опытом, а обширные исследования Максвелла и Больцмана о теореме равномерного распределения энергии по любым степеням свободы привели к выводам, которые, как знал уже Максвелл, противоречили «всему на свете»; на опыте тепло не хотело переходить ни во вращательные степени свободы атомов и молекул, ни в степени свободы, ответственные за атомные спектры, ни в степени свободы эфира. Так что сомневаться в плодотворности «атомной гипотезы» было естественно.

Меньше чем в атомах сомневались

³Здесь и далее эта переписка цитируется по изданию: Albert Einstein, Michel Besso. Correspondance 1903—1955. Paris, 1972.

⁴Planck M. Physikalische Abhandlungen und Vorträge. Braunschweig, 1958, B. 1, S. 372.

Берн, начало века.



Федеральная высшая техническая школа в Цюрихе.



в эфире. Электромагнитная теория Максвелла была только недавно блестяще подтверждена Г. Герцем, и представить себе электромагнитные волны без носителя решался, кажется, только Оствальд. Правда, А. Пуанкаре (1854—1912) иногда сомневался в существовании эфира, но тогда, как видно из «Аналитического резюме» 1901 г., где написано: «Например, существование эфира, так же как и внешних объектов, является лишь удобной гипотезой», — он начинал сомневаться и в существовании внешнего мира вообще.

Так или иначе, по-видимому, и здесь рекомендовалось думать скорее об уравнениях Максвелла, чем об эфире. Докторская диссертация (примерно соответствующая нашей кандидатской) М. Абрагама (1875—1922), одного из наиболее активных немецких теоретиков поколения Эйнштейна, защищенная в 1897 г. у Планка, называлась «Электрические колебания вокруг цилиндрического проводника, рассматриваемые согласно Максвелловской теории», а докторская диссертация М. Лауэ (1879—1960), также ученика Планка, защищавшегося в 1903 г., была посвящена теории интерферометра. Несколько старший по возрасту А. Зоммерфельд (1868—1951) после первой своей статьи «Механическое представление электромагнитных явлений в покоящихся телах» обратился к более положительной деятельности: теории волчков (вместе с Ф. Клейном) и теории дифракции, а с 1900 г., получив кафедру технической механики в Аахене, энергично занимался такими вещами, как теория смазки и теория вагонных тормозов.

ПЕРВЫЕ РАБОТЫ ЭЙНШТЕЙНА

В Политехникуме лекции по физике читал профессор Г. Вебер, признанный эксперт по электротехнике; таких вещей, как теория Максвелла, он не затрагивал. Эйнштейн изучал теоретическую физику сам, читая, как сообщает К. Зеелиг, Кирхгофа, Гельмгольца, Герца, Максвелла, Больцмана и Лоренца. Впрочем, этот список не обязательно точен — книга Зеелига писалась в 50-е годы; в автобиографии 1949 г. Эйнштейн назвал Кирхгофа, Гельмгольца, Герца и др. Широко известные тогда лекции по теории газов Больцмана («Gasttheorie») неоднократно цитируются в ранних статьях Эйнштейна, там можно найти и ссылки на «Лекции по математической физике» Кирхгофа. Книгу Лоренца

1895 г. по электродинамике движущихся тел Эйнштейн назвал Зеелигу в 50-е годы.

Г. Минковский (1864—1909) читал в то время в Политехникуме лекции по разным разделам математики, в том числе «Применения аналитической механики». После одной из них Эйнштейн, как вспоминал в 50-е годы его сокурсник, сказал с энтузиазмом и с некоторой грустью: «Это первая лекция по математической физике, которую мы слышим в Поли»⁵. После этой лекции Минковский дал студентам оттиски своего обзора по теории капиллярности. Может быть, с этим и связана тема диплома Эйнштейна, напечатанного в 1901 г. в «Annalen», — «Следствия из явлений капиллярности». Из этой небольшой статьи видно, что проблема атомов продолжала интересовать Эйнштейна; статья посвящена проверке гипотезы, позволяющей выразить поверхностное натяжение через парные взаимодействия атомов. Тема «молекулярных сил» была предметом и второй статьи, вышедшей в «Annalen» в 1902 г. На этих работах ученичество кончилось: следующие три статьи в «Annalen» (1902—1904) написаны уже теоретиком экстраординарной силы.

В этой серии статей, последняя из которых носила название «К общей молекулярной теории теплоты», был развит общий метод вычисления термодинамических характеристик любой физической системы. Ранее Максвелл и Больцман разработали теорию газов, в которой рассматривалось движение молекул по отдельности, взаимодействия в ней учитывались только как столкновения. Это было неприемлемо, скажем, к твердому телу, где взаимодействие — сильное. Уже Максвелл и Больцман знали, что в этом случае следует изображать состояния системы, содержащей N молекул, как точку в фазовом пространстве $6N$ измерений и следить за ее движением с помощью уравнений Гамильтона; однако они применяли этот метод только для обоснования теоремы равномерного распределения. Эйнштейн в своих статьях систематически развил этот подход, получив формулы для средней энергии, энтропии и других термодинамических величин.

Еще до того, как Эйнштейн опубликовал первую статью из этой серии, в США вышла в 1902 г. книга Д. Гиббса (1839—

⁵ Helle Zeit — Dunkle Zeit. Zürich — Stuttgart — Wien, 1956, S. 21, (ниже эта книга цитируется как «Helle Zeit»).

1903) «Основные принципы статистической механики», в которой были развиты такие же статистические методы. Гиббс был хорошо известен в Европе; на его первые работы по термодинамике обратил внимание еще Максвелл, а интенсивное развитие термодинамических методов в конце века усилило интерес к деятельности Гиббса, что, в частности, отразилось в его избрании в 1900 г. в Берлинскую академию. Неудивительно, что книга Гиббса была быстро прочитана. Будущий друг Эйнштейна П. Эренфест (1880—1933) познакомился с ней уже в 1903 г. во время поездки к Лоренцу в Лейден⁶, а в 1904 г., когда вся европейская физика отмечала 60-летие Больцмана, Планк послал в юбилейный сборник («Festschrift») заметку, где сравнивались определения энтропии по Больцману и Гиббсу. По-видимому, не только в честь юбилея Планк считал определение по Больцману предпочтительным.

Так или иначе, работы Эйнштейна уже не могли иметь существенного влияния, хотя в больших обзорах по статистической физике учитываются и сейчас. Для самого Эйнштейна их роль была неоценима, здесь лежали истоки многих из наиболее блестящих его работ начала века.

В апреле 1905 г. Эйнштейн защитил диссертацию — «Новое определение размеров молекул». В этой работе появилась знаменитая формула для коэффициента диффузии; применяя ее к молекулам в растворе и используя другие соотношения, Эйнштейн получил для числа Авогадро значение $3,3 \cdot 10^{23}$, что было не так плохо. Публикуя работу в 1906 году в «Annalen», он улучшил метод и получил $6,56 \cdot 10^{23}$; наилучшее известное в то время значение $6,4 \cdot 10^{23}$ было найдено В. Мейером из кинетической теории газов.

КВАНТЫ ЭНЕРГИИ М. ПЛАНКА

18 марта 1905 г. в «Annalen» пришла первая в этом году статья Эйнштейна «Об одной эвристической точке зрения, касающейся возникновения и превращения света»; в ней были изложены доводы в пользу того, что свет состоит из пространства локализованных квантов с энергией $h\nu$. В работе есть несколько ссылок на статьи Планка по теории излучения, публиковавшиеся в «Annalen» в 1900 г., но более присталь-

ное чтение приводит к выводу, что Эйнштейн рассматривал свою работу скорее как альтернативу к работе Планка, чем как ее развитие. Подтверждение можно найти в статье Эйнштейна 1906 г. «К теории возникновения и поглощения света», где о работе 1905 г. сказано: «Тогда мне показалось, что теория излучения М. Планка противостоит моей работе».

Чтобы понять, в чем было дело, нам следует вернуться несколько назад. У проблемы «теплого излучения» была долгая история; еще в 1859 г. Кирхгоф показал, что плотность энергии теплового излучения ρ в замкнутой полости есть универсальная функция частоты излучения ν и абсолютной температуры T , не зависящая от материала стенок полости: $\rho = \rho(\nu, T)$. В 1884 г. Больцман вывел из принципов термодинамики, что полная энергия в такой полости, равная $\int \rho(\nu, T) d\nu$, пропорциональна T^4 , а В. Вин в 1892 г. показал, используя термодинамику и закон Доплера,

что $\rho(\nu, T) = \nu^f \left(\frac{\nu}{T} \right)$, где f —

функция одного аргумента ν/T («закон смещения» Вина). Казалось бы, оставался один шаг — определить эту функцию, однако эта задача не давалась, хотя Вин думал, что он ее решил: в 1896 г. он опубликовал доказательство «формулы Вина» $f \sim \exp\left(-\frac{\nu}{T} \text{const}\right)$, которая находилась в согласии с имевшимися тогда измерениями Ф. Пашена. Фактически Пашен независимо получил эту формулу как эмпирическую.

Планк начал публиковать работы по теории теплового излучения с 1895 г.; проблема особенно привлекала его тем, что здесь речь шла не о частной закономерности, а об «абсолютной». К 1900 г. у него было два основных результата. Первый заключался в том, что, применив уравнения Максвелла к «резонатору» (линейному упругому осциллятору), находящемуся в полости с тепловым излучением, он показал, что средняя энергия осциллятора U связана с ρ соотношением $\rho(\nu) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} U(\nu)$, где c — скорость света. Сравнивая это выражение с формулой Вина, которую Планк рассматривал как эмпирическую, он получил, что

$U(\nu) = b\nu e^{-\frac{h\nu}{T}}$. Из опыта для коэффициента b было найдено значение $b = 6,885 \cdot 10^{-27} \text{ г} \cdot \text{см}^2/\text{с}$. Так без боль-

⁶Френкель В. П. Эренфест. М., 1977, с. 28.



М. Планк

шого шума 18 мая 1899 г. родилась постоянная, которой была суждена такая великая судьба⁷.

Вторым результатом было то, что в начале 1900 г. Планк, как он думал, доказал то, на что и раньше надеялся,—

⁷Вера Планка в важность «абсолютного» была такой сильной, что он тогда же построил абсолютную систему единиц, опирающуюся на a , b , c и гравитационную константу. Для абсолютной длины он получил величину $4 \cdot 10^{-33}$ см. Сейчас, после создания Эйнштейном полевой теории тяготения и появления квантовой теории поля, мы думаем, что эта длина действительно фундаментальна — на таких расстояниях в метрике становятся существенны квантовые флуктуации. Квантовая теория гравитационного поля все еще недостаточно развита для того, чтобы рассмотреть эти вопросы последовательно. Позже Планк ввел константу h и «постоянную Больцмана» k . Постоянные a , b выражаются через них как h и h/k . Сейчас вместо h чаще используется величина $\hbar = \frac{h}{2\pi}$.

формула Вина есть следствие термодинамики.

Планк заканчивал доказательство в момент, когда измерения при малых ν поставили под сомнение формулу Вина. Вскоре он отказался и от доказательства (оно содержало необоснованное предположение, вначале показавшееся Планку самоочевидным), и от самой формулы. Уже в предыдущих работах Планк нашел формулы для энтропии осциллятора в поле теплового излучения. Интерполируя с помощью этих формул между малыми и большими значениями ν , он получил 19 октября 1900 г. свою знаменитую формулу. Оставалось найти ее теоретическое обоснование.

Найдя ошибку в своем старом доказательстве, Планк обнаружил, что из одной термодинамики функцию f определить невозможно. Раньше он относился с недоверием к статистическим методам Больцмана, но по немецкой пословице «Not kennt kein Gebot» (нужда не знает правил), Планк решил ими воспользоваться. Достаточно было найти энтропию осциллятора как функцию U : тогда стандартная формула $\frac{dS}{dU} = \frac{1}{T}$ позволила бы найти все остальные величины.

Пытаясь применить метод Больцмана, Планк рассмотрел N осцилляторов с частотой ν , полной энтропией $S_N = NS$ и полной энергией $U_N = NU$. В методе Больцмана $S = k \ln W$, где W — число способов, которым можно реализовать состояние системы. Для того чтобы в задаче Планка задать по Больцману состояние N осцилляторов, нужно было бы знать, что осцилляторы могут находиться в состояниях с энергией $0, h\nu, 2h\nu, \dots$ и вычислить W для случая, когда p_0 осцилляторов находятся на уровне 0 , p_1 на уровне $h\nu$ и т. д. Так, действительно, сделал Лоренц в Геттингенских лекциях 1910 г. «Старые и новые проблемы физики», но Планк так сделать не мог — он еще ничего не знал о состояниях осцилляторов. Вместо того, чтобы распределить осцилляторы по уровням энергии, он стал распределять энергию по осцилляторам: тут и возникла счастливая идея ввести порции энергии ϵ . Решение задачи о том, как распределить $\frac{UN}{\epsilon}$

порций по N осцилляторам можно было взять из учебника теории вероятностей, отсюда вычислялись значения S_N и S . Сравнив ответ с термодинамической теорией Вина 1892 г., Планк нашел, что нужно положить ϵ равным $h\nu$; сделав это, Планк

получил доказательство своей формулы, доложенной 14 декабря на заседании Берлинского физического общества. Так появились на свет порции энергии $\varepsilon = h\nu$.

Планк под давлением обстоятельств вышел за пределы метода Больцмана. Фактически у него W было числом всех возможных состояний ансамбля осцилляторов при заданной полной энергии $U_N = NU$. Формула $S = k \ln W$ в этом случае соответствует определению энтропии по Гиббсу (книга которого тогда еще не вышла). Планк не мог не задать вопрос, вероятность чего определяет у него W . Для того чтобы в рамках классической статистики ответить на него, нужны были бы два условия: во-первых, поместить ансамбль осцилляторов в резервуар с известными свойствами (скажем, газ) и, во-вторых, иметь уравнение Гамильтона для всей системы, чтобы знать, какие состояния следует предположить равновероятными. Первое сделать легко, фактически Планк это сделал, второе — невозможно, так как конечные порции энергии несовместимы с уравнениями Гамильтона. Оправдать равновероятность состояний ансамбля, который рассматривал Планк, можно только с помощью развитой квантовой механики, но, конечно, Планк ничего этого не знал. Возможный вероятностный смысл W для его ансамбля, помещенного в полость с излучением, был ему ясен⁸ (такая задача обсуждается в докладе 14 декабря), но Планк должен был натолкнуться на более простое препятствие, чем отсутствие квантовой механики: он вообще не знал тепловых свойств своего «основного резервуара» — излучения; как раз осциллятор и был введен для того, чтобы это препятствие обойти. В результате он прямо постулировал, что энтропия N осцилляторов равна $k \ln W$, написав: «Такое утверждение, по моему мнению, приводит, по существу, к определению названной вероятности W , ибо в предпосылках, лежащих в основе электромагнитной теории излучения, нет никакой опоры, позволяющей говорить о такой вероятности в определенном смысле».

Полученная Планком в результа-

те всего этого формула противоречила теореме равнораспределения, согласно которой надо было бы просто положить $U = kT$; тогда Планк получил бы $P \sim \nu^2 T^9$. Точно неизвестно, знал ли Планк об этом противоречии; существуют разные мнения¹⁰. Из теоремы следует, что тепловая энергия любой системы должна в конце концов перейти в тепловое излучение в эфире, если число его степеней свободы бесконечно. Об этом писал еще Максвелл, и мне кажется, что такой высокообразованный теоретик, как Планк, не знать этого не мог.

Как бы то ни было, у Планка не было оснований особенно беспокоиться. Теорема равнораспределения так или иначе противоречила опыту, а ее доказательство, данное Максвеллом и Больцманом, содержало недоказанное предположение — эргодическую гипотезу. Еще Эренфест в 1911 г., обсуждая проблему обоснования формулы Планка, начинал с разъяснения того, что основные утверждения классической статистики не следуют из механики: «Это к настоящему времени неискорененное утверждение является целиком неосновательным»¹¹.

Что бы ни думал Планк, его статья в «Annalen» 1900 г., подробно излагающая все выводы и результаты, которую потом читал Эйнштейн, может произвести впечатление, что он выводит свою формулу из основных принципов статистической физики и термодинамики. Переходя к вычислению W Планк пишет: «Для этого необходимо представить себе U_N не в виде непрерывной, неограниченно делимой величины, а в виде величины дискретной, состоящей из целого числа конечных рав-

⁹ Такой результат был получен другим методом и опубликован летом 1900 г. Резеем, но Планк об этом в работах 1900 г. не упоминает.

¹⁰ Все сведения относятся уже к 30—40 годам, и поэтому не абсолютно достоверны; письмо Планка к Р. Вуду 1931 г. и другие материалы опубликованы в книге Hermann A. Frühgeschichte der Quantentheorie. Mosbach in Baden, 1969, ниже цитируемой просто как Херманн. См. также статью Л. С. Поллака в «Избранных трудах» М. Планка.

¹¹ См.: Эренфест П. Относительность, кванты, статистика. М., 1972, с. 122. Сейчас мы знаем, что эргодическое распределение вероятностей или его квантовый аналог всегда приводят к правильным ответам — все противоречия возникали из-за неправильного спектра состояний, но и в 1900, и 1911 г. в этом можно было сомневаться.

⁸ Мне кажется, что нет никаких оснований для пессимистической гипотезы Л. Розенфельда, что Планк, не понимая, что он делает, просто шел от ответа, вычислив S из опытных данных, найдя W , а затем подбирая комбинаторную формулу, которая имела бы похожий вид. (См.: Клейн М.—«УФН», 1967, т. 92, с. 679.)

ных частей, что можно читать как описание вычислительного приема». Столь же нейтральной фразой введена формула $\varepsilon = h\nu$: «Если мы сопоставим с законом смещения Вина в последней формулировке, то увидим, что элемент энергии ε должен быть пропорционален частоте ν , следовательно $\varepsilon = h\nu$ ». Поскольку закон смещения следует из термодинамики, то может показаться, что вообще весь результат вытекает из электродинамики, больцмановского определения энтропии и термодинамики.

Важнейшим подтверждением правильности всех его рассуждений было для Планка то, что, сравнивая полученную им формулу для $\rho(\nu)$ с опытом, он получил для числа Авогадро значение $6,175 \cdot 10^{23}$, неплохо согласующееся с мейеровским значением $6,4 \cdot 10^{23}$ (и ближе к современному!).

НЕКОТОРЫЕ КОММЕНТАРИИ

Содержание этого раздела покажется, наверное, читателю, хорошо знакомому со статистической физикой, и лишним, и недостаточно точным; но мне кажется, что оно может быть полезным для тех, кто ее несколько забыл.

Основные результаты Планка сводились к трем формулам: для связи между плотностью энергии теплового излучения ρ и средней энергией осциллятора U , взаимодействующего с хаотическим электромагнитным полем:

$$\rho = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} U, \quad (A)$$

для энергии осциллятора U :

$$U = \frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}; \quad (B)$$

и для плотности энергии теплового излучения:

$$\rho(\nu) = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}. \quad (C)$$

Планк получил выражение (A) из классических уравнений Максвелла и (B) — способом, описанным выше, что, конечно, не было, как он сам знал, последовательным выводом. Как все это выглядит сейчас?

Из квантовой механики следует, что осциллятор может иметь только состоя-

ния с энергией $E_n = \left(n + \frac{1}{2}\right) h\nu$ (это

было первым достижением новой квантовой теории Гейзенберга в 1925 г.). Для того чтобы отсюда получить среднюю энергию осциллятора, взаимодействующего с тепловым резервуаром с температурой T , проще всего воспользоваться квантовым аналогом канонического распределения Гиббса. Соответствующее ему распределение вероятностей p_n имеет вид:

$$p_n = \frac{e^{-\frac{E_n}{kT}}}{K}. \quad (D)$$

Здесь предполагается, что спектр состояний дискретен, энергия уровня с номером n есть E_n и все уровни не вырождены. Очевидно, что

$$K = \left(\sum_n e^{-\frac{E_n}{kT}} \right)^{-1}$$

Элементарные вычисления приводят к выражению для среднего значения E , совпадающему с (B).

Формула (D), в свою очередь, вытекает из предположения, что для замкнутой системы (в этом случае осциллятор + термостат) все состояния с данной энергией (или находящиеся в узком интервале энергий ΔE) равновероятны. Несмотря на большие усилия, полной ясности в вопросе об обосновании этого предположения, по-видимому, нет и сейчас. Тем не менее, поскольку распределение Гиббса с учетом истинных спектров атомов, молекул и конденсированных сред приводит к результатам, прекрасно согласующимся с огромным числом опытных данных, трудно сомневаться в его фактической истинности. В классическом пределе утверждение о равновероятности состояний замкнутой системы переходит в утверждение о равновероятности любых сколь угодно малых фазовых объемов равной величины в тонком слое между двумя поверхностями данной энергии — такое распределение вероятностей называется эргодическим. Оно приводит к тому, что кинетическая энергия, приходящаяся на одну степень свободы, равна kT . Полное обоснование эргодического распределения в рамках классической механики также не получено; эргодическая гипотеза Максвелла и Больцмана, из которой они получили это распределение, оказалась неверной. Тем не менее поскольку все наблюдаемые отклонения от предсказаний классической стати-

стики связаны с квантовыми эффектами, естественно думать, что поведение достаточно сложных классических механических систем адекватно описывается эргодическим распределением¹².

Даже получив выражение (В), мы еще не получаем (С), так как для этого в квантовой теории поля нужно заново вывести (А). На самом деле это излишне. Пользуясь уравнениями Максвелла, можно найти собственные колебания электромагнитного излучения в полости (моды). Каждая такая мода и есть осциллятор. Показано, что независимо от вида полости при больших ν число мод в интервале $d\nu$ равно

$$\frac{8\pi\nu^2}{c^3} \Omega d\nu,$$

где Ω — объем полости. Применение выражения (В) к этим модам сразу дает (С).

В 1900 г. Планк не имел формулы Гиббса и не знал состояний осциллятора, поэтому он действовал более сложным методом. На современном языке его метод легко обосновать. Если система (ансамбль N осцилляторов) вырождена, то p_n следует записать в виде:

$$p_n = K e^{-\frac{E_n}{kT}} W_n(E_n),$$

где W_n — полное число состояний с энергией E_n . Поскольку W_n быстро растет с увеличением E_n , распределение p_n имеет вид узкого пика. Положение максимума, определяющее среднее значение E_n , $E_{\max} \approx \bar{E}$ получается из условия

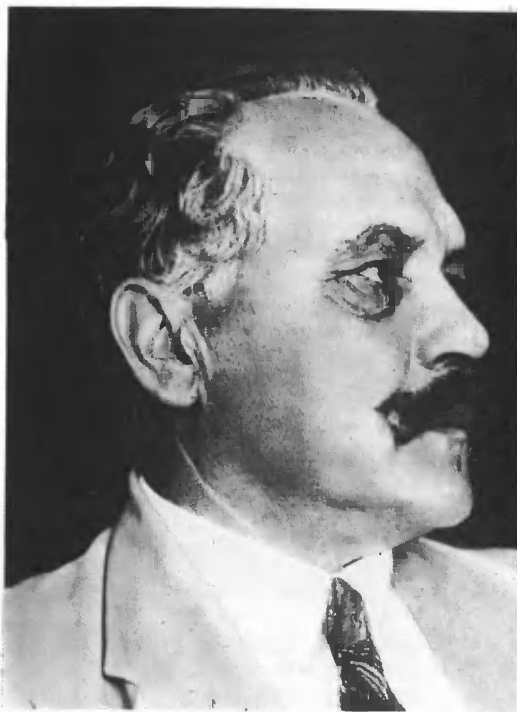
$$-\frac{1}{kT} + \frac{d \ln W_n}{dE} = 0.$$

Сравнение с термодинамической формулой

$\frac{dS}{T} = dE$ дает $S_N = k \ln W$; это и была формула, которую применил Планк.

СВЕТОВЫЕ КВАНТЫ ЭЙНШТЕЙНА И КВАНТЫ ПЛАНКА

Все поражает в работах молодого Эйнштейна; никто не был в большей степени носителем революционного духа и



А. Зоммерфельд

стиля рождавшейся новой физики, да, собственно, он сам и создавал этот стиль.

Никто лучше него не подходил к этой роли; его необычайная внутренняя свобода позволяла ему, преодолевая энергию традиционных подходов, накапливавшуюся иногда столетиями, видеть вещи под совершенно новым углом зрения. Одновременно он с удивительной безошибочностью различал, что из методов, идей и формул классической физики должно быть сохранено и останется верным и в новой физике.

Поражает мастерство, с которым сделаны его работы: обычно статьи по теоретической физике быстро стареют; модельные гипотезы, сложные способы решения задач, которые, как потом оказывалось, решались гораздо проще, — все это делает работы начала века нелегким чтением. Работы Эйнштейна совсем не таковы. С необычайным чувством реальности, которое было ему свойственно в те годы, он умел увидеть или угадать истину, избежать всего слишком модельного, с удивительной остротой взгляда и изобретательностью найти систему неожиданных взаимосвязей,

¹²Ясный краткий обзор положения дел на 1960 г. и список литературы содержится в статье М. Фирца «Статистическая механика» в сб.: Теоретическая физика XX века. М., 1962, с. 199.

позволяющую миновать все громоздкие и иногда в то время вообще непреодолимые препятствия, которые возникли бы при попытке решить проблему «в лоб», и прийти к окончательному результату. В его статьях и сегодня мало что можно сделать лучше, проще или красивее.

И, наконец, поражает, как Эйнштейн вдалеке от основных центров тогдашней физики, лишенный общения с профессионалами-теоретиками, смог абсолютно безошибочно найти все узловые проблемы физики 90-х годов и, отбрасывая все второстепенное, сделать так много для их разрешения.

Одним из самых ярких проявлений почти не имеющей себе равных в истории физики одаренности Эйнштейна была работа 1905 г. о квантах света.

Большую статью Планка в «Annalen» Эйнштейн внимательно прочел, видимо, раньше. Насколько хорошо он ее понимал, видно, например, из замечания в третьей статье по статистической физике (1904 г.), в начале которой говорится: «Сначала будет выведено выражение для энтропии системы, совершенно аналогичное выражению, найденному Больцманом для идеальных газов и введенное Планком в теорию излучения». Введенное Эйнштейном определение энтропии было тождественно с гиббсовским и, как мы видели, им фактически пользовался Планк в 1900 г.

Еще в статье 1904 г. Эйнштейн сделал первый собственный шаг в теории излучения, прямо ведущий к работе о квантах. Уже тогда он имел общую формулу для квадрата флуктуаций энергии системы, взаимодействующей с резервуаром. Исходя из правдоподобной гипотезы, что в полости размером λ_m (где λ_m — длина волны в максимуме спектра излучения) масштаб флуктуаций плотности энергии сравним с ней самой по порядку величины, Эйнштейн нашел выражение для порядка величины λ_m через постоянную в законе Больцмана (которое, как легко убедиться, действительно выполняется для истинных квантовых формул).

В 1905 г. Эйнштейн только что закончил работы по обоснованию статистики. Обоснование, конечно, содержало предположения, но тем не менее Эйнштейн не сомневался в теореме равнораспределения и, подставив в соотношение Планка $\rho \sim \nu^2 U$ выражение $U = kT$, получил $\rho \sim \nu^2 T$. Таким образом он пришел к выводу, что формулу Планка вывести из электродинамики и статистической физики нельзя. Показав, что она переходит в «правильное

выражение $\rho \sim \nu^2 T$ при $\nu \rightarrow 0$ », Эйнштейн замечает, что число Авогадро можно определить из этого предела, когда противоречия с электродинамикой и механикой нет. Это означало, что совпадение планковского значения с уже известным не доказательно. Закончив § 1, в котором это совпадение обсуждается фразой, где работа Планка как бы отклоняется: «...в дальнейшем излучение черного тела будет рассматриваться в связи с опытом, а не на основе каких-либо представлений о возникновении распространения излучения», — Эйнштейн переходит к совершенно независимому методу анализа¹³. Дальнейшее рассуждение поражает и сейчас своей уверенной простотой. Эйнштейн предположил, что статистическая физика и больцмановское соотношение между вероятностью и энтропией справедливы, и стал читать его «в другую сторону». Используя общее выражение для энтропии излучения, полученное в свое время Вином, подставляя в него формулу Вина для $\rho(\nu)$ и рассматривая вероятность того, что излучение, занимающее объем V , сосредоточится в объеме V_0 , Эйнштейн получил выражение вида

$$W \sim \left(\frac{V_0}{V} \right)^n,$$

где n имеет очевидный смысл числа фотонов. Интерпретация в терминах свободно движущихся частиц — квантов света, конечно, очевидна — так родились кванты света, причем их энергия получилась равной $h\nu$. В следующих параграфах Эйнштейн обсуждал следствия из гипотезы квантов для фотолюминесценции, фотоэффекта и ионизации газов, включая закон $E = h\nu - E_0$. Хороших опытных данных в то время не было, и Эйнштейн мог указать только на согласие по порядку величины.

Используя правило Больцмана, Эйнштейн, по-видимому, должен был думать, что основные принципы классической механики справедливы и для поля тепловых излучений, а уравнения Максвелла — нет.

¹³Бессо писал Эйнштейну в 1928 г. (письмо № 92): «Что касается меня, то я был в 1904 и 1905 году твоей публикой; при составлении (Fassung) твоего сообщения о проблеме квантов я лишил тебя части твоей славы, но зато сделал Планка твоим другом». Не означает ли это, что Эйнштейн вообще не хотел первоначально упоминать работу Планка, считая, что она «не относится к делу»? Явно отклоняющий тон обсуждения в статье Эйнштейна не противоречит такой интерпретации.

Он считал, что они справедливы только в среднем — это сказано уже во введении. Раз не было уравнений Максвелла, то вопрос о противоречии с законом $\rho \approx \nu^2 T$, следующим из теоремы равнораспределения, отпадал — отпадала формула Планка

(А) $\rho = \frac{8\pi\nu^3}{c^3} U$. В общем, вся ситуация, по-видимому, выглядела для Эйнштейна как развитие классической атомистики: Максвелл и Больцман вместо непрерывных сред ввели атомы, теперь то же надо сделать для электромагнитного поля, которое есть что-то вроде газа взаимодействующих фотонов.

БРОУНОВСКОЕ ДВИЖЕНИЕ И ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

В начале 1905 г. перед Эйнштейном двери распахивались одна за другой. 11 мая в «Annalen» пришла статья «О движении взвешенных в покоящейся жидкости шаров». В ней была еще раз получена формула для коэффициента диффузии D , а затем указана возможность измерять D , следя за случайными блужданиями маленьких сфер. Работа открыла возможность прямой проверки основных идей кинетической теории. К аналогичным выводам пришел вскоре ученик Больцмана М. Смолуховский (1872—1917). Узкое место в развитии кинетической теории было пройдено. На Сольвеевском конгрессе 1911 г. в обширном докладе Ж. Перрена «Доказательства реального существования молекул» были подведены итоги измерений числа Авогадро N_A , в том числе с помощью исследования броуновского движения. Из таблицы значений N_A , приведенной в докладе, видно, что к тому времени вопрос о «реальности молекул» вышел далеко за пределы кинетической теории; Перрен цитировал также и несколько независимых измерений, использующих радиоактивные процессы, и определение N_A из спектра излучения черного тела. Фактически вопрос для большинства исследователей, активно занимающихся фундаментальной физикой, был, по-видимому, решен раньше. Мы видели, каким образом в 1900 г. принял атомную гипотезу М. Планк, а присуждение в 1902 г. Лоренцу и Зеemannу Нобелевской премии «за исследования воздействия магнетизма на явления излучения» знаменовало триумф электронной, а с ней, конечно, и атомной теории в целом.

В июне в «Annalen» поступила статья Эйнштейна «К электродинамике движу-



В. Вин

щихся тел», за ней последовала статья «Зависит ли инерция тела от содержащейся в ней энергии». В этих двух статьях были с почти исчерпывающей полнотой изложены физические основы частной теории относительности. Счастливая судьба этих работ многим обязана Планку: уже осенью 1905 г. Лауэ слышал на семинаре его реферат о теории относительности (названия еще не было, его в долго потом употреблявшейся форме *Relativtheorie*¹⁴

¹⁴По-видимому, сам Планк употреблял этот термин в смысле «релятивистская теория (Relativtheorie) электрона Лоренца — Эйнштейна» (упомянув вместе с работой Лоренца 1904 г. также и известную публикацию Пуанкаре в «Compt. Rend.» 1905 г. См. сноску 4, В. 11, S. 127 и далее). Но очень быстро термин стали относить просто к предложенной Эйнштейном системе постулатов и следствий.



П. Дебай

ввел тоже Планк — в 1906 г.; современная форма Relativitätstheorie появилась, по-видимому, в 1907 г.). В 1906 г. Планк опубликовал фундаментальную работу, в которой была построена релятивистская механика точки; за ней последовали работы М. Лауэ, А. Зоммерфельда¹⁵ и многих других. Уже в 1908 г. в Кельне на ежегодном съезде физической секции союза немецких естествоиспытателей и врачей¹⁶ Минковский рассказывал о четырехмерной формулировке теории относительности, что знаменовало как известное завершение работы по созданию адекватной математической формулировки частной теории

относительности, так и пробуждение в Геттингене интереса к новой теоретической физике.

Принципиальная завершенность проблемы быстро становилась ясной, и уже в 1911 г. Зоммерфельд на съезде в Карлсруэ мог сказать: «Когда научный комитет нашего общества поручил мне сделать доклад о теории относительности, я позволил себе возразить, что принцип относительности уже не принадлежит сейчас к числу новых проблем физики. Хотя ему только шесть лет — работа Эйнштейна появилась в 1905 г. — для нас он уже стал неотъемлемой частью физики».

Доклад Зоммерфельда назывался «Планковский квант действия и его всеобщее значение для молекулярной физики». В нем, в частности, содержалась смелая, но совершенно неудачная идея — наложить на движение тормозящегося электрона «квантовое условие» $\int L dt = h/2\pi$ (где L — функция Лагранжа).

КВАНТОВАЯ ТЕОРИЯ ЭЙНШТЕЙНА И ПЛАНК (1906—1911)

Раньше других интерес к частной теории относительности потерял Эйнштейн; его следующие публикации — это дополнения, замечания и обзоры. То же относится и к статистической физике; хотя здесь Эйнштейн опубликовал ряд важных работ, принципиально вопрос был уже решен.

Совсем иначе было с квантовой теорией. Работа Эйнштейна 1905 г. была слишком хорошей, она слишком опережала время. Логически следующий шаг потребовал бы построения квантовой теории электромагнитного поля, что-то вроде работы Э. Ферми 1930 г., но ясно, что никто, даже Эйнштейн, не мог этого сделать в то время. Поэтому он вернулся назад.

В 1906 г. была написана работа, в которой Эйнштейн, используя методы, развитые им в 1902—1904 гг., нашел, что формула Планка возникает, если в формуле для энтропии заменить интеграл на сумму. Здесь впервые сделан вывод: «В основе теории Планка лежит следующее утверждение: «Энергия элементарного резонатора может принимать только целочисленные значения, кратные величине

$\frac{R}{N} \nu$ » (здесь $R/N = h$). Хотя так и получилась формула Планка для энергии осциллятора (резонатора), но это не было выводом формулы для $\rho(\nu)$, так как такой

¹⁵В 1905 г. Зоммерфельд покинул Аахен и, приняв кафедру теоретической физики в Мюнхене, настойчиво стремился активно участвовать в быстро разворачивающихся событиях.

¹⁶Ниже для краткости я буду называть их съездами физиков.

осциллятор с дискретными уровнями не описывался уравнениями Максвелла, что Эйнштейн подробно обсуждал. Так возникла проблема, преследовавшая Эйнштейна долгие годы: откуда, собственно, возникает формула Планка для $\rho(\nu)$. Статья кончается фразой: «Изложенные выше соображения отнюдь, по моему мнению, не опровергают теорию излучения Планка, напротив, они, по-видимому, показывают, что Планк в своей теории излучения ввел в физику новый гипотетический элемент — гипотезу световых квантов».

Эта загадочная фраза, — причем тут именно световые кванты? — означает, наверное, что Эйнштейн считал, что все дело в излучении: оно состоит из «частиц» — квантов $h\nu$, поглотив n квантов, осциллятор переходит на уровень $n h\nu$.

В 1906 г. вернулся к квантовой проблеме и Планк в своих «Лекциях по теории теплового излучения». Здесь был сделан один из самых важных шагов в развитии ранней квантовой теории¹⁷. Рассматривая свой осциллятор на фазовой плоскости (с координатами p, q в современных обозначениях), Планк получил, что траектории с данной энергией — эллипсы, а порции энергии $\epsilon = h\nu$ соответствуют кольца с площадью, которая равна h для осциллятора любой частоты. Для Планка этот вывод был важным, так как он четко выявлял универсальность h и давал некоторое обоснование равновероятности различных распределений порций энергии по осцилляторам, поскольку в статистике Гиббса равным площадям на фазовой плоскости также всегда соответствовали равные вероятности. Планк не сделал вывода о дискретном наборе состояний осциллятора — такой осциллятор ему не мог нравиться (он и в самом деле несовместим с классической механикой). Он подчеркивал, что $h\nu$ — это порции, которыми поле обменивается энергией с осциллятором. Различие было иллюзорным — такой обмен все равно не совместим с уравнениями Максвелла.

Так или иначе, здесь впервые появилось разбиение фазовой плоскости на кольца с площадью h и понятие кванта действия. Небольшая переформулировка сразу привела бы к условию квантования

$\int p dq = nh$, но тогда этого еще не произошло.

В лекциях подробно обсуждается противоречие с законом Рэлея — Джинса, однако не видно, чтобы Планка оно беспокоило; он подчеркивает, что теорема равномерного распределения возникает только из предположения о равновероятности сколь угодно малых элементов площади — а здесь у него они конечны.

Следующий шаг сделал опять Эйнштейн в 1907 г. в работе «Теория излучения Планка и теория удельной теплоемкости». Ссылки на лекции Планка показывают, что они были прочитаны Эйнштейном, однако проблема квантования действия его не заинтересовала. Но, может быть, установленная Планком аналогия с классическим эргодическим распределением вероятностей (но с заменой бесконечно малых областей конечными областями площади h) побудила Эйнштейна отнестись более внимательно к планковской формуле (В) для средней энергии осциллятора и рассмотреть ее независимо от гипотезы квантов света. Теоретическая часть статьи Эйнштейна содержит еще один вывод формулы для средней энергии — вычисленной «по Гиббсу», т. е. так, как обычно делают сейчас. Дальше Эйнштейн пишет: «...не следует ли видоизменить теорию и для других периодических колеблющихся образований, рассматриваемых молекулярной теорией теплоты?» Применив формулу Планка к «колебаниям атомов» в твердом теле, Эйнштейн смог объяснить (правда, как постепенно выяснилось, только качественно), почему теплоемкости твердых тел отклонялись от величины, ожидаемой в классической теории, и падали с понижением температуры.

Значение этой работы трудно переоценить. Дело было не только и не столько в том, что проблема теплоемкостей интересовала экспериментаторов, в особенности работавших в Берлине В. Нернста (1864—1941) и его многочисленных сотрудников. Они энергично принялись проверять результаты Эйнштейна, обнаружили, что качественно его формула хороша, но количественно не описывает экспериментальных данных, и принялись искать ее обобщение и модификации. Это в конце концов привело к тому, что тогдашний сотрудник Зоммерфельда П. Дебай (1884—1966) и одновременно М. Борн (1882—1970) и Т. Карман построили в 1912 г. корректную квантовую теорию теплоем-

¹⁷Он, по существу, определил все развитие методов «старой» квантовой механики, но авторы известных мне публикаций по истории квантовой теории этого совершенно не замечают!

кости, и это было одним из первых точных количественных подтверждений квантовой теории. Но еще более существенным было то, что уже после первых результатов школы Нернста стал ясным универсальный характер квантовых закономерностей. Если квантовая теория могла решить проблему теплоемкости твердого тела, то почему не применить ее к проблеме теплоемкостей молекул в газах, где классическая теория также приводила к противоречию с опытом, и Нернст действительно сделал это в 1911 г., приравняв для ротатора с моментом инерции I

$$\frac{h\nu}{kT} \quad \text{и} \quad \frac{1}{2} I (2\pi\nu)^2. \text{ Сейчас это кажется}$$

самым наивным, но Эйнштейн обсуждал это всерьез на Сольвеевском конгрессе в 1911 г.

Еще раньше А. де Гааз (это не В. де Хааз, который занимался низкими температурами в Лейдене!) написал работу, в которой нашел в модели атома Томпсона

$$\text{с радиусом } a \text{ связь } a \sim \frac{h^2}{me^2} \text{ и после}$$

некоторых затруднений получил за нее звание приват-доцента. Он, впрочем, рассматривал эту связь как вычисление h , поскольку в модели Томпсона a фиксировано. У де Гааза были последователи, так что Н. Бор имел все основания писать в своей первой работе 1913 г. после того, как он вывел это соотношение для a : «Соответствие наблюдаемых значений частот и размеров атома и вычисленных на основе соображений, подобных приведенным выше, было предметом многочисленных обсуждений».

Работа де Гааза была одной из обсуждавшихся на первом Сольвеевском конгрессе, где непосредственно квантовой теории были посвящены доклады Планка «Законы теплового излучения и гипотеза элементарного кванта действия», в котором он снова обсуждал разбиение фазового пространства на ячейки площади h ; Нернста «Применение квантовой теории к ряду физико-химических проблем», Зоммерфельда «Значение кванта действия для неперiodических молекулярных процессов в физике» и Эйнштейна «К современному состоянию проблемы удельных теплоемкостей». С этими докладами связан доклад Лоренца «Применение теоремы о равномерном распределении энергии к излучению», где был сделан вывод о том, что в классической физике избежать катастрофы не удастся.

На конгрессе обсуждался уже очень широкий круг проблем квантовой теории. Так, Пуанкаре поставил вопрос о том, как выглядит разбиение фазового пространства на ячейки для системы с n степенями свободы... В дискуссии после доклада Эйнштейна Лоренц предложил обсудить, не приведут ли условия квантования Планка к противоречию, если менять параметры системы. Пусть вместо осциллятора мы имеем маятник меняющейся длины, тогда меняется и частота ν ; не приведет ли условие $E = nh\nu$ к противоречию? В ответ Эйнштейн объяснил, что противоречия не возникают, так как в силу законов механики для маятника с медленно меняющейся длиной $E/\nu = \text{const}$ и, таким образом, противоречия с условием квантования энергии $E/\nu = nh$ не будет, на что Лоренц ответил: «Этот результат весьма удивителен и снимает это затруднение». Таким образом, была замечена связь между условиями квантования и адиабатической инвариантностью, подробно изученная затем Эренфестом и ставшая логической основой методов квантования «старой квантовой теории» 1913—1925 гг.

Конечно, неясностей было много, и отзыв Эйнштейна о конгрессе: «А вообще никто ничего не понимает», — не был совсем необоснован¹⁸. В частности, Эйнштейн, имея в руках всего лишь формулу для теплоемкости с одной частотой, предпринял попытку вычислить теплопроводность кристаллических тел. Тем не менее для появления работы Бора в 1913 г. и работ Зоммерфельда 1915 г., где методы квантования были разработаны уже детально, было все готово, включая резерфордовскую модель атома, которую почему-то никто на этом конгрессе не упомянул, в том числе и присутствовавший там Резерфорд.

СВЕТОВЫЕ КВАНТЫ

В дискуссии после своего доклада на конгрессе 1911 г. Планк решительно сказал: «Если слова «существование кванта действия для эфира» имеют тот смысл, что конечный элемент действия играет роль при распространении электромагнитных колебаний в эфире, то на вопрос о существовании такого элемента надо дать отрицательный ответ». Планк, в частности, уверенно отрицал всякую возможность существования световых квантов. Дело было

¹⁸См. письмо Цангеру в «Helle Zeit», S. 43.

Д. Эйнштейн. 1911(!) г.



не в том, что Планк был консерватором — Планк не проявил консерватизма ни в 1900 г., ни в 1905 г., когда он сразу же оценил теорию относительности. Дело было в том, что он не без основания считал, что корпускулярная теория света несовместима с явлениями интерференции и дифракции.

Вопрос обсуждался уже ранее в переписке Планка с Лоренцом в 1908 г. «Теорией элементарных частиц» начала века была теория электронов, а теоретиком, внесшим в ее развитие наибольший вклад — Лоренц. Конечно, он не мог не заметить проблему теплового излучения и формулу Планка, и действительно, он обсуждал и то и другое уже в статье 1901 г. «Теория излучения и второе начало термодинамики». Усилия Лоренца, по-видимому, вскоре привели его к выводу: что ни делай, получится формула Рэлея.

К 1908 г. проблема теплового излучения стала уже настолько известной, что

Лоренц был приглашен на IV Международный конгресс математиков, который состоялся в Риме в апреле 1908 г., сделать доклад «О распределении энергии между весомой материей и эфиром». В своем докладе Лоренц сказал о теории Планка, что «мы можем принять ее, только если мы полностью изменим наши основные представления об электромагнитных явлениях». По-видимому, Лоренцу больше нравилась гипотеза, высказанная Джинсом, который предположил, что равновесие между излучением и веществом не устанавливается; во всяком случае он обсуждал ее сочувственно и закончил доклад фразой: «К счастью, можно надеяться, что новые измерения спектральной плотности помогут сделать выбор между двумя теориями».

Доклад вызвал негодование у немецких экспериментаторов, занимавшихся тепловым излучением. Они-то хорошо знали, что данные по $\rho(\nu)$ не зависят от ус-

ловый опыта¹⁹, и возмущенный В. Вин вскоре писал Зоммерфельду, что «Лоренц на этот раз не показал себя вождем науки» (Führer der Wissenschaft). Лоренц быстро сдался, его начавшаяся еще перед докладом в Риме переписка с Планком, где обсуждался этот круг проблем, быстро превратилась в обсуждение квантовой гипотезы²⁰.

В своих работах, предшествовавших 1905 г., Лоренц рассматривал излучение не планковских осцилляторов, а свободных тепловых электронов, к которым рассуждения Планка были неприменимы, поэтому ему естественно было сделать вывод, что дело не в излучателях, а в эфире. Из писем видно, что Лоренц был очень близок к идее Дебая, который в 1910 г. применил формулу Планка прямо к резонансным собственным «колебаниям эфира», и таким образом дал вывод для $\rho(\nu)$, снявший возражение Эйнштейна относительно неправомерности применения уравнений Максвелла к осциллятору Планка с дискретными уровнями.

Планк, однако, возражал: «Если $h\nu$ это действительно константа эфира, могут ли уравнения Максвелла для свободного эфира сохранить свою применимость?» — и, по-видимому, Лоренц согласился с тем, что возникнут большие трудности.

В 1909 г. Эйнштейн сделал доклад на очередном съезде немецких физиков (в Зальцбурге). Доклад был первым появлением Эйнштейна на этих съездах и суммировал его взгляды и результаты, относящиеся к «сущности и структуре излучения». Отдав надгробные почести эфиру и изложив основные идеи теории относительности, он перешел к проблеме квантов, сказав: «Итак, теория относительности изменяет наши взгляды на природу света в том отношении, что свет выступает в ней не в связи с гипотетической средой, а как нечто самостоятельное, подобное веществу».

Обсудив затем свойства рентгеновского излучения, Эйнштейн сделал заключение: «Элементарный процесс излучения является, по-видимому, направленным». Дальше, повторив свои прежние возражения против планковского вывода формулы

для $\rho(\nu)$, Эйнштейн привел одну из новых формул, которые были им опубликованы ранее (в том же году) в статье «К современному состоянию проблемы излучения».

В этой работе Эйнштейн впервые решил применить метод расчета флуктуаций, разработанный в 1905 г., уже не к формуле Вина, а к формуле Планка. Из формул, полученных таким методом, он выбрал для доклада в Зальцбурге особенно наглядное выражение для флуктуаций светового давления на зеркальце площади f , помещенное в полость, заполненную тепловым излучением. Для среднего квадрата импульса Δ^2 , переданного за время t , получилось

$$\Delta^2 = \frac{1}{c} \left(h\nu\rho + \frac{c^3}{8\pi\nu^2} \right) d\nu \cdot ft.$$

Первый член соответствовал бомбардировке зеркальца квантами с импульсом $\frac{h\nu}{c}$, второй — световому давлению случайно интерферирующих волн. Формула, таким образом, указывала, что кроме неравномерностей, предсказанных волновой теорией, «существуют и другие неравномерности, которые при малой плотности энергии излучения намного превосходят неравномерности, упомянутые первыми» (курсив Эйнштейна).

В 1910 г. было естественно сделать вывод — Эйнштейн и сделал его в конце доклада: свет — это взаимодействующие друг с другом фотоны; при малых плотностях взаимодействие мало, и фотоны становятся независимыми (ρ мало, доминирует первый член), при больших плотностях взаимодействие существенно, и силовые поля, которые его вызывают, сливаются в единое волновое поле.

В дискуссии выступил Планк; он был согласен со всем, кроме квантов света. Доказательность мысленного опыта с зеркальцем была отвергнута, поскольку «не хватает моста, чтобы перейти от движения зеркала к интенсивности падающего на него излучения». (Планк считал, что именно в силу квантовых явлений взаимодействие света с зеркальцем изменится.)

Кажется, только одному физiku в Германии нравились кванты света — экспериментатору И. Штарку, который печатал статьи на эту тему с 1907 г.; выступив в дискуссии, он сказал, что рентгеновские лучи говорят в пользу квантов света.

Планк ответил, что он хочет привести «кое-что против — это интерференция при колоссальной разнице пути в сотни тысяч длин волн. Если квант интерферирует сам

¹⁹Документы, относящиеся к этому эпизоду, опубликованы Херманном.

²⁰Архив Планка погиб, поэтому сохранились только его письма к Лоренцу.

с собой, он должен иметь протяжение в сотни тысяч длин волн».

Почему Планк (как мы теперь знаем правильно) думал, что кванты интерферируют сами собой? Ведь опытов, где бы наблюдалась интерференционная картина для единичных квантов, не было! Ответ можно найти в Геттинггенских лекциях Лоренца 1910 г., где, обсудив гипотезу Эйнштейна и его формулу для энергии фотоэлектронов, Лоренц сказал: «Все же докладчик считает гипотезу световых квантов невозможной, если кванты рассматриваются как совершенно некогерентные,— допущение наиболее естественное, которое делает и Планк...». Действительно, если бы электромагнитная волна «состояла» из отдельных квантов, как хотел Эйнштейн, то непонятно, как бы она могла сохраниться когерентной на расстоянии, много больших размеров отдельных квантов. Дальше Лоренц повторил аргументы, связанные с большим размером квантов, необходимым для объяснения интерференции, и кончил описанием гипотезы И. Штарка о том, что кванты образуют упорядоченные когерентные агрегаты. (Штарк пытался установить длину агрегатов на опыте.) Как со всем этим быть, Лоренц не знал, но заключил выступление тем, что объяснение явлений типа фотоэффекта «без привлечения световых квантов встречает большие трудности».

Еще из заключительных слов Эйнштейна при обсуждении в Зальцбурге видно, что ему трудность с интерференцией серьезной не казалась: когда его предпологаемая теория будет построена, все само получится. Аргументы в пользу квантов, наверное, казались ему неотразимыми, и действительно, мало вещей в теоретической физике доказано так убедительно, как было доказано существование квантов с помощью сделанного им анализа флуктуаций. Сейчас кажется странным, что Эйнштейну столь же сильным представлялся аргумент, который в сжатой форме был высказан в Зальцбурге: существование квантов следует из теории относительности.

В 10-е и 20-е годы консервативные физики возражали против теории относительности, говоря, что эфир нужен, потому что представить поле без носителя нельзя. Оказывается, Эйнштейн тоже считал, что нельзя; в рукописи письма Планку примерно 1910 г. он писал: «Без эфира непрерывно распределяемая в пространстве энергия кажется мне чем-то невозможным (ein Unding). Можно лег-

ко показать, что с уравнениями Максвелла совместима локализация энергии, соответствующая старой теории дального действия; я собираюсь опубликовать это вскоре вместе с другими вещами».

Как он собирался это показать? В письме к Бессо от 31 декабря 1909 г. можно об этом прочесть: «Нашел я пока немного. Самое интересное — это то, что можно указать бесконечное множество распределений энергии; которые совместимы с максвелловскими уравнениями...». Дальше Эйнштейн утверждает, что распределение энергии можно изменить калибровочными преобразованиями!

Странно, что Эйнштейн не сделал напрашивавшегося заключения из успеха работы 1907 г. о теплоемкости. Казалось бы, она показывала все-таки, что квантовая проблема связана не со специфической моделью электромагнитного поля, а скорее с новой механикой, раз любой осциллятор независим от его природы описывается формулой Планка. Но, конечно, весь комплекс фактов, связанных с фотоэффектом, указывал в сторону наивной модели корпускул света. Тем не менее, может быть, не совсем случайно в письме к Бессо от 13 мая 1911 г. соседствуют фразы о том, что «теория теплоемкости отпраздновала истинный триумф, поскольку Нернст своими опытами показал, что все происходит приблизительно так, как я и предсказывал»,— и что «вопрос о действительном существовании квантов я уже больше не задаю. Я также не пытаюсь больше их конструировать, поскольку знаю теперь, что мне с этим не справиться. Но я как можно более тщательно изучаю следствия, вытекающие из этого представления, чтобы быть в курсе их применений».

Такая программа, по-видимому, не смогла поглотить Эйнштейна полностью, и он со всей энергией обратился к проблеме гравитации, по которой он уже кое-что начал делать и опубликовал в одном из обзоров по частной теории относительности (в 1907 г.). 21 июня 1911 г. была отправлена в «Annalen» небольшая заметка «О влиянии силы тяжести на распространение света». В конце 1912 г. Зоммерфельд, начавший интенсивно заниматься квантовой теорией, сообщил Д. Гильберту «Я напрасно писал Эйнштейну... Эйнштейн, по-видимому, так глубоко погрузился в гравитацию, что ко всему остальному он глух».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работа Эйнштейна над проблемой гравитации привела его к созданию, может быть, прекраснейшей из всех известных нам физических теорий — общей теории относительности, завершенной им в 1915 г. После этого Эйнштейн снова вернулся к проблеме квантов, в частности в 1916 г. он, наконец, смог найти чисто квантовый вывод формулы Планка; в этой работе, где были введены понятия вынужденного и спонтанного излучения, содержался принцип современных лазеров. К этому времени квантовая проблема превратилась уже в квантовую теорию атома Бора — Зоммерфельда, и дальнейший ход событий определялся в первую очередь ее развитием. В 1922 г. Н. Бор все еще считал, что «несмотря на свою эвристическую ценность, гипотеза световых квантов, будучи совершенно несовместимой с явлениями интерференции, не может помочь и в выяснении вопроса о природе излучения», но именно анализ условий совместности корпускулярных свойств излучения и вещества с «явлениями интерференции» и оказался основной точкой опоры для выяснения вопроса о природе и излучения, и материи.

ЛИТЕРАТУРА

Работы Эйнштейна, Планка, Бора и Пуанкаре использовались и цитировались по изданию в серии «Классики науки». Геттингенские лекции Лоренца опубликованы в книге: Г. А. Лоренц. Старые и новые проблемы физики. М., 1970, — остальные в издании Н. А. Lorenz. *Collected papers*, v. 1—9, 1934—1939. Материалы I-го Сольвеевского конгресса содержатся в книге: *Die Theorie der Strahlung und der Quanten*, Halle a. S. 1914. Доклады на собраниях немецкого физического общества публиковались в журнале «*Physikalische Zeitschrift*». Часть этих материалов, а также часть переписки Эйнштейн — Бессо опубликована в Эйнштейновских сборниках 1966—1974, но переводы не всегда точны.

Биографические материалы о немецких физиках — современниках Эйнштейна — можно найти в книгах: А. Зоммерфельд. Пути познания в физике. М., 1973; М. Борн. Размышления и воспоминания физика. М., 1977; М. Лауэ. История физики. М., 1956.

Много интересных документов опубликовано в книге Херманна, в том числе

цитированные выше письма Эйнштейна Планку (1910) и Зоммерфельда Гильберту. Эта книга содержит тщательно документированное изложение хода событий, но проблемы «теоретической теории» автор почти не анализирует. Работы Планка и Эйнштейна по квантовой теории детально анализировались в интересных статьях М. Клейна (см. сноску 8 и Эйнштейновские сборники 1966, 1974), но с его интерпретациями мне трудно согласиться — и, прежде всего, с тем, что он рассматривает работы Эйнштейна как непрерывное движение к концепции дуализма, в то время как на самом деле ничто не было так чуждо Эйнштейну, как эта идея. Это ясно видел В. Паули, писавший в 1955 г. в статье «Альберт Эйнштейн и его роль в развитии физики»: «Считая необходимым исключить состояние движения эфира из физических понятий, Эйнштейн тем не менее в вопросах теории излучения выступает сторонником использования наглядных представлений, основанных на понятиях классической теории поля». Далее Паули цитирует Зальцбургский доклад и заключает: «Интерференционные явления не зависят от интенсивности света даже в тех случаях, когда в них участвует лишь небольшое число квантов света. Эйнштейн отлично знал это, но взгляды того времени каким-то образом так и остались тем образцом для решения квантовой загадки, к которому он стремился позднее». (В. Паули. Физические очерки. М., 1975, с. 181—182.)

Эйнштейн и другие

К истории создания общей теории относительности

Вл. П. Визгин,
кандидат физико-математических наук

Институт истории естествознания и техники АН СССР
Москва

Но чем внимательней, твердыня
Notre Dame,
Я изучал твои чудовищные ребра,
Тем чаще думал я: из тяжести
недоброй
И я когда-нибудь прекрасное создам.
О. Мандельштам, 1912 г.

Нет, не один я был на пире.
А. Блок, 1909 г.

Общая теория относительности (ОТО), по единодушному признанию физиков,— наиболее замечательное достижение Эйнштейна. В ней с особой силой проявилась творческая мощь теоретического мышления в области точного естествознания. В отличие от специальной теории относительности (СТО), которая была разработана Эйнштейном в законченном виде в единственной статье «К электродинамике движущихся тел» (1905), разработка ОТО с некоторыми перерывами продолжалась примерно 8 лет: с конца 1907 г., когда был сформулирован принцип эквивалентности, физическая основа этой теории, до конца 1915 г., когда были получены общековариантные уравнения гравитационного поля, являющиеся венцом ОТО.

Многоступенчатый процесс создания теории не был монотонным: прозрения и удачи чередовались с заблуждениями и тупиками. «Позади остались долгие годы поисков в темноте, полных предчувствий, напряженное ожидание, чередование надежд и изнеможенья и, наконец, прорыв к ясности»,— писал Эйнштейн в 1933 г. об этом героическом времени. Это удивительное упорство Эйнштейна, интеллектуальное бесстрашие и, конечно, глубина и оригинальность его теоретических замыслов со временем привели к распространению представлению о том, что ОТО целиком и полностью была создана уси-

лиями одного гения, работавшего в полной изоляции от научного мира.

Характерно, например, высказывание известного польского теоретика и соавтора Эйнштейна Л. Инфельда, который писал вскоре после смерти Эйнштейна: «Иначе обстояло дело с общей теорией относительности. Эйнштейн был единственным человеком, который все еще видел трудности и работал над их устранением. ...В этот период физиков мало интересовала проблема тяготения... Никто не усматривал наличия серьезной проблемы в теории тяготения... Я не думаю, что в течение нескольких лет после сформулирования частной теории относительности вышла хоть одна работа, посвященная проблеме тяготения. Эйнштейн посвятил последней десять лет жизни в период, когда этой проблемой уже никто не интересовался»¹. Бесспорно, основные физические идеи и концептуальная структура теории были созданы прежде всего самим Эйнштейном. Несомненным и его постоянное лидерство в разработке релятивистской теории тяготения, и необыкновенная настойчивость в стремлении к реализации основного замысла теории, связанного с

¹Инфельд Л. История развития теории относительности.— В сб.: Эйнштейн и современная физика. М., 1956, с. 189.

принципом эквивалентности и расширением специального принципа относительности.

Но едва ли возможно понять процесс построения ОТО, происхождение ее основных идей и порою неожиданные повороты в их развитии, рассматривая работу Эйнштейна изолированно, без учета вклада других исследователей и его контактов с ними. В первую очередь, мы здесь имеем в виду физиков М. Планка, М. Абрагама, П. Эренфеста, Г. Нордстрема, Г. Ми, астронома Э. Фрейндлиха, математиков Г. Пика, М. Гроссмана, Д. Гильберта, философа и физика Э. Маха.

В генезисе ОТО можно выделить пять главных ступеней. Это открытие СТО, осознание необходимости релятивистского подхода к гравитации и первые попытки построения лоренц-ковариантных теорий тяготения (1905—1907). Второй важнейший шаг — это принцип эквивалентности (1907—1911). Третий шаг — скалярные теории поля с учетом принципа эквивалентности (1911—1912). Четвертая ступень — создание тензорно-геометрической концепции гравитации и первого варианта основанной на ней теории тяготения (1912—1913). Наконец, пятая, завершающая стадия — это общековариантные уравнения гравитационного поля (1913—1915).

Вклад Эйнштейна был значительным, а порою и решающим на всех стадиях. Но вместе с тем на каждой из них была существенной и роль кого-нибудь из «других» или в отношении стимулирующего влияния на Эйнштейна, или в связи с их непосредственным вкладом в развитие проблемы.

ПРЕДПОСЫЛКИ

Еще до появления СТО в области учения о гравитации сложилась ситуация, близкая к критической, хотя она и не воспринималась столь же остро, как, например, в электродинамике движущихся тел. Прежде всего, несмотря на многочисленные попытки, в течение полувека так и не удалось на основе ньютоновской теории объяснить дополнительное вековое смещение перигелия Меркурия — основное расхождение небесной механики с наблюдениями. Это породило сомнения в полной справедливости ньютоновского закона всемирного тяготения, которые усилились из-за некоторых внутритеоретических трудностей классической теории тяготения, ставших особенно заметными на фоне выдающихся достижений в области физики и ма-

тематики во второй половине XIX в. Предпринималось немало попыток создать эфирно-механистические модели гравитации и на этой основе понять, в частности, казавшийся загадочным факт равенства инертной и гравитационной масс. Была воскрешена, например, заманчивая идея Лесажа, согласно которой тяготение обусловлено столкновениями микрочастиц эфира с гравитирующими телами (В. Томсон, Х. А. Лоренц, А. Пуанкаре и др.). Делались попытки заменить ньютоновский закон различными формами законов, замещаемыми из электродинамики «дальнодействия» и учитывающими скорости взаимодействующих тел и скорость распространения гравитации. Модификации такого рода не только частично устранили аномалию Меркурия, но и создавали надежды на установление связи гравитации с электродинамикой, а также на устранение присущего ньютоновской теории мгновенного дальнодействия. Приверженцем этого подхода был, например, один из ведущих небесных механиков Ф. Тиссеран.

Появление максвелловской теории электромагнитного поля вызвало к жизни целую серию электромагнитно-полевых теорий тяготения, наиболее известной из которых была теория Лоренца (1900). Открытие неевклидовых геометрий привело к обсуждению возможной неевклидовости реального пространства, и в частности к надежде на устранение одной из существенных трудностей классической теории — гравитационного парадокса, обнаруженного К. Нейманом и Г. Зеелигером в конце XIX в. при применении закона Ньютона к бесконечному евклидову пространству (К. Шварцшильд, П. Гарцер). Придумывались и другие, например степенные и экспоненциальные, модификации ньютоновского закона с целью объяснения аномальной прецессии перигелия Меркурия и устранения гравитационного парадокса (законы Холла, Лапласа — Зеелигера и т. д.). Критическому анализу был подвергнут и фундамент классической механики, с которой была неразрывно связана ньютоновская теория тяготения: представление об абсолютном пространстве и времени, инерции, силах (К. Нейман, Г. Кирхгоф, Г. Герц и особенно Э. Мах). Описанные здесь лишь частично попытки не привели к успеху, и это воспринималось как достаточно серьезный симптом неблагополучия в области учения о гравитации.

Но уяснение принципиальных трудностей классики и неудачи прямолинейного подхода к их устранению формиро-

вали тот фундамент, на котором после появления СТО стала разрабатываться релятивистская теория тяготения. Уверенность в необходимости полевого описания гравитации, осознание фундаментального значения факта равенства инертной и гравитационной масс, физическая необоснованность пространственно-временных абсолютов, а затем и абсолютной выделенности класса инерциальных систем отсчета — таковы были итоги критического анализа классической теории тяготения и механики и предпосылки релятивистской концепции гравитации. В числе тех, кто заложил эти предпосылки, были Дж. Максвелл и Х. А. Лоренц, Э. Мах и К. Нейман, Г. Гельмгольц и В. Клиффорд (а еще раньше — Н. И. Лобачевский и Б. Риман).

РЕЛЯТИВИСТСКИЙ ПОДХОД К ПРОБЛЕМЕ ТЯГОТЕНИЯ (ЭЙНШТЕЙН, ПУАНКАРЕ, ВАКЕР, ВИЛКЕНС, МИНКОВСКИЙ)

Появление СТО радикально изменило положение в физике в целом, и в частности в области учения о тяготении. Универсальный пространственно-временной и операционально-измерительный характер этой теории требовал распространения ее на все физические явления. Формальным выражением этого стало требование ковариантности соответствующих физических законов относительно преобразований Лоренца. Первую лоренц-ковариантную теорию тяготения разработал Пуанкаре в своей классической релятивистской статье «О динамике электрона» (1906), который нашел лоренц-ковариантное обобщение закона всемирного тяготения (в форме элементарного закона взаимодействия между двумя точечными массами).

Аналогичная конструкция значительно более простым и наглядным образом была получена Г. Минковским (1907). Эти работы были продолжены А. Зоммерфельдом, Х. А. Лоренцем, В. де Ситтером. Последний, в частности, показал, что надежды на устранение аномальной прецессии перигелия Меркурия ($\sim 40''$ в столетие) с помощью теории Пуанкаре — Минковского лишены основания. Она объясняла не более $1/6$ требуемого смещения.

Близкий результат относительно перигелия Меркурия был еще раньше найден молодыми немецкими теоретиками Ф. Вакером и А. Вилкенсом, которые попытались учесть зависимость массы от скорости, известную уже в рамках электронной теории и в лоренцевом варианте

совпадавшую с релятивистской (1904—1906).

Эйнштейн, который был в отличие от Лоренца и Пуанкаре последовательным релятивистом, тем не менее полностью игнорировал теорию тяготения Пуанкаре — Минковского. Можно предположить, что, несмотря на известные достоинства этой теории, Эйнштейн с самого начала считал ее бесперспективной, так как она, в сущности, не была теорией поля. Имеется несколько свидетельств, говорящих, несмотря на отсутствие соответствующих публикаций, в пользу того, что Эйнштейн в 1906—1908 гг. также пытался разрабатывать лоренц-ковариантную теорию тяготения, но именно теорию гравитационного поля на основе релятивистского обобщения квазиполевого аналога ньютоновского закона — уравнения Пуассона². Но, пытаясь согласовать эти уравнения поля с соответствующими им уравнениями движения, он усмотрел противоречие такого подхода с фактом равенства инертной и гравитационной масс, с фактом, привлечшим внимание Эйнштейна и поразившим его воображение. Размышления над этим фактом и привели его затем к принципу эквивалентности, физической основе будущей ОТО.

Тем не менее теория Пуанкаре — Минковского была первой релятивистской теорией тяготения, не приводящей к большому противоречию с опытом, чем клас-

²Такую теорию в 1912 г. последовательно развил Г. Нордстрем. Корректирующее дополнение к этой статье содержит следующее замечание: «Из письма проф. Эйнштейна, — очевидно, Нордстрем копию статьи до ее опубликования послал Эйнштейну, — я узнал, что он уже раньше и несколько более простым способом изучал использованную выше возможность рассматривания гравитации. Однако, — сообщает далее Нордстрем, — он пришел к убеждению, что следствия такой теории не могут соответствовать действительности. Он показывает на простом примере, что, согласно этой теории, некоторая вращающаяся система будет получать в поле тяготения меньшее ускорение, чем невращающаяся система». (Nordström G. Relativitätsprinzip und Gravitation. — «Phys. Zeitschr.», 1912, Bd. 13, S. 1126). В 1933 г. Эйнштейн вспоминал также: «Первый шаг на пути решения этой задачи (т. е. построения ОТО. — Вл. В.) я впервые сделал, пытаясь рассмотреть закон тяготения в рамках СТО. Как и большинство других исследователей этого времени, я старался отыскать полевой закон тяготения...». Здесь и далее А. Эйнштейн цитируется по «Собранию научных трудов», т. 1—4. М., 1965—1967.

сическая теория. В этом ее историческое значение. Она не устранила многие из трудностей ньютоновской теории (в том числе аномальную прецессию перигелия Меркурия), и ее недостатки могли служить и для Эйнштейна стимулом развития иной формы релятивистского подхода, более естественным образом учитывающего требования концепции поля и факт равенства инертной и гравитационной масс.

ПРИНЦИП ЭКВИВАЛЕНТНОСТИ, 1907—1911 гг. (ЭЙНШТЕЙН, ПУАНКАРЕ, ПЛАНК, ФРЕЙНДЛИХ)

Формулировка принципа эквивалентности впервые была дана Эйнштейном в большом обзоре по СТО, законченном в декабре 1907 г. Сущность принципа заключалась в утверждении физической неразличимости однородного поля тяготения и равномерно ускоренной системы отсчета. Принятие всерьез этого принципа означало, что, во-первых, СТО ограничена областью негравитационной физики; во-вторых, последовательный релятивистский подход при изучении уже простейших, однородных полей тяготения требует выхода за рамки СТО, а именно ее расширения на класс равноускоренных систем отсчета, и, в-третьих, гравитация, по-видимому, в отличие от электромагнитного поля, имеет существенно иную, кинематическую (или в свете 4-мерного подхода, который по достоинству был оценен Эйнштейном только в 1911 г., — геометрическую) природу.

Физической основой принципа эквивалентности был известный со времени Галилея факт независимости ускорения свободного падения от массы и природы тел, который после Ньютона получил и иное выражение: равенство инертной ($m_{ин}$) и гравитационной (m_g) масс. Этот факт был подтвержден экспериментами Ньютона с маятниками, затем (1828) несколько более точными опытами Ф. Бесселя, а также прецизионными для своего времени опытами Л. Этвеша с крутильными весами (1888—1890). Наконец, вся небесная механика была основана на равенстве $m_{ин} = m_g$, и ее успехи служили надежной гарантией справедливости этого равенства.

Не следует думать, что факт равенства масс в классической механике и теории тяготения считался тривиальным, самоочевидным, не требующим истолкования или объяснения. При разработке различных эфирно-механистических и электро-

магнитных гипотез о природе тяготения от Лесажа (XVIII в.) до Лоренца (XX в.) равенство масс было одним из главных положений, подлежащих объяснению. Необъяснимый, эмпирический статус этого равенства в ньютоновской теории рассматривался как существенный изъян теории и стимулировал разработку упомянутых выше гипотез.

Новое звучание вопрос о равенстве масс приобрел в связи с открытием СТО и даже несколько раньше, когда в рамках электронной теории была открыта зависимость инертной массы от скорости. Пуанкаре в 1904 г. писал: «...Если нет больше массы (т. е. массы, не зависящей от скорости.—Вл. В.), то во что превращается закон Ньютона? Масса имеет два аспекта: это и коэффициент инерции, и масса тяготения, входящая в качестве множителя в закон ньютоновского притяжения. Если коэффициент инерции не постоянный, может ли быть постоянной масса притяжения? Вот в чем вопрос».

Несколько позже, уже на основе СТО, аналогичный вопрос ставил Планк (в статье, написанной в июне 1907 г.). Хотя Планк и сомневался в положительном ответе на этот вопрос, он заметил: «Если, что проще всего, ответить на этот вопрос отрицательно, то придется отказаться от общепризнанной тождественности инертной и тяжелой масс, подтвержденной всеми предпринятыми до сих пор опытами». Отрицательный ответ на вопрос Пуанкаре и Планка склонен был дать Дж. Дж. Томсон, который считал, что масса, соответствующая энергии движения заряженного тела, является массой эфира, увлекаемого телом, и потому не должна давать вклад в вес тела. Он даже попытался в 1907 г. экспериментально зарегистрировать нарушение равенства масс в маятниковых экспериментах с радием, который, как он считал, обладает большой эфирной массой. Попытки Томсона были неудачными. Большого успеха в проведении опытов с радиоактивными маятниками достиг в 1910 г. ученик Томсона Л. Саусернс, подтвердивший с точностью $5 \cdot 10^{-6}$ равенство инертной и гравитационной масс³.

³ Томсон Дж. Дж. Взаимоотношение между материей и эфиром по новейшим исследованиям в области электричества.— Новые идеи в физике, вып. 2. СПб., 1913, с. 71—92; Саусернс Л. Определение отношения массы к весу в случае радиоактивного вещества.— Там же, с. 93—106.

Эйнштейн знал упомянутую работу Планка, и можно предполагать, что она оказалась дополнительным стимулом в его размышлениях над релятивистской теорией тяготения в 1907 г. Об этом отчасти свидетельствуют воспоминания Эйнштейна о начальной фазе его работы над проблемой тяготения («Автобиографические заметки»).

Таким образом, факт равенства масс в свете СТО наводил на глубокие размышления о смысле ньютоновского закона тяготения и, в конечном счете, требовал его обобщения.

Гений Эйнштейна заключался не в том, что он обратил внимание на этот факт, придав ему фундаментальное значение, понял, что он в сочетании со СТО требует перестройки классической теории тяготения, а в том, каким образом он преобразовал его в своеобразную форму принципа относительности. Отказавшись от его объяснения в духе механистических или электромагнитных гипотез о природе тяготения, он взял факт равенства масс за основу как постулат (так же, как при создании СТО он отказался от объяснения постоянства скорости света и постулировал это) и с помощью присущих его творческой манере мышления методологических средств совершенно в духе релятивистской концепции трансформировал этот факт в принцип эквивалентности.

В число этих средств, входящих в арсенал релятивистской программы Эйнштейна, можно включить мысленные эксперименты с линейками, часами, световыми сигналами и системами отсчета; признание необходимости специального принципа относительности или даже некоторого его расширения; использование «симметричного» подхода (квалификация логических трудностей теории как своеобразных «асимметрий» и требование, чтобы симметрические ситуации на уровне явлений находили свое теоретическое выражение); некоторый вариант «принципа наблюдаемости» и т. д.

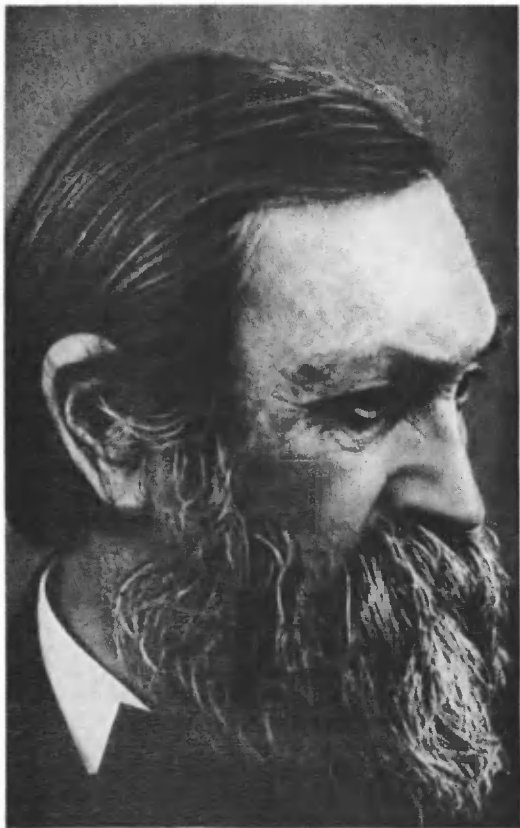
Из старших современников наибольшее влияние на Эйнштейна, и в частности в плане формирования принципа эквивалентности, оказал Э. Мах. Известны, например, два его письма к Маху, написанные в 1909 г., в которых Эйнштейн очень высоко оценивает стимулирующее влияние работ Маха о законе сохранения энергии и по истории механики на генезис теории относительности и называет себя его учеником. Критический анализ оснований механики, произведенный Махом, его крити-



А. Эйнштейн. 1910 г., Цюрих.

ка пространственно-временного абсолютизма, идея релятивизации пространства и связь ее с представлением об инерции как динамической характеристике взаимодействий тел Вселенной, наконец, методологические идеи Маха, близкие к концепции наблюдаемости, и мысль об отождествлении реальности с «событиями» — все это способствовало выработке релятивистской методологической техники, и в частности стимулировало размышления Эйнштейна, приведшие к принципу эквивалентности.

Эвристическая сила принципа эквивалентности сразу же проявилась в предсказании на его основе двух гравитационно-оптических эффектов, оказавшихся впоследствии двумя из трех основных экспериментальных подтверждений ОТО (третьим явилось объяснение аномальной прецессии перигелия Меркурия): «красного смещения» и искривления светового лу-



Э. Мах

ча гравитационным полем. Эйнштейн, однако, считал их слишком незначительными, чтобы их можно было проверить непосредственно в эксперименте.

Поэтому он в 1907—1908 гг. особые надежды возлагал на аномальное смещение перигелия Меркурия. В канун Нового 1908 г. он писал своему другу К. Габихту: «В октябре и ноябре (1907 г.—Вл. В.) я был очень занят: писал работу о принципе относительности... Сейчас я также занимаюсь исследованием закона тяготения с позиций теории относительности; надеюсь, это позволит мне пролить свет на еще не объясненное большое вековое смещение перигелия орбиты Меркурия. Но пока это не удается»⁴. В публикациях Эйнштейна с 1907 по 1914 г. вопрос о перигелии Меркурия вообще не затраги-

вался, и это привело к распространенному мнению, что до 1915 г. Эйнштейн вообще не знал об этом эффекте и что он не играл какой-либо роли в генезисе ОТО. Но принцип эквивалентности относился лишь к однородным полям и потому был недостаточен для расчета движения перигелия планеты. При попытке же распространить новый подход на неоднородные поля Эйнштейн столкнулся с фундаментальными теоретическими трудностями: во-первых, неясно было, как следует расширить класс допустимых систем отсчета, коль скоро СТО оказывается несправедливой, и, во-вторых, уже при переходе к равноускоренным системам отсчета нельзя было интерпретировать разность координат как непосредственные результаты измерения посредством линеек и часов.

В результате Эйнштейн, не сумев преодолеть эти трудности и распространить свой принцип на неоднородные поля, отложил на время разработку этой проблемы и переключил свои усилия в область квантовой теории. Одновременно он поставил перед собой задачу построения объединенной полевой теории частиц и квантов.

Не достигнув успеха в решении проблемы объединенного полевого описания квантов и частиц, Эйнштейн возвращается к принципу эквивалентности. Этот возврат совпал с его переездом в Прагу весной 1911 г. В июне Эйнштейн заканчивает статью о принципе эквивалентности, повторяющую основные результаты 1907 г. Но теперь Эйнштейн приходит к выводу о возможности экспериментального подтверждения эффекта искривления света в гравитационном поле. Кроме того, в этой статье он упростил расчет эффектов, подчеркнул универсальный физический характер принципа эквивалентности и, что особенно важно, его существенно локальную природу. Идея Эйнштейна об измерении во время затмения отклонения света звезд, расположенных у края солнечного диска, гравитационным полем Солнца была с энтузиазмом подхвачена молодым берлинским астрономом Э. Фрейндлихом, узнавшим о статье Эйнштейна до ее публикации. Трудности, возникшие при использовании принципа эквивалентности для построения теории произвольных полей тяготения, все еще оставались, и в этих условиях вопрос об экспериментальном подтверждении избранного Эйнштейном пути стоял очень остро. В письме к Фрейндлиху от 1 сентября 1911 г. он

⁴ Цит. по кн.: Зеелиг Г. Альберт Эйнштейн. М., 1964, с. 66.

писал: «Я очень хорошо знаю, что решение вопроса экспериментальным путем — дело нелегкое, так как в игру включается преломление световых лучей в солнечной атмосфере. Но можно с уверенностью сказать: если предсказываемого отклонения не существует, то исходные положения теории (т. е. принцип эквивалентности.— Вл. В.) неверны»⁵. Вообще, контакт с Фрейндлихом, внесшим на ранней стадии развития релятивистской теории тяготения основной вклад в анализ экспериментальной стороны этой теории, был для Эйнштейна очень важным, особенно если учесть, что до 1916 г. экспериментаторы и астрономы не проявляли интереса к новой теории. Кроме того, Фрейндлих в 1913—1915 гг. опубликовал несколько пионерских работ по красному смещению и аномальной прецессии перигелия Меркурия. Эйнштейн высоко ценил сотрудничество Фрейндлиха, о котором он писал в письме к Зоммерфельду от 5 февраля 1916 г.: «Фрейндлих был единственным из коллег, кто поддерживал меня в моих стремлениях в области ОТО. Он посвятил этой проблеме годы раздумий и труда, насколько это ему удавалось совмещать с напряженной и отупляющей службой в обсерватории».

СКАЛЯРНЫЕ ТЕОРИИ, 1911—1912 гг. (ЭЙНШТЕЙН, АБРАГАМ, НОРД-СТРЕМ, МИ)

Не меньшую роль, конечно, играли и такие контакты, в которых на первый план выходили дискуссии, полемика, взаимная критика. Именно такого рода каналы связывали Эйнштейна с двумя известными немецкими физиками М. Абрагамом, Г. Ми и, в значительно менее острой форме, с финским теоретиком Г. Нордстремом в переходный период от принципа эквивалентности к тензорно-геометрической концепции гравитации.

Если на новый подход к теории тяготения, выдвинутый в 1907 г. Эйнштейном, никто в период с 1908 до конца 1911 г. не обратил внимания, то на статью Эйнштейна 1911 г., в которой предсказывался интригующий гравитационно-оптический эффект, доступный экспериментальной проверке, не замедлили появиться от-

клики. Из теоретиков первым на нее отозвался один из активных сторонников электромагнитной концепции физики М. Абрагам, опубликовавший в первой половине 1912 г. серию статей по скалярной теории гравитационного поля, основанной на четырехмерном обобщении уравнения Пуассона⁶. Будучи противником СТО, он с энтузиазмом воспринял идею переменности скорости света, вытекающую из принципа эквивалентности. В этом он усмотрел крах релятивистской программы и отказ от нее самого Эйнштейна. Определенной заслугой Абрагама было то, что он дал первую скалярную, основанную на 4-мерном обобщении уравнения Пуассона, теорию произвольных гравитационных полей, из которой в первом приближении следовала установленная Эйнштейном зависимость скорости света от гравитационного потенциала. Теория не приводила к новым эмпирическим трудностям (правда, она объясняла только $1/3$ требуемого смещения перигелия Меркурия), успешно справлялась с проблемой энергии, которая была камнем преткновения для векторных теорий, аналогичных теории электромагнитного поля, предсказывала очень слабые продольные гравитационные волны.

Статьи Абрагама стимулировали дальнейшую работу Эйнштейна на пути от однородных полей к более общему случаю скалярных неоднородных (но на первых порах — статических) полей тяготения.

В июле 1912 г. Эйнштейн и Абрагам обменялись острыми полемическими замечаниями, в которых противоположности их позиций были выражены с особой рельефностью. Эйнштейн считал, что только расширение принципа относительности на основе принципа эквивалентности способно привести к успеху в теории тяготения, но ни в коем случае не отказ от релятивистского подхода, как это считал Абрагам. Критика Абрагама способствовала осознанию неудовлетворительной ситуации в области теории тяготения: с одной стороны, Эйнштейн вышел за рамки СТО (к этому привел его принцип эквивалентности), а с другой, — никакого конкретного расширения СТО и указания нового класса до-

⁵ Цит. по статье: Pyenson L. R. Einsteins early scientific collaboration.— Hist. Stud. Phys. Sci., v. 7. Princeton, 1976, p. 106, в которой обсуждаются также научные контакты Эйнштейна с Э. Фрейндлихом и П. Лаубом.

⁶ Abraham M. Zur Theorie der Gravitation.— «Phys. Zeitschr.», 1912, Bd. 13, S. 1—4. Ссылки на последующие работы и их обзор содержатся в статье: Abraham M. Neue Gravitationstheorien.— «Jahrb. d. Radiokt. u. Elektron.», 1914, Bd. 11, S. 470—520.

пустимых систем отсчета им получено не было.

Осенью 1912 г. в дискуссию включаются Г. Нордстрем и Г. Ми. Каждый из них выдвинул близкие, по существу лоренц-ковариантные, обобщения скалярного уравнения Пуассона, приближенно согласующиеся с фактом равенства инертной и гравитационной масс⁷. Оба при этом отмечали формальное сходство своих полевых уравнений с соответствующим нерелятивистским уравнением Абрагама. Достоинствами этих теорий были, во-первых, их явно полевой характер, в отличие от теории Пуанкаре — Минковского, и, во-вторых, инвариантность относительно преобразований Лоренца. Но для Эйнштейна это был пройденный этап. Принятие принципа эквивалентности, как казалось Эйнштейну, требовало неизбежного выхода за рамки СТО. К тому же осенью 1912 г. Эйнштейн, твердо уверенный в бесперспективности скалярного подхода, уже был на пути к тензорно-геометрической концепции. Лоренц-ковариантные теории тяготения, поскольку скорость света в них была постоянной, не приводили к отклонению света в гравитационном поле. Они не давали также требуемого смещения перигелия Меркурия.

Наибольшие значения в этот период, таким образом, имел диалог Эйнштейна с Абрагамом. При разработке скалярных статических теорий, новый импульс которым дали работы Абрагама, Эйнштейн не только понял неудовлетворительность скалярного направления, но и нашел некоторые конструктивные средства, оказавшиеся, как мы увидим, исходным пунктом для создания тензорно-геометрической концепции тяготения. Весьма стимулирующей была и критика Абрагама⁸. Контакты и дискуссии с Нордстремом и Ми выдвинулись на первый план уже после разработки основ тензорно-геометрической

теории тяготения (теория Эйнштейна — Гроссмана) и имели определенное значение в период с середины 1913 до 1915 г.

ТЕНЗОРНО-ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ КОНЦЕПЦИЯ ГРАВИТАЦИИ, 1912—1913 ГГ. (ЭЙНШТЕЙН, ПИК, ЭРЕНФЕСТ, ГРОССМАН, МАХ)

Решающий период в генезисе ОТО связан с созданием тензорно-геометрической концепции гравитации, согласно которой пространство — время является искривленным, римановым, и метрический тензор, определяющий расстояние между двумя бесконечно близкими точками, одновременно играет роль гравитационного потенциала. Степень искривления пространства — времени характеризует гравитационное поле и определяется распределением движущейся материи (веществом и негравитационными полями). Свободное движение частиц происходит по геодезическим линиям пространства — времени. Введение риманова пространства приводит лишь к локальной справедливости СТО, а в целом на смену преобразованиям Лоренца приходят произвольные непрерывные преобразования, и теория приобретает общековариантный характер.

Некоторый прообраз этой концепции можно усмотреть в пророческих высказываниях великих геометров XIX в. Н. И. Лобачевского, Б. Римана, В. Клиффорда⁹.

вилля, она представляет собой лишь уродливое проявление существующих трудностей». А в конце 1913 г. в письме к Бессо имеются следующие строки: «Наибольший интерес к этому (т. е. проблеме гравитации.—Вл. В.) проявляет, пожалуй, Абрагам. Правда, он основательно поносит в «Scientia» всякую там относительность, но делает это с пониманием». ⁹ «...Некоторые силы в природе следуют одной, другие своей особой геометрии»; «...силы все производят одни: движение, скорость, время, массу, даже расстояния и углы» (Лобачевский Н. И. Новые начала геометрии с полной теорией параллельных.—В кн.: Об основаниях геометрии. М., 1956, с. 64). «...или то реальное, что образует идею пространства, образует дискретное многообразие, или же нужно попытаться объяснить возникновение метрических отношений чем-то высшим — силами связи, действующими на это реальное» (Риман Б. О гипотезах, лежащих в основании геометрии.—Там же, с. 324). «...Изменение кривизны пространства составляет в действительности явление, называемое нами движением материи, весона она или эфироподобна; в физическом мире ничего иного не происходит, кроме указанного изменения...» (Clifford W. K. Mathematical Papers. N. Y., 1882, p. 21—22.).

⁷ Nordström G. Relativitätsprinzip und Gravitation.—«Phys. Zeitschr.», 1912, Bd. 13, S. 1126—1129; Mie G. Die Grundlagen einer Theorie der Materie.—«Ann. Phys.», 1913, Bd. 40, S. 1—66.

⁸ Дискуссия Эйнштейна с Абрагамом началась еще до публикации работ Эйнштейна по статической теории. 4 февраля 1912 г. он писал М. Бессо: «Абрагам развил дальше новую гравитационную теорию; мы переписываемся с ним по этому поводу, поскольку не придерживаемся совершенно одинакового мнения». 29 октября 1912 г. Эйнштейн сообщал Зоммерфельду: «Хотя новая теория Абрагама, как мне кажется, логически пра-

По свидетельству М. Соловина, члены знаменитой «Академии Олимпия» (Эйнштейн, Соловин и К. Габихт) в начале 900-х годов изучали и знаменитый доклад Римана, и многие работы Клиффорда, и близкие по тематике работы Гельмгольца и Пуанкаре. Но от парадоксальных гипотез-прозрений, лишенных физического обоснования и экспериментальной базы, до научной концепции, неизбежно вырастающей из потребностей теории и опирающейся на эксперимент, расстояние весьма значительное. Такие предвосхищения, как правило, игнорируются и забываются, и о них вспоминают лишь после того, как они заново открываются в процессе постепенного, порою драматического движения научной мысли на пути к строгому, теоретическому осмыслению действительности. Но и эти «предвестники» не следует сбрасывать со счета, так как они могут неявным образом сыграть роль катализаторов в последовательном развитии теории.

Вернемся, однако, к тому периоду, когда Эйнштейн, будучи профессором Пражского немецкого университета, обсуждал с Фрейндлихом возможности экспериментального подтверждения следствий принципа эквивалентности, переписывался и дискутировал с Абрагамом по поводу скалярных теорий тяготения, которым и сам посвятил две работы, написанные им в феврале — марте 1912 г. В Пражском немецком университете, первым ректором которого был Э. Мах и в котором работали его ученики физик А. Лампа и математик Г. Пик, организовавшие приглашение Эйнштейна в Прагу, влияние маховской методологии было очень сильным. Эйнштейн, как уже упоминалось, очень высоко ценил «Механику» Маха и его работу о законе сохранения энергии, о чем незадолго до переезда в Прагу писал самому Маху. Критика представлений об абсолютных пространстве и времени, идея обусловленности инерции действием удаленных масс Вселенной, представление об относительности всех движений, концепция «наблюдаемости» и т. д. — все эти стимулирующие идеи Маха получили как бы своеобразное усиление в стенах Пражского университета¹⁰. Осо-



П. Эренфест

бенно большую роль в этом отношении играл математик Г. Пик, который стал большим другом Эйнштейна. Ценность контактов с Пиком заключалась еще и в том, что он в этот период сам занимался дифференциальной геометрией в неевклидовых пространствах, и, по свидетельству Ф. Франка,¹¹ сменившего Эйнштейна на кафедре теоретической физики после его отъезда в Цюрих, именно Пик навел

обладающей инертной массой, увеличивает инертную массу находящейся внутри нее материальной точки Р». «Это, — делает вывод Эйнштейн, — наводит на мысль о том, что инерция материальной точки полностью обусловлена воздействием остальных масс посредством некоторого рода взаимодействия с ними», что, как продолжает в примечании к этому выводу, «полностью совпадает с точкой зрения, выдвинутой Э. Махом в его остроумных исследованиях по этому вопросу».

¹¹Frank P. H. Einstein, his life and times. N. Y., 1949, p. 82. Подчеркнем, впрочем, что нам не удалось найти каких-либо высказываний о роли Пика у самого Эйнштейна.

¹⁰Весной 1912 г. Эйнштейн написал небольшую статью, в которой связал свою статическую теорию гравитационного поля, основанную на принципе эквивалентности, с маховскими идеями об инерции. Он считал, что «присутствие оболочки К.



Г. Минковский

Эйнштейна на мысль об использовании римановой геометрии и «абсолютного дифференциального исчисления» как инструмента для преодоления трудностей релятивистской теории тяготения.

В Праге же началась многолетняя дружба между Эйнштейном и П. Эренфестом. Сначала (в апреле 1911 г.) возникла переписка, а в январе 1912 г. состоялось и личное знакомство. Главным предметом обсуждения в начавшейся переписке был так называемый парадокс Эренфеста, заключающийся в том, что в результате лоренцева сокращения длина окружности абсолютно твердого вращающегося диска уменьшается, а радиус, очевидно, остается неизменным. Эренфест отсюда делал вывод о невозможности приведения во вращение абсолютно твердого диска вокруг его центральной оси. В мае 1911 г. Эйнштейн написал небольшую заметку, в которой защищал точку зрения реальности лоренцева сокращения и рассматривал в связи с этим мысленный эксперимент Эренфеста.

Утрата координатами «непосредственного физического смысла» при использовании равноускоренных систем отсчета, рассматриваемая Эйнштейном как одна из главных трудностей на пути к релятивистской теории тяготения, подтверждалась и анализом метрических соотношений на диске Эренфеста, и размышления над этим могли навести на мысль о неевклидовых соотношениях в ускоренных системах отсчета. В февральской статье Эйнштейна 1912 г. по теории скалярного статического поля диск (или цилиндр) Эренфеста упоминается в связи с тем, что использование абсолютно твердых масштабов при общепринятом определении длины может привести (например, в равномерно вращающейся системе отсчета) к явно неевклидовым соотношениям¹². Кстати говоря, в одной из статей Эйнштейна по скалярной теории тяготения имя Эренфеста упоминается еще в связи с «карманными» измерительными приборами, введенными «по предложению Эренфеста». Мысленные эксперименты с такими приборами способствовали выработке инфинитезимального подхода, оказавшегося одной из основ тензорно-геометрической концепции тяготения.

Незадолго до переезда в Прагу (по-видимому, в 1910 г.) Эйнштейн изменяет свое отношение к 4-мерной концепции Минковского, к которой он первоначально относился весьма скептически. Теперь он оценивает ее очень высоко как в принципиальном, так и в прикладном отношении. Это — знаменательный симптом переоценки важности математических аспектов физической теории, оказавшихся неизмеримо более существенными в генезисе ОТО, по сравнению со СТО. Именно на пути использования четырехмерного формализма уже в марте 1912 г. в статье по теории статического поля (точнее, в корректурном дополнении к ней) Эйнштейн нацупывает подход к тензорно-геометрической концепции гравитации. Он замечает, что уравнения движения свободной материальной точки, движущейся в статическом гравитационном поле, можно, используя соответствующую формулировку Планка в релятивистской механике- (т. е. в СТО),

¹²В Принстонских лекциях «Сущность теории относительности» (1921) Эйнштейн использовал мысленный опыт с диском Эренфеста, чтобы показать, что в неинерциальных системах отсчета возникают неевклидовы метрические соотношения.

записать в виде четырехмерного принципа:

эквивалентного уравнению геодезической линии в четырехмерном пространстве с метрикой

$$ds^2 = c^2 dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2,$$

где в отличие от СТО скорость света является функцией координат в пространстве $c = c(x, y, z)$. Фактически это уже означало выход за рамки евклидовых или псевдоевклидовых соотношений в область геометрии четырехмерного искривленного пространства. При таком подходе реальный физический смысл приобретала именно метрика, что создавало надежду на решение трудности, связанной с «утратой координатами непосредственного метрического смысла». Отсюда был только один шаг до введения римановой метрики

$$ds^2 = g_{ik} dx_i dx_k$$

четырехмерного пространства,¹ коэффициенты которой, в соответствии с принципом эквивалентности, приобретали смысл гравитационных потенциалов. Использование произвольно движущихся систем отсчета, например ускоренных, сразу же приводило к этому. «Однако оставались нерешенными,— вспоминал Эйнштейн в 1933 г.,— еще две проблемы. 1. Если уравнения поля выражены в терминах СТО, то как их перенести на случай римановой метрики? 2. Каковы дифференциальные уравнения, определяющие саму риманову метрику?» «Тем самым,— писал Эйнштейн об этом же кульминационном моменте в генезисе тензорно-геометрической концепции гравитации незадолго до своей смерти,— проблема гравитации была сведена к чисто математической. Существуют ли дифференциальные уравнения для g_{ik} которые инвариантны относительно нелинейных преобразований координат?.. С этой задачей в голове я навел в 1912 г. моего старого студенческого друга, который тем временем стал профессором математики в Цюрихском политехникуме».

Именно в этот момент Эйнштейн переезжает в Цюрих (в сентябре 1912 г.) и, как вспоминает другой «политехник» Л. Кольрос, Эйнштейн «говорил с Гроссманом о своих заботах (в области гравитации.— Вл. В.) и сказал ему: «Гроссман, ты должен мне помочь, иначе я сойду с ума»¹³. С этого времени началось актив-



М. Гроссман

ное творческое содружество математика и физика. «Вышло так,— вспоминал впоследствии Эйнштейн,— что хотя он охотно согласился совместно работать над проблемой, но все-таки с тем ограничением, что он не берет на себя никакой ответственности за какие-либо физические утверждения и интерпретации. Он тщательно просмотрел литературу и скоро обнаружил, что указанная математическая проблема была уже решена прежде всего Риманом, Риччи и Леви-Чивитой...». В письме к Зоммерфельду от 29 октября 1912 г. Эйнштейн описывал эти события: «Теперь я занимаюсь исключительно проблемой гравитации и надеюсь, что с помощью одного здешнего товарища, математика, удастся устранить все трудности. Но одно точно: никогда в жизни я так не мучился, и теперь мне внушает большое уважение математика, тонкости которой я по своей ограниченности считал роскошью. По сравнению с этой проблемой первоначальная теория относительно является просто детской игрой».

¹³ Kohlros L. Die Erinnerungen eines Kommilitonen.— In: Helle Zeit — Dunkle Zeit. Zürich — Stuttgart — Wien, 1956, S. 27.

Однако публикация новой теории появилась не скоро. В апреле — мае 1913 г. Эйнштейн и Гроссман закончили совместную работу «Проект обобщенной теории относительности и теории тяготения», состоящую из физической части, написанной Эйнштейном, и математической части, написанной Гроссманом. Эта часть содержала изложение римановой геометрии и тензорного анализа, приспособленное к четырехмерному пространству — времени. Таким образом, «Проект» содержал основы тензорно-геометрической концепции гравитации, являющейся ядром ОТО. Логика перехода от скалярного потенциала к тензорному, от псевдоевклидова пространства к риманову и от специального принципа относительности к общему в «Проекте» соответствует описанному выше ходу мысли Эйнштейна, связанному с четырехмерной вариационной формулировкой уравнения движения свободных частиц в статическом поле тяготения.

В этой работе впервые была ясно сформулирована мысль, что уравнение движения свободной материальной точки совпадает с уравнением геодезической линии риманова пространства — времени, но в явном виде уравнение геодезической линии

$$\frac{d^2 x_\tau}{ds^2} + \sum_{\mu\nu} \left\{ \begin{matrix} \mu\nu \\ \tau \end{matrix} \right\} \frac{dx_\mu}{ds} \frac{dx_\nu}{ds} = 0 \quad (1)$$

появилось лишь в статье «Формальные основы ОТО», законченной Эйнштейном в ноябре 1914 г.

Теория, изложенная в «Проекте», теория Эйнштейна—Гроссмана, как ее называли в те годы, отличалась от ОТО в одном важном пункте, а именно: уравнениями самого гравитационного поля. Эйнштейн и Гроссман вплотную подошли к общековариантным уравнениям гравитации, близким к тем, которые легли в основу ОТО, но, не сумев согласовать их с ньютоновским приближением, законом сохранения энергии и принципом причинности¹⁴, вынуждены были отказаться от

них. Уравнения поля, полученные ими, были ковариантны лишь относительно линейных преобразований, а это и было главной слабостью теории Эйнштейна—Гроссмана, так как программе общековариантной теории в целом реализовать не удалось. Потребовались еще примерно два с половиной года «долгих поисков в темноте», завершившихся в ноябре 1915 г. «прорывом к ясности» — возвратом к требованию общей ковариантности уравнений поля и формулировкой таких уравнений.

ОБЩЕКОВАРИАНТНЫЕ УРАВНЕНИЯ ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ, 1913—1915 ГГ. (ЭЙНШТЕЙН И ГИЛЬБЕРТ)

Какова была реакция физиков на теорию Эйнштейна—Гроссмана? Приверженцы скалярного подхода Ми и Абрагам критиковали теорию Эйнштейна—Гроссмана за ее внутреннюю непоследовательность: при общековариантном замысле теории уравнения поля оставались лишь линейно-ковариантными. Ми делал отсюда вывод о неизбежности возврата к требованию лоренц-ковариантности, а Абрагам рассматривал это обстоятельство как указание на необходимость отказа от релятивистской программы вообще¹⁵. Возможно, эта критика Ми, Абрагама и отчасти Нордстрема была одним из стимулов в поисках Эйнштейном более удовлетворительного решения проблемы полевых уравнений.

Летом 1913 г. Нордстрем существенно усовершенствовал свою лоренц-ковариантную скалярную теорию (2-я теория

что если уравнения поля общековариантны, то существует такое преобразование координат, которое одному и тому же распределению энергии — импульса материи позволяет сопоставить в различных координатных системах различные значения потенциала. В этом он усмотрел, таким образом, нарушение принципа причинности. Ошибка Эйнштейна заключалась в том, что он принял формально различные, но физически равноправные решения уравнений за существенно различные.

¹⁵ Ми выступил с критикой тензорно-геометрической теории на дискуссии по докладу Эйнштейна на 85-м Собрании немецких естествоиспытателей в Вене в сентябре 1913 г. — Эйнштейновский сборник, 1971. М., 1972, с. 361—370. См. также: Mie G. Bemerkungen zu der Einsteinschen Gravitationstheorie. — «Phys. Zeitschr.», 1914, Bd. 15, S. 115—112; S. 169—176. Критика Абрагама наиболее обстоятельно развита в его обзоре 1914 г. — см. ссылку 6.

¹⁴ Причинность Эйнштейн понимал здесь как такую связь состояний физической системы, при которой определенное распределение энергии — импульса в некоторой пространственно-временной области должно приводить, в соответствии с уравнениями движения этой системы (т. е. уравнениями поля), к однозначно определенным значениям гравитационного потенциала в рассматриваемой области. Однако на простом примере он убедился,

Нордстрема)¹⁶ в отношении ее согласования с равенством инертной и гравитационной масс, и Эйнштейн с осени 1913 г. считал ее единственной серьезной альтернативой теории Эйнштейна—Гроссмана. Скалярные теории Абрагама, Ми и 1-я теория Нордстрема не удовлетворяли либо принципу относительности, либо принципу эквивалентности (или требованию равенства масс). Эксперименты по проверке отклонения света во время солнечного затмения летом 1914 г., которые планировались Фрейндлихом, должны были решить вопрос в пользу одной из этих двух теорий. Достоинства тензорно-геометрической теории, связанные с расширением принципа относительности, согласование ее с маховской концепцией относительности инерции и др., не компенсировали, в глазах большинства физиков, непоследовательность теории, выражавшуюся в ограниченной ковариантности полевых уравнений при общековариантном замысле теории, и значительно большую сложность по сравнению с более простой и внутренне непротиворечивой 2-й теорией Нордстрема. В письме к Бессо в конце 1913 г. Эйнштейн сетовал на весьма скептическое или равнодушное отношение научной общественности к своей теории: «К работе, связанной с гравитацией, занимающаяся физикой часть человечества относится довольно пассивно... К Лоренцу я собираюсь весной с тем, чтобы обсудить эти дела. Он проявляет большой интерес к ним, так же как и Ланжевэн. Лауэ этим принципиальным доводам не внимает, Планк — тоже, скорее уж Зоммерфельд». Это замечание Эйнштейна следует понимать, вероятно, и в том смысле, что большинство физиков вообще не проявляло интереса к проблеме гравитации.

На торжественном собрании по поводу принятия Эйнштейна в члены Прусской академии наук в Берлине 2 июля 1914 г. Планк, высоко оценив достижения Эйнштейна в области ОТО и квантовой теории, заметил, что и в теории Эйнштейна — Гроссмана, ввиду лишь линейной ковариантности полевых уравнений, «не устранена необходимость обоснования системы координат..., поскольку... не все нужные системы могут быть приняты с достаточным основанием». Лауэ даже в 1917 г. после построения ОТО и объяснения на ее основе аномальной прецессии перигелия



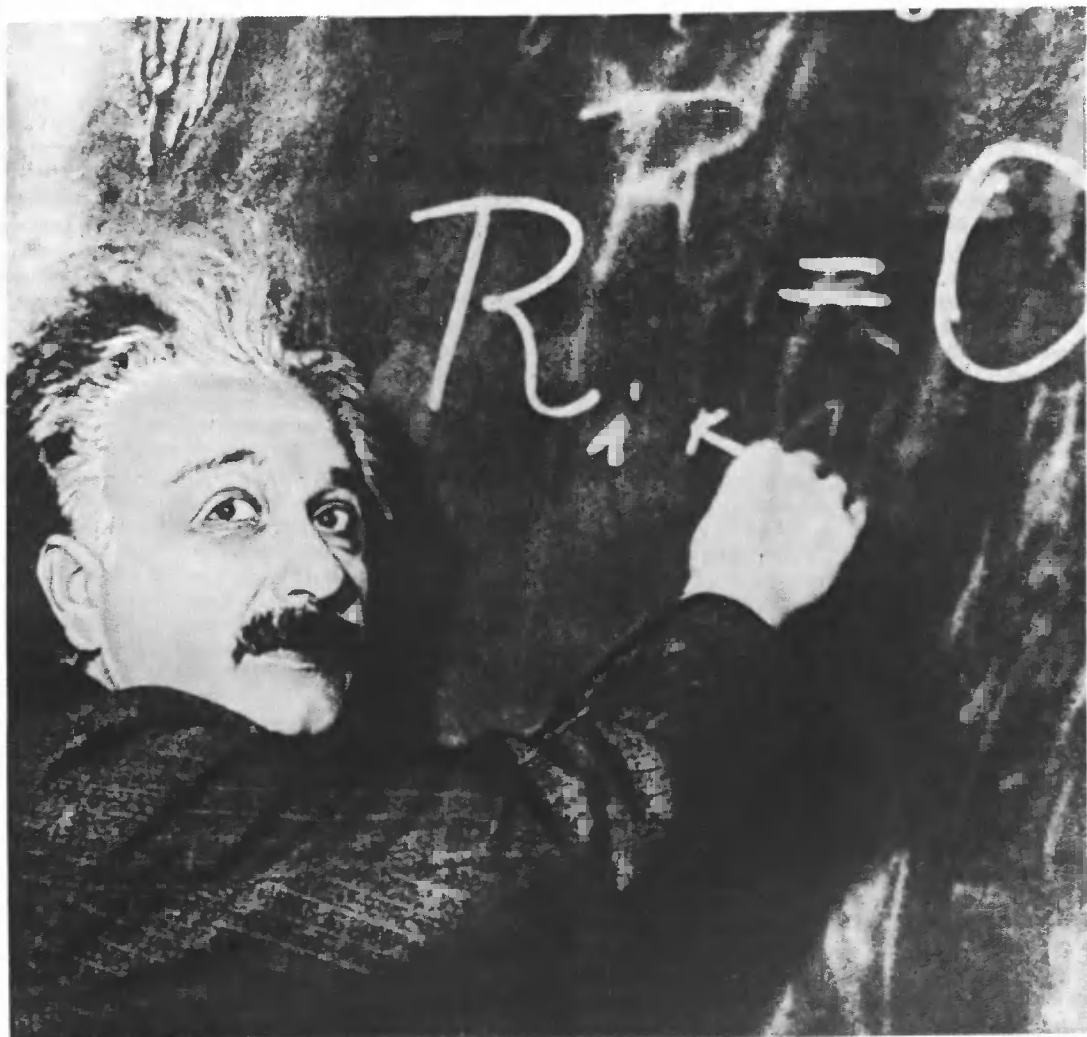
Д. Гильберт

Меркурия продолжал считать 2-ю теорию Нордстрема более предпочтительной¹⁷.

Весной 1914 г. Эйнштейн, как об этом свидетельствует его мартовское письмо к Бессо, пришел к выводу, что закон сохранения энергии — импульса позволяет выделить более широкий класс допустимых систем (чего нельзя было сказать в случае принятия лишь линейной ковариантности полевых уравнений). Хотя физический (или геометрический) смысл этих «приспособленных» систем отсчета оставался неясным, на что указывали, например, и Планк в цитированной выше речи, и Абрагам в своем обзоре 1914 г., Эйнштейну, по-видимому, до весны или лета 1915 г. это направление казалось перспективным: «Общая теория инвариантности, — писал он Бессо, — была, в сущности, только препятствием... непонятно остается только, как это я так

¹⁶ Nordström G. Zur Theorie der Gravitation vom Standpunkt des Relativitätsprinzips. — Ann. Phys., 1913, Bd. 42, S. 533—554.

¹⁷ Laué M. Die Nordströmsche Gravitationstheorie. — Jahrb. d. Radioakt. u. Elektron., 1917, Bd. 14, S. 263—313.



А. Эйнштейн. 1921 г., Пасадена.

долго бродил в потемках, пока не натолкнулся на то, что было так близко».

Решающий перелом в развитии проблемы уравнений гравитационного поля произошел в ноябре 1915 г., когда Эйнштейн «вернулся к требованию... общей ковариантности уравнений поля, от которой... отказался с тяжелым сердцем, когда работал вместе со своим другом Гроссманом». Так писал он в первой из серии четырех замечательных ноябрьских статей, доложенной на заседании Берлинской академии наук 4 ноября. Три остальные — одна за другой ровно с недельным интервалом. В первой статье был устранен основ-

ной дефект, присущий теории Эйнштейна — Гроссмана, — отсутствие общековариантных уравнений гравитационного поля. Теперь требование общей ковариантности, ограниченное, впрочем, условием унимодулярности преобразований¹⁸ (для упрощения вычислений), предъявляется к теории в целом, включая полевые уравнения. Это сразу же приводит к правильным уравнениям гравитации для пустого пространства

$$R_{ik} = 0, \quad (2)$$

¹⁸Условие унимодулярности означает, что определитель матрицы преобразования равен 1. Преобразования, соответствующие широкому классу ускоренных движений, удовлетворяют этому условию.

близким по форме уравнениям в общем случае

$$R_{ik} = -\kappa T_{ik}, \quad (3)$$

где R_{ik} — так называемый тензор Риччи (при выполнении условия унимодулярности), являющийся основным общековариантным тензором 2-го ранга, выражающим кривизну пространства — времени, T_{ik} — тензор энергии — импульса вещества и электромагнитного поля, κ — гравитационная постоянная. В следующей статье, доложенной 1 ноября, Эйнштейн показывает, что уравнения (3) являются внутренне непротиворечивыми лишь в том случае, если след тензора T_{ik} равен нулю, т. е. если вещество имеет электромагнитное происхождение. Кстати говоря, в этой статье впервые появляются полностью общековариантные уравнения гравитационного поля (не ограниченные условием унимодулярности):

$$G_{ik} = -\kappa T_{ik}, \quad (4)$$

где G_{ik} — тензор Риччи.

Статья, представленная Берлинской академии наук 18 ноября, посвящена целиком исследованию двух основных экспериментальных следствий уравнений (2): отклонению света и аномальному движению перигелия Меркурия. Поскольку в ней расчеты ведутся на основе уравнений (2), то они не зависят от «электромагнитной» гипотезы предыдущей статьи. Отклонение света вблизи Солнца оказывается равным $1,7''$, т. е. в два раза больше, чем в теории Эйнштейна — Гроссмана. Аномальная же прецессия перигелия Меркурия получает впервые полное объяснение.

Наконец, в последней ноябрьской статье, представленной 25 ноября, от уравнений (4), опираясь, в основном, на соображения, связанные с законом сохранения энергии, Эйнштейн переходит к общековариантным уравнениям, которые теперь носят его имя:

$$G_{im} = -\kappa \left(T_{im} - \frac{1}{2} g_{im} T \right). \quad (5)$$

Использование этих уравнений сделало лишней «электромагнитную» гипотезу. В результате проблема полевых уравнений получила свое разрешение, что и означало завершение перехода от теории Эйнштейна — Гроссмана к ОТО.

Какова роль «других» на этом завершающем этапе построения ОТО? Впервые, 20 ноября 1915 г., когда Эйнштейну, как будто, еще не были известны уравнения (5), Д. Гильберт выступил в Геттингенском математическом обществе с докладом «Основания физики», в котором

получил аналогичные уравнения гравитационного поля из общековариантного вариационного принципа¹⁹. Правда, эти уравнения были получены выдающимся геттингенским математиком в рамках своеобразной единой теории поля, в которой электродинамика оказывалась следствием гравитационных уравнений, а вещество — следствием уравнений, модифицированных в духе нелинейной электродинамики Ми. Во-вторых, в возврате Эйнштейна к требованию общей ковариантности полевых уравнений важное значение имел проведенный им анализ движения перигелия Меркурия на основе нековариантных уравнений теории Эйнштейна — Гроссмана.

Действительно, в письме к Зоммерфельду от 28 ноября Эйнштейн в числе трех основных соображений, убедивших его в «безосновательности» нековариантных уравнений поля, называет следующее: «Для движения перигелия Меркурия получается $18''$ за столетие вместо $45''$ ²⁰. В течение нескольких лет (с 1912 по 1915 г.) Эйнштейн, говоря об экспериментальном подтверждении тензорно-геометрической теории, имел в виду только два гравитационно-оптических эффекта и ничего не говорил об аномалии Меркурия, с которой было связано начало его исследований по гравитации. Но как раз весной 1915 г. Фрейндлих опубликовал статью об этой аномалии²¹, в которой, как подчеркивал Эйнштейн в своей ноябрьской работе о перигелии Меркурия, он убедительно показал невозможность удовлетворительного объяснения аномалии на основе ньютоновской теории (при допущении о скрытых массах в Солнечной системе). Несомненно, именно об этой работе Фрейндлиха писал Эйнштейн в письме к Зоммерфельду 15 июля 1915 г.: «Рад, что вы подумали о работе Фрейндлиха, она безусловно фундаментальна». Естественно, таким образом, предположить, что именно Фрей-

¹⁹ Гильберт Д. Основания физики. — В кн.: Вариационные принципы механики. М., 1959, с. 589—598.

²⁰ Два других соображения, которые называет здесь Эйнштейн, это — то, что «гравитационное поле в равномерно вращающейся системе не удовлетворяет уравнениям поля», именно нековариантным уравнениям теории Эйнштейна — Гроссмана, и что «приспособленные» преобразования не позволяли естественным образом получить лагранжиан гравитационного поля.

²¹ Freundlich E. Ueber die Erklärung der Anomalien im Planetensystem durch die Gravitationswirkung interplanetarer Massen. — «Astr. Nachr.», 1915, Bd. 201, S. 49—55.



А. Эйнштейн. 1916 г., Берлин.

длин, его работа, вновь стимулировали интерес Эйнштейна к аномалии Меркурия. Расчет движения перигелия Меркурия в теории Эйнштейна — Гроссмана привел лишь к $18''$, вместо $40''$, и был, таким образом, сильным аргументом против этой теории.

Вспомним теперь, что отказ от общековариантных уравнений поля в 1913 г. был связан, как мы отмечали, с тем, что эти уравнения не давали ньютоновского приближения и не согласовывались с принципом причинности. Оба эти вопроса получили определенное разрешение в ноябрьской статье о перигелии Меркурия. Таким образом, имеются основания предположить, что именно в процессе решения задачи о перигелии Меркурия Эйнштейн сумел понять ошибочность своих прежних аргументов против общековариантных уравнений поля.

Что же касается Гильберта, то известно — и об этом свидетельствует письмо Эйнштейна к Зоммерфельду от 15 июля 1915 г., — что Эйнштейн в июне — июле был в Геттингене, встречался и беседовал с ним. Характерно замечание, сделанное Эйнштейном по этому поводу: «В Геттингене у меня была большая радость — было понято все до последних деталей. Гильберт меня совершенно очаровал. Выдающийся человек!»²². Можно предположить поэтому, что беседы Эйнштейна с Гильбертом были взаимно стимулирующими. Не только Гильберт, уже давно интересовавшийся проблемами физики, и прежде всего проблемами оснований физики и построения единой теории поля в духе Ми, увлекся под влиянием Эйнштейна тензорно-геометрической концепцией гравитации, но и Эйнштейн, обсуждая с ним трудности, вставшие на пути к последовательной общековариантной теории тяготения, мог получить от Гильберта важные импульсы, касающиеся правильного понимания общей ковариантности и согласования общековариантных уравнений поля с принципами причинности и сохранения энергии — импульса.

Таким образом, на всех ступенях генезиса ОТО «другие» по-разному, но в целом весьма существенно повлияли на процесс построения этой теории. «Отдельный человек, — как заметил однажды А. Шопенгауэр, — слаб, как покинутый Робинзон; лишь в сообществе с другими он может сделать многое». И для Эйнштейна «сообщество других», разнообразные контакты с ним (влияние методологических установок, стимулирующие идеи, математическая помощь, дискуссии, взаимная

²² Перевод этого высказывания уточнен по оригиналу: Einstein A., Sommerfeld A. Briefwechsel. Basel, 1968, S. 30.

критика, острая полемика и т. д.) были весьма плодотворны. И все же немного в истории физики фундаментальных теорий, происхождение которых столь сильно связано с именем одного человека. Эйнштейн в процессе всего периода разработки ОТО был как бы центром конденсации идей, методов, истолкований, так или иначе связанных с этим процессом. Почему именно Эйнштейн? Конечно, он обладал невероятным упорством, редким сочетанием независимости и самостоятельности мышления с необыкновенной восприимчивостью, ему были присущи «неисчерпаемость идей, с одной стороны, и абсолютная точность и аскетизм (II) мышления, с другой» (по выражению Эренфеста)²³. Ему было присуще также характерное для выдающихся физиков, таких как Ньютон, Максвелл, Планк, чувство физической реальности; в сложной математически изощренной теории он раньше других мог увидеть выходы ее к эксперименту. Из многообразия экспериментальных фактов он способен был выделить такие, которые поддавались их превращению в теоретические утверждения. Именно это произошло с фактом равенства инертной и гравитационной масс, который был преобразован Эйнштейном в принцип эквивалентности, оказавшийся физической основой ОТО. Никто, как Эйнштейн, создавший СТО, не владел всем арсеналом релятивистской методологической техники и не был столь же последовательным при проведении релятивистской программы в области учения гравитации. Это, в конечном счете, и привело его к тензорно-геометрической концепции тяготения — концептуальному ядру ОТО. Замечательной чертой Эйнштейна была способность его к пересмотру своей позиции, научная самокритичность: достаточно вспомнить изменение его отношения к четырехмерной концепции Минковского, сыгравшее важнейшую роль в генезисе ОТО, и историю возврата к общековариантным уравнениям гравитационного поля — венцу ОТО. И все же одна черта творческого облика Эйнштейна была определяющей — жажда истины. Только она может объяснить тот накал страстей и драматизм, которыми окрашена история создания одного из наиболее прекрасных творений человеческого ума.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Эйнштейн А. СОБРАНИЕ НАУЧНЫХ ТРУДОВ, т. 1—4. М., 1965—1967.

Пуанкаре А. ИЗБРАННЫЕ ТРУДЫ, т. 3. М., 1974.

Планк М. ИЗБРАННЫЕ ТРУДЫ. М., 1975.

ИЗ ПЕРЕПИСКИ ЗОММЕРФЕЛЬДА С ЭЙНШТЕЙНОМ.— В кн.: Зоммерфельд. ПУТИ ПОЗНАНИЯ В ФИЗИКЕ. М., 1973.

ПЕРЕПИСКА А. ЭЙНШТЕЙНА И М. БЕССО, 1903—1955.— Эйнштейновский сборник, 1974. М., 1976.

Паули В. ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ. М., 1947.

Визгин В. П. РАЗВИТИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ ПРИНЦИПОВ ИНВАРИАНТНОСТИ С ЗАКОНАМИ СОХРАНЕНИЯ В КЛАССИЧЕСКОЙ ФИЗИКЕ. М., 1972.

Визгин В. П. ТЕОРИЯ ТЯГОТЕНИЯ НА РУБЕЖЕ XIX и XX вв.— Эйнштейновский сборник, 1977—1978. М., 1979.

Guth E. CONTRIBUTION TO THE HISTORY OF EINSTEIN'S GEOMETRY AS A BRANCH OF PHYSICS.— In: Relativity. Proceedings of the Relativity Conference in the Midwest, Cincinnati. N. Y.—L., 1970.

Mehra J. EINSTEIN, HILBERT AND THE THEORY OF GRAVITATION. Dordrecht—Boston, 1974.

Hoffmann B. EINSTEIN AND TENSORS.— «Tensor», 1972, v. 26, p. 157—162.

Lanczos C. THE EINSTEIN DECADE, 1905—1915. L., 1974.

²³Эренфест—Иоффе. Научная переписка (1907—1933). Л., 1973, с. 81.

Реликтовое излучение, бесконечность и горизонт

А. Д. Чернин,

кандидат физико-математических наук

Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе АН СССР
Ленинград

Подходя к построению космологии, основанной на только что созданной им общей теории относительности, Эйнштейн предполагал, что Вселенная в целом идеально регулярна и мир обладает наивысшей симметрией во времени и пространстве. Симметрия во времени — это одинаковость всех моментов в истории Вселенной, ее неизменность и вечность. Максимальная пространственная симметрия означает равноправность всех точек (однородность) и равноправность всех направлений (изотропия) в пространстве. Эти соображения не следовали с необходимостью ни из самой теории относительности, ни из каких-либо «первых принципов» или известных к тому времени фактов астрономии. Они представляли собой обобщение тех интуитивных представлений о глобальных свойствах мира, которые восходят к истокам науки нового времени: Земля не есть центр Вселенной, Солнце — это одна из многих звезд, рассеянных в пространстве; планеты и звезды возникли из прежде однородно распределенного по всему миру вещества (Ньютон); мир — это круг, центр которого везде, а окружность нигде (Паскаль); текущий момент в истории мира — это миг между бесконечным прошлым и бесконечным будущим и т. д.

Симметрия мира оказалась не столь полной, как полагал Эйнштейн, — Вселенная не симметрична во времени, она расширяется; это выяснили А. А. Фридман (теоретически, опираясь на теорию относительности Эйнштейна) и Э. Хаббл (наблюдательно, при исследовании движения галактик). Однако пространственная симметрия мира, действительно, максимальна, и сейчас, через шестьдесят лет после зарождения современной космологии, мы располагаем несомненным доказательством изотропии физического пространства — открыто реликтовое излуче-

ние и установлена его изотропия. Отклонения от изотропии излучения, т. е. от равномерности, с которой оно приходит к нам со всех сторон (исключая те отклонения, которые связаны с собственным движением Земли), поразительно малы — вернее, они вовсе не обнаруживаются — с точностью до ошибок наблюдений. Ошибки же не превышают десятых или сотых долей процента, и это служит, таким образом, верхним наблюдательным пределом возможной анизотропии излучения. Такую точность следует сравнить с прежними сведениями, полученными при наблюдении галактик. Так, закон разбегания галактик, закон Хаббла, тоже не зависит от направлений, но изотропия движения галактик, а с ней и изотропия физического пространства в этом случае устанавливается лишь с точностью до 20—30%.

Удивительно высокая изотропия реликтового излучения позволяет на новой, гораздо более надежной, чем прежде, эмпирической основе искать и находить решение старых проблем, таких как проблема конечности и бесконечности мира. Вместе с тем возникают новые вопросы, порождаемые самой изотропией. Это прежде всего проблема причинной связности Вселенной и вопрос о природе ее локальной структуры. Теоретической основой исследований в этой области сейчас, как и раньше, служит общая теория относительности Эйнштейна и вытекающая из нее космология Фридмана.

РЕЛИКТОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Вселенная пронизана радиоволнами миллиметрового диапазона, распространяющимися равномерно по всем направлениям. Это газ квантов электромагнитного излучения, равномерно заполняющего всю Вселенную; его температура около 3 К, но энергия, содержащаяся в нем, боль-

ше световой энергии, испущенной всеми звездами за время их жизни. На каждый кубический сантиметр Вселенной приходится ~ 400 квантов излучения, а полное число квантов в пределах видимой Вселенной в несколько миллиардов раз больше полного числа частиц вещества, т. е. атомов, ядер, электронов, из которых состоят планеты, звезды и галактики.

Это и есть фоновое излучение Вселенной, которое (вслед за И. С. Шкловским) называют реликтовым, и оно действительно представляет собой остаток, реликт сверхплотного и горячего (с температурой в миллиарды градусов и выше) состояния Вселенной в ее далеком прошлом, когда не было ни звезд, ни галактик и все вещество представляло собой дозвездную, догалактическую плазму, более или менее однородно перемешанную с газом квантов. Кванты электромагнитного излучения взаимодействовали с плазмой, рассеиваясь на электронах, и составляли вместе с ней единую среду, равномерно заполняющую всю Вселенную. Общее расширение Вселенной охлаждало со временем плазму и кванты; через миллион лет после начала расширения температура среды упала до значения в несколько тысяч градусов, при которой электроны и ядра, разделенные до того тепловым движением, смогли объединиться, рекомбинировать, образовав атомы. После эпохи рекомбинации кванты уже не взаимодействовали с плазмой и распространялись свободно вплоть до современной эпохи, испытывая лишь общее охлаждение, связанное с продолжающимся расширением Вселенной.

Картина горячего прошлого Вселенной разработана в конце 40-х годов Г. А. Гамовым на основе фридмановской теории космологического расширения; ему удалось предсказать и существование фона миллиметрового радиоизлучения, а удача в открытии его выпала в 1964 г. А. Пензиасу и Р. Вильсону¹.

КОСМОЛОГИЧЕСКОЕ РАСШИРЕНИЕ

Для большинства реликтовых квантов масса, соответствующая их энергии, гораздо меньше массы атома водорода — самого распространенного элемента звезд и галактик. Поэтому, несмотря на значи-

тельное преобладание по числу частиц, реликтовый фон уступает звездам и галактикам по вкладу в общую массу Вселенной.

Наша Галактика — лишь одна из многих звездных систем Вселенной. Галактики, подобные нашей или отличающиеся от нее формой и размерами, рассеяны по небу не вполне случайным образом. Многие из них собраны в группы и скопления, самые богатые из которых насчитывают тысячи членов. В свою очередь, группы и скопления часто образуют, как выясняется в последнее время², системы еще большего масштаба — сверхскопления, содержащие по несколько крупных групп или скоплений вместе с отдельными галактиками и облаками газа. Но на скоплениях и сверхскоплениях иерархия космических структур обрывается. На крупномасштабной карте мира космические системы выглядят лишь точками, которые распределены по пространству более или менее равномерно.

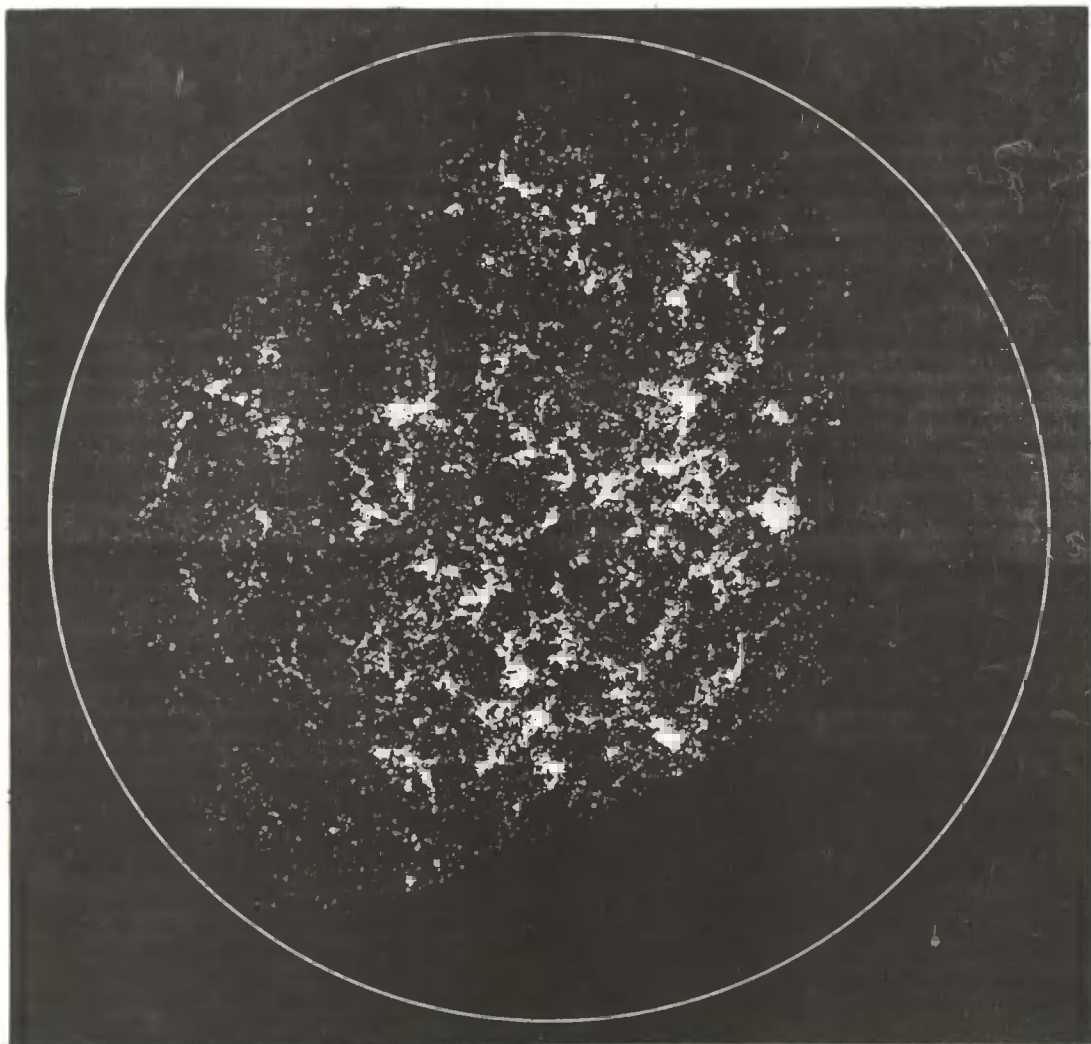
Космологическое расширение проявляется в возрастании со временем расстояний между галактиками и скоплениями, но это происходит так, что однородность их распределения не нарушается.

По числу галактик в больших объемах (размером в 300 млн св. лет и более), содержащих много скоплений и сверхскоплений, находят их среднюю концентрацию в пространстве, а зная массы галактик, можно оценить и среднюю плотность вещества в таких объемах. Эта плотность оказывается одинаковой, где бы ни выбрать такой объем; по современным данным, она составляет, в пересчете на атомы водорода, $\sim 0,1$ ат/м³.

Правда, астрономические оценки масс не очень надежны. Задача осложняется тем, что помимо светящегося вещества самих галактик в пространстве вокруг них существуют, по-видимому, значительные массы вещества, наблюдать которые непосредственно не удается: возможно, это звезды низкой светимости или газ, или даже «черные дыры». Скрытые массы проявляют себя только тяготением, которое сказывается на движении галактик в группах и скоплениях. По этим признакам оценивают связанную с ними среднюю плотность, которая может быть в 2—

¹Подробнее о нобелевских лауреатах 1978 г. по физике см.: «Природа», 1979, № 1, с. 101.

²Впервые вопрос о существовании сверхскоплений поставил Ж. де Вокулер («Астрономический журнал», 1959, т. 36, с. 974). Дальнейшие исследования проводились И. Д. Караченцевым («Астрофизика», 1966, т. 2, с. 307).



Крупномасштабное распределение галактик и скоплений [по Дж. Пиблсу, США].

3 или даже в 5—10 раз больше усредненной плотности галактик³.

Расширение происходит с большими скоростями, обязанными энергии первоначального «взрыва», происшедшего 15—18 млрд лет назад. Всемирное тяготение, взаимное притяжение космических систем стремится его затормозить и обратить

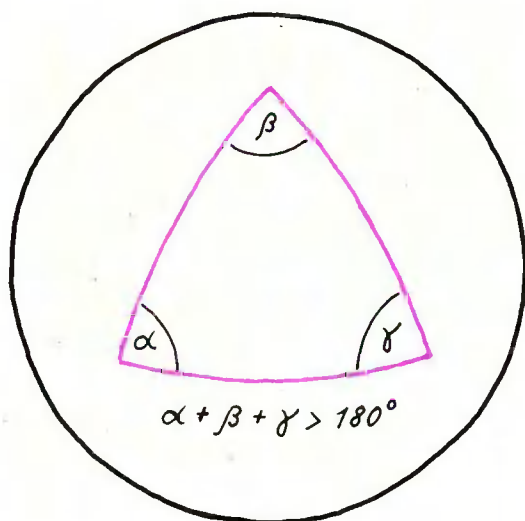
расширение в сжатие. Тяготение, очевидно, тем сильнее, чем больше массы систем и меньше расстояния между ними, и потому можно ожидать, что судьба расширения зависит от плотности Вселенной: чтобы возобладало тяготение, плотность должна быть достаточно большой, не меньше некоторого критического значения.

Эту критическую плотность можно найти, оценивая запас энергии разлета по наблюдаемым скоростям космических систем. Современные данные приводят к величине, равной $\sim 3 \text{ ат/м}^3$. Это больше не только усредненной плотности галактик, но превосходит, по-видимому, и ту плотность, которая получается при учете скрытых масс. Скорее всего, в современную эпоху тяготение не сильнее на-

³ Einasto J., Kaasik A., Saar E.—*«Nature»*, 1974, v. 252, p. 111; Ostriker J. P., Peebles P. J. E., Yahil A.—*«Astrophys. J.»*, 1974, v. 193, L. 1.

лаемых галактиками. Но на тех расстояниях, на которых они видны, отклонения от свойств привычного евклидова пространства были бы в любом случае неуловимы. Пространство могло бы проявить свою кривизну только на гораздо больших расстояниях. Но там реальные измерения невозможны — мало ярких источников света и т. п.

Возможно, однако, не наблюдательное, а теоретическое решение вопроса, исходящее из общих представлений релятивистской физики о связи между геомет-



Сфера — однородная искривленная поверхность конечной площади. Треугольник образован из дуг больших кругов на сфере.

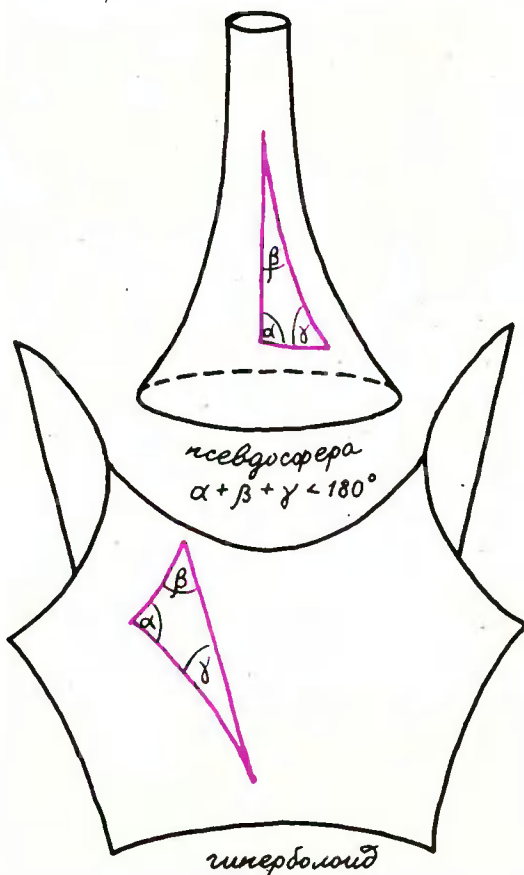
Псевдосфера и гиперболюид — однородные поверхности бесконечной площади.

рией пространства и тяготеющими массами. Из общей теории относительности следует, что существует связь между динамикой разлета и трехмерной геометрией; если взаимное разбегание космических тел — скоплений, сверхскоплений — действительно будет продолжаться неограниченно и расстояния между телами будут возрастать, стремясь с течением времени к бесконечности, то неограниченным, бесконечным должен быть и объем простран-

ства, в котором они движутся. Объем реального однородного пространства оказывается, таким образом, бесконечным, а по геометрическим свойствам оно должно быть подобно псевдосфере.

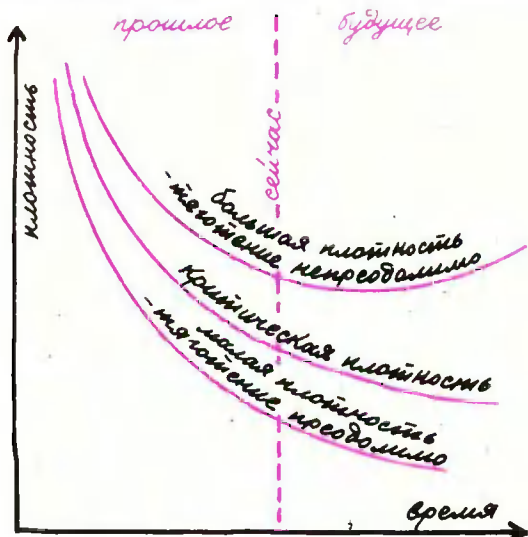
МОМЕНТАЛЬНАЯ ФОТОГРАФИЯ

Когда говорят об однородности распределения вещества, подразумевают, что видят сразу всю картину разбегающихся космических систем как бы одновременно. В самом деле, так как плотность



вещества во Вселенной убывает в ходе космологического расширения, то считать среднюю плотность мира всюду одинаковой можно только при том условии, что каждый участок Вселенной рассматривается на одном и том же этапе расширения — в этом и состоит в данном случае смысл одновременности. Иначе один участок выглядел бы более плотным (т. е. молодым), а другой — менее плотным (старым), если бы мы видели первый на более

чального «разгона», т. е. оно недостаточно, чтобы остановить и обратить расширение. Если в более ранние эпохи, когда плотность мира была больше, тяготение еще могло притормаживать расширение, то к современной эпохе его сопротивление уже преодолено, тяготение стало фактически несущественным, и космические тела разбегаются с почти неизменными во времени скоростями. Это движение (почти) по инерции, и оно никогда уже не прекратится — так современная космология отвечает на вопрос о будущем Вселенной.

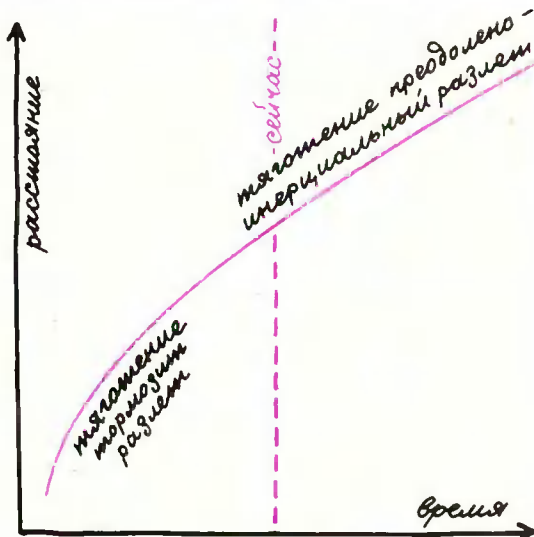


Расширение Вселенной: поведение плотности со временем.

ОДНОРОДНОЕ ПРОСТРАНСТВО

Свойства пространства и времени не абсолютны, не заданы раз навсегда, а зависят от распределения и движения тяготеющих масс — это центральная идея релятивистской физики, общей теории относительности Эйнштейна. В этом смысле нужно предполагать, что пространство, однородно заполненное материей, и само должно быть однородным, всюду одинаковым по своим геометрическим свойствам. Распространяя свойство однородности, установленное в наблюдениях близкого к нам объема Вселенной, на всю Вселенную, мир в целом, мы делаем, конечно, предположение (по-видимому, разумное), что наблюдаемый участок ничем специально не выделен во Вселенной и вся она всюду такая, какой нам представляется.

Физическое пространство однородно, но оно может быть искривлено тяготением материи, гравитацией. Трехмерное пространство способно быть кривым, неевклидовым, подобно тому как искривлены неевклидовы двумерные поверхности. Хотя наглядное представление искривленных трехмерных пространств затруднительно, переход к ним от двумерных кривых поверхностей можно вообразить на примере перехода от плоскости (евклидовой двумерной поверхности) к привычному трехмерному евклидову пространству, пе-



Изменение расстояний в расширяющемся мире.

реноса на трехмерные образы геометрические свойства двумерных прототипов. Так, можно ожидать, что трехмерный аналог сферы должен иметь конечный объем, подобно тому как сфера имеет конечную площадь; это конечное трехмерное пространство. Напротив, трехмерный аналог псевдосферы должен иметь бесконечный объем, как бесконечна полная площадь псевдосферы; это бесконечное, неограниченно продолжающееся по всем направлениям пространство. Промежуточная возможность — неискривленное, трехмерное евклидово пространство, у него тоже бесконечный объем (как бесконечна площадь неограниченной плоскости).

Каково же реальное пространство однородной Вселенной? Ответ могли бы дать непосредственные геометрические измерения с помощью лучей света, посы-

раннем, а второй — на более позднем этапе расширения. Можно сказать, что однородность плотности существует лишь на моментальной фотографии Вселенной, снятой в таких воображаемых лучах, которые распространяются мгновенно, с бесконечной скоростью, и именно на таком снимке мир в целом и предстает перед нами однородным и имеющим бесконечный объем.

СНИМОК В РЕАЛЬНЫХ ЛУЧАХ

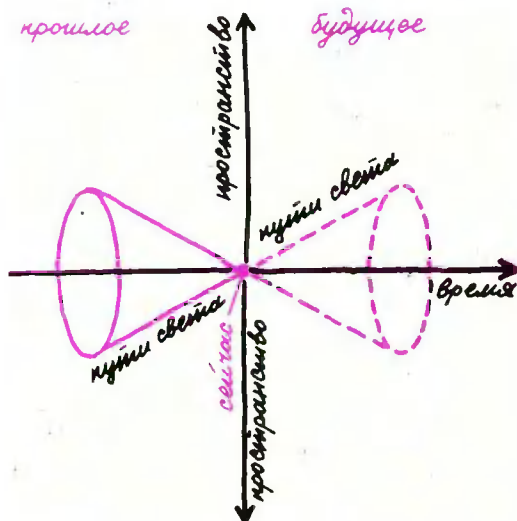
Конечно, в природе нет мгновенно распространяющихся волн или лучей; любые сигналы распространяются с конечными скоростями и самая большая из них — скорость света. Как выглядел бы мир, «снятый» в реальных световых лучах?

Астрономические наблюдения — оптические и радио-, в инфракрасных, ультрафиолетовых, рентгеновских и гамма-лучах — проводятся с помощью электромагнитных волн различной частоты. Они показывают картину неба с запаздыванием, так как волнам требуется определенное время, чтобы пройти расстояние, разделяющее нас и наблюдаемый объект. Солнце мы видим с задержкой в 8 мин; свет от звезд Галактики идет к нам десятки и сотни лет, а от далеких галактик и скоплений — миллионы и сотни миллионов лет. Чем дальше объект, тем в более раннюю эпоху мы видим его (см. рис., на котором показан световой конус). Наблюдая распределение и движение галактик, скоплений, сверхскоплений, мы получаем представление о тех их свойствах, которыми они обладали в очень отдаленном, по нашим обычным понятиям, прошлом. Но по масштабам Вселенной разница в сотни миллионов лет не очень велика (возраст Вселенной приближается к 15—18 млрд лет). Ее расширение происходит в таком темпе, что плотность вещества заметно меняется лишь за миллиарды лет. Поэтому плотность в близкой к нам области Вселенной, где видны галактики, и представляется нам одинаковой, однородной.

Если бы, однако, можно было заглянуть на большие расстояния, т. е. в более далекое прошлое, мы, очевидно, обнаружили бы, что там (т. е. тогда) плотность больше, чем вблизи (т. е. сейчас). Снимок, сделанный в реальных лучах, показал бы, таким образом, Вселенную неоднородную по плотности: чем дальше от нас, тем плотнее. На таком снимке и само физическое пространство — в соответствии с общими принципами эйнштейновской

теории — должно быть неоднородным по своим геометрическим свойствам. Более того, на снимке в реальных лучах пространство конечно по объему.

Дело в том, что свет, приходящий к нам от далеких источников, испытывает за время своего распространения красное смещение: длины волн электромагнитных колебаний возрастают. Это известный эффект Доплера, объясненный в данном случае космологическому расширению, относительно движению галактик. По закону Хаббла, чем дальше от нас источник, тем



Световой конус.

больше скорость его удаления от нас и, следовательно, больше красное смещение в его свете. При этом существует такое большое, но вполне определенное, конечное расстояние, для которого красное смещение становится бесконечным, так что частота принимаемого света обращается в нуль и из-за этого источник становится для нас невидимым. Таким образом, можно говорить о существовании во Вселенной горизонта, в пределах которого только и возможны наблюдения. Объем пространства, доступный наблюдениям, оказывается по этой причине конечным; конечна и содержащаяся в нем масса вещества. Расстояние до горизонта — 15—18 млрд св. лет, т. е. путь, который свет успевает пройти от начала космологического расширения до современной эпохи.

Вывод о существовании горизонта никак не зависит от того, есть ли в действи-

тельности астрономические объекты, которые столь ярки, что могут посылать нам свет со сколь угодно больших расстояний⁴. Он имеет характер принципиального ограничения, вытекающего из того обстоятельства, что волны проходят за конечное время конечное расстояние.

ДВА СНИМКА — ДВА ФИЗИЧЕСКИХ ПРОСТРАНСТВА

Итак, имеется два «снимка» мира; какой из них правильный, какой можно считать реальным? Казалось бы, второй предпочтительней; он соответствует действительной процедуре наблюдений. Но и первый (моментальный), хотя и не может быть получен непосредственно в наблюдениях, тоже показывает реальную Вселенную. Снимки сильно отличаются друг от друга и прежде всего тем, что в одном случае объем пространства конечен, а в другом — бесконечен.

Различия касаются глобальных свойств мира в целом. Но если не уходить далеко, а ограничиться какой-то не очень большой областью Вселенной, оба снимка, очевидно, покажут приблизительно одно и то же. Различие, связанное с запаздыванием лучей, тем меньше, чем меньше область наблюдений: оно оценивается отношением размера области к расстоянию до горизонта. В действительности оба снимка, правильные и друг другу не противоречат; но их различие показывает, что когда речь идет о больших объемах пространства и больших промежутках времени, само пространство по-разному проявляет себя в разных наблюдениях.

Согласно фундаментальным принципам общей теории относительности Эйнштейна, пространство не абсолютно, его свойства не заданы раз навсегда, а зависят, как упоминалось, от тяготеющих масс. Трехмерное физическое пространство не абсолютно еще и в другом смысле: оно по-разному может быть выделено из общего четырехмерного пространства — времени.

Вот что писал Эйнштейн: «Когда математик слышит о «четырехмерном», его охватывает мистическое чувство, подобное чувству, возбуждаемому театральными привидениями. Тем не менее нет более банального утверждения, чем то, что окружающий нас мир представляет собой четырехмерный пространственно-

временной континуум. ...Физическое пространство, постигаемое через объекты и их движения, имеет три измерения, и положения объектов характеризуются тремя числами. Момент события есть четвертое число. Каждому событию соответствуют четыре определенных числа. Поэтому мир событий образует четырехмерный континуум. В этом нет ничего мистического, и последнее предложение одинаково справедливо и для классической физики, и для теории относительности»⁵.

Но, в отличие от классической теории, релятивистская физика рассматривает пространство и время в единстве, как одно целое. По знаменитому высказыванию Г. Минковского, одного из создателей математического аппарата теории относительности, «отныне пространство и время, взятые по отдельности, обречены влечь лишь призрачное существование, и только единство их обоих сохранит реальность и самостоятельность»⁶. В разных типах наблюдений пространство проявляет себя по-разному; время также различно в разных наблюдениях. Но четырехмерное пространство — время одинаково при всех способах наблюдений. Можно, например, любое объемное тело выбрать в качестве некоего единого трехмерного пространства. Из него можно затем выделить двумерное пространство, произведя сечение тела. Результат выделения подпространства с числом измерений, на единицу меньшим, зависит от принятого способа сечения. В сечении можно получить фигуры разной формы, разной площади. Пример сечения бесконечного цилиндра плоскостью показывает, что площадь разных сечений одного и того же тела может быть и конечной, и бесконечной. Какое из двух сечений цилиндра — конечное или бесконечное — правильно передает свойства двумерного подпространства этого тела? Вопрос лишен смысла. Двумерное подпространство не абсолютно, его можно выделить разными способами.

Нет ничего удивительного и в том, что трехмерное физическое пространство, подпространство четырехмерного пространства — времени, предстает перед нами различным в разных снимках мира. Эти снимки дают разные «сечения» четырехмерного мира: снимок в реальных лучах

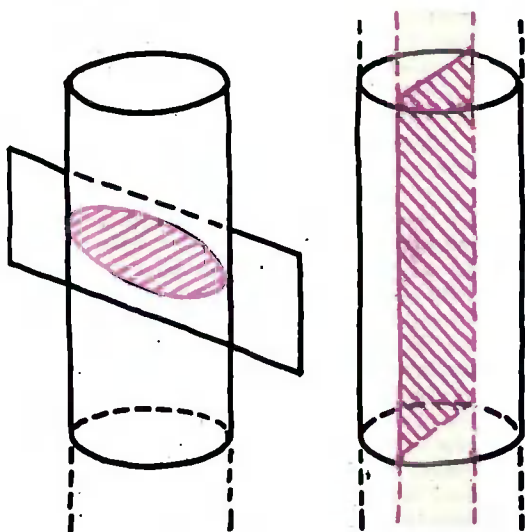
⁴ Несущественно и соотношение средней плотности вещества и критической плотности.

⁵ Эйнштейн А. Физика и реальность. М., 1965, с. 194, 294.

⁶ См., например: Тейлор Э., Уилер Дж. Физика пространства — времени. М., 1971.

нужно понимать геометрически, как сечение световым конусом; моментальный же снимок — как сечение плоскостью (или по принятой терминологии, гиперплоскостью) постоянного времени.

В утверждениях «мир конечен» или «мир бесконечен» всегда речь идет об объеме трехмерного пространства, но такие утверждения приобретают смысл лишь тогда, когда сказано еще, каким именно образом пространство выделено из единого целого, из четырехмерного пространства, которое оно составляет вместе со временем.



Сечение цилиндра плоскостью — геометрический пример того, что площадь разных сечений одного и того же тела может быть конечной [слева] и бесконечной [справа].

ГОРИЗОНТ И ПРИЧИННОСТЬ

Горизонт как предел видимости — это, очевидно, и предел любого обмена сигналами, а значит, и предел причинной связи. Два события могут быть между собой причинно связаны (так, например, чтобы одно было следствием другого), только если оба они происходят в пределах горизонта.

Радиус горизонта возрастает вместе с расширением Вселенной, как путь, пройденный светом за время от начала расширения, и в каждую последующую эпоху в его пределах оказывается больше вещества, чем в предыдущую. Те участки мира, которые сейчас находятся в пределах

современного горизонта и заняты видимыми галактиками, были когда-то раньше разделены горизонтом. Горизонт, как непроницаемая стена, изолировал их, они ничего «не знали» тогда друг о друге. Но сейчас, когда они вошли в контакт, обнаружилось, что у них одинаковая плотность. Почему? Как распределение и движение вещества оказались согласованными в этих различных и далеко отстоящих друг от друга участках мира?

Исключительно высокая степень изотропии реликтового фона ставит этот вопрос гораздо конкретнее и еще более радикально. Интенсивные наблюдения в этой области ведутся в последние годы радиоастрономами США, Англии и Австралии. О рекордной точности, с которой установлена изотропия (до сотых и тысячных долей процента) сообщают радиоастрономы группы Ю. Н. Парийского, изучающие угловое распределение реликтового излучения с помощью радиотелескопа РАТАН-600⁷.

При современных условиях волны реликтового излучения не взаимодействуют между собой, и если что-то и могло выравнивать их распределение, так это взаимодействие с веществом. Но реликтовое излучение уже давно «оторвалось» от вещества, перестало взаимодействовать с ним. Взаимодействие прекратилось при возрасте мира в миллион лет, в эпоху рекомбинации. Даже в случае (по-видимому, маловероятном) вторичной ионизации вещества последняя возможность взаимодействия через вещество была, самое большое, при возрасте мира примерно в миллиард лет. Но и тогда горизонт был много уже современного и, как подсчитано, причинно коррелированные в ту эпоху участки неба могут быть разнесены для современного наблюдателя не больше, чем на угол в 30° . Откуда же корреляция на всех углах, вплоть до 180° ?

Ответ на эти вопросы не найден. Проблема причинной связности Вселенной, осознанная во всей своей остроте лишь в последние несколько лет, остается открытой. Энергичные попытки найти ее решение «простыми средствами» (например, в рамках простых обобщений теории Фридмана) не дают результата. Но уже и ясная постановка проблемы — шаг к более глубокому ее пониманию.

⁷ Парийский Ю. Н., Петров З. Е., Черно́в Л. Н. «Письма в АЖ», 1977, т. 3, с. 483.

ДОГАЛАКТИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА

Ньютоновская космогоническая традиция связывает формирование небесных тел с распадом, фрагментацией однородной разреженной дозвездной среды. «Если вещество было равномерно распределено по бесконечному пространству, ... а каждая частица испытывала врожденное тяготение ко всем остальным..., то какая-то часть вещества сгущалась бы в одну массу, а другая — в другую, так что возникло бы бесконечное число больших масс, разбросанных по всему бесконечному пространству на большие расстояния друг от друга. И так могли бы образоваться Солнце и неподвижные звезды...»⁸. Это отрывок из письма Ньютона (1692 г.), в котором содержится набросок программы, реализация которой теперь, кажется, стала возможной.

Изотропия и однородность мира — это глобальные его свойства, проявляющиеся в больших объемах пространства, которые содержат много галактик, скоплений или даже сверхскоплений. Сами же эти космические системы представляют собой — с точки зрения распределения вещества в мире — сильные неоднородности, а их собственные движения нарушают в соответствующих масштабах изотропию космологического расширения. Отношение их плотности к средней плотности Вселенной (или, как говорят, контраст плотности) достигает тысяч и миллиардов. Но как эти образования выглядели в прошлом, скажем, в эпоху рекомбинации?

Ясно, что галактики и скопления не могли существовать тогда в их современном виде, хотя бы потому, что средняя плотность мира была в эпоху рекомбинации в тысячу раз выше собственной плотности галактик (последняя составляет ~ 1 ат/см³). Ясно также, что они не могли возникнуть внезапно и из ничего; какие-то локальные сгущения, отклонения от однородности и изотропии, охватывающие массы вещества, сравнимые с массами галактик, скоплений, сверхскоплений, должны были существовать и раньше, хотя, очевидно, соответствующий им контраст плотности был много меньше современного.

Судить об этом можно по реликтовому излучению, которое оторвалось от вещества в эпоху рекомбинации и несет

с собой картину «стенки последнего рассеяния», как говорят радиоастрономы. Изотропия излучения непосредственно указывает на высокую степень однородности и изотропии мира в эпоху рекомбинации. Можно полагать, что дозвездная, догалактическая среда после рекомбинации и есть то исходное однородное состояние, с которого начинается предпологавшийся Ньютоном космогонический процесс.

Открытие расширения Вселенной, обнаружение реликтового излучения наполнили ньютоновскую космогоническую концепцию новым физическим содержанием. Прояснился не только характер исходного состояния вещества, но и конкретные условия, при которых происходит фрагментация и обособление сгущений. Оказалось, что в дорекомбинационную эпоху, на первом миллионе лет от начала расширения присутствие излучения усиливает теплопроводность и вязкость среды и сглаживает из-за этого все сгущения и разряжения в смеси плазмы и излучения (их называют адиабатическими возмущениями) в масштабах от самых малых до довольно больших, соответствующих по массе скоплениям галактик⁹. По той же причине (и приблизительно вплоть до тех же масштабов) гасятся и слабые вихревые движения — это возмущения, которые не затрагивают однородности среды, а нарушают изотропию ее расширения в соответствующих масштабах¹⁰.

Наконец, в 1977 г. впервые появилась возможность выснить саму природу малых возмущений, служащих затравками для гравитационной неустойчивости. Это тоже связано с радионаблюдениями углового распределения реликтового фона на PATAHe-600.

Чтобы «увидеть» протогалактические сгущения, какими они были в начале ньютоновского процесса, нужно исследовать угловое распределение по небу интенсивности реликтового излучения, и тогда обнаружатся те следы, которые оставили в нем неравномерности в распределении и движении вещества. Какие-то нерегулярности, флуктуации фона обязательно

⁹ Silk J. «Astrophys. J.», 1968, v. 151, p. 459; Чибисов Г. В. «Астрономический журнал», 1972, т. 49, № 74, с. 286.

¹⁰ Озерной Л. М., Чернин А. Д. «Астрономический журнал», 1967, т. 44, с. 1131; 1968, т. 45, с. 1137.

⁸ Цит. по книге: Джинс Дж. Астрономия и космогония. Кембридж, 1929.

должны были возникать, так как последнее рассеяние реликтовых квантов происходило в среде, которая не была идеально однородной в масштабах галактик и скоплений.

Поиски «отпечатков» протогалактик и протоскоплений в реликтовом фоне пока не дали результатов; как говорилось, реликтовое излучение предстает перед нами полностью бесструктурным — и не только в глобальных угловых масштабах (30° — 180°), а и в масштабах отдельных галактик и скоплений ($3'$ — $30'$). Нужно сказать, что ранее теоретики, исходя из представлений об адиабатических и вихревых возмущениях, предсказывали для масштаба нескольких минут флуктуации такой величины, что они были бы замечены сейчас на РАТАНе. Отрицательный результат наблюдений не означает полного отсутствия флуктуаций в реликтовом излучении, а устанавливает, как уже говорилось, верхний предел их величины. Чем точнее наблюдения, чем выше чувствительность, тем жестче, а следовательно, информативнее такой предел.

Наблюдения на РАТАНе не зачеркивают теории, скорее они дают новый импульс ее развитию. Согласно одному из первых результатов, полученному на этом пути, новому эмпирическому пределу удовлетворяет космогоническая теория, исходящая из представления об энтропийных возмущениях как элементах первичной структуры Вселенной¹¹. В отличие от адиабатических и вихревых нерегулярностей, возмущения этого третьего типа¹² охватывают не обе компоненты среды в ранней Вселенной — плазму и излучение, а только плазму. Распределение излучения остается однородным, и на этом фоне существуют неоднородности вещества разного масштаба. Такие возмущения введены в космологию Я. Б. Зельдовичем вскоре после открытия реликтового излучения; ранее их рассматривали Л. Э. Гуревич и А. И. Лебединский в других условиях — в звездах с большим лучистым давлением.

То обстоятельство, что энтропийные возмущения не затрагивают в ранние эпохи фон излучения, и предопределяет относительную слабость и незаметность сле-

дов, которые они могли бы оставить в наблюдаемом реликтовом излучении¹³.

Существенно также, что сгущения плазмы на невозмущенном фоне излучения практически не замываются в ранние эпохи и способны «выжить» во всех интересных с космогонической точки зрения масштабах — от масштаба отдельной звезды до масштаба сверхскопления. После рекомбинации сгущения вещества такого происхождения отделяются от фона излучения, усиливаются и, как следует полагать, придерживаясь ньютоновской схемы, дают в определенную эпоху начало наблюдаемым космическим телам¹⁴.

Развитие теории и наблюдений на путях, открытых Эйнштейном, привели к ответу на вопрос, издавна занимавший воображение людей, — бесконечен ли мир? Ответ не сводится просто к «да» или «нет». Глубоко нетривиальным окажется, должно быть, и решение проблемы причинности. Много неожиданного предстоит, вероятно, узнать и о происхождении локальной структуры Вселенной. Скорее всего, глобальные и локальные свойства мира связаны между собой и определялись физическими процессами в первоначальном «взрыве», породившем космологическое расширение. Но природа этого явления составляет самую трудную проблему физики и астрономии. Откуда черпалась энергия «взрыва», сообщившая материи огромные скорости разлета? Что было до него? И что значит здесь «до»?

¹³Общая теория, связывающая возмущения в среде с флуктуациями реликтового фона, разработана Я. Б. Зельдовичем и Р. А. Сюняевым («Astrophys. Space Sci.», 1970, v. 6, p. 358).

¹⁴Об образовании галактик, см.: Чернин А. Д. Гидродинамика Вселенной. — «Природа», 1976, № 6.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

- Эйнштейн А. ФИЗИКА И РЕАЛЬНОСТЬ. М., 1965.
 Гинзбург В. Л. СОВРЕМЕННАЯ АСТРОФИЗИКА. М., 1970.
 Гуревич Л. Э., Чернин А. Д. ОБЩАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ В ФИЗИЧЕСКОЙ КАРТИНЕ МИРА. М., 1970.
 Воронцов-Вельяминов Б. А. ВНЕГАЛАКТИЧЕСКАЯ АСТРОНОМИЯ. М., 1972.
 Зельдович Я. Б., Новиков И. Д. СТРОЕНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ ВСЕЛЕННОЙ. М., 1975.
 Гуревич Л. Э., Чернин А. Д. ВВЕДЕНИЕ В КОСМОЛОГИЮ. М., 1978.

¹¹Зенцова А. С., Чернин А. Д. «Письма в АЖ», 1977, т. 3, с. 488.

¹²Тремя названными здесь видами и исчерпывается полный набор малых возмущений в среде.

А. Эйнштейн и берлинские физики в конце 20-х годов

Редакции журналов «Виссеншафт унд фортшритт» («Наука и прогресс», орган Академии наук ГДР) и «Природа» обратились к известному немецкому физiku действительному члену Академии наук ГДР Роберту Ромпе, который встречался с Эйнштейном в конце 20-х годов в Берлине, с просьбой написать об этом статью, приуроченную к 100-летию А. Эйнштейна. Р. Ромпе любезно выполнил нашу просьбу. Его воспоминания публикуются одновременно в обоих журналах.

Р. Ромпе,
действительный член Академии наук ГДР

В 1927—1930 гг. я работал в Физическом институте у Петера Прингсгейма, готовил докторскую диссертацию. Будучи ассистентом Прингсгейма, я отвечал за физический практикум для студентов старших курсов и занимался обеспечением демонстраций на его экспериментальных лекциях «О квантовой физике и люминесцентных процессах». Но прежде всего я постоянно принимал участие в руководимом Максом фон Лауэ семинаре и посещал заседания Физического общества, проходившие в большом конференц-зале нашего института, на которых обычно присутствовал Эйнштейн. Таким образом, мне приходилось встречаться с ним довольно часто.

Конечно, спустя 50 лет не так-то просто отделить мои тогдашние впечатления от знаний об Эйнштейне, накопившихся за прошедшие годы. Я надеюсь, тем не менее, что мне удастся достаточно ясно изложить впечатления того времени, а также небольшие по возможности комментарии, имеющие более позднее происхождение.

Альберт Эйнштейн был впечатляющей, привлекательной личностью. Он, видимо, не любил говорить много и долго, особенно в дискуссиях на семинаре. Его слова никогда не были рассчитаны на то, чтобы произвести впечатление, они были просты, свободны от профессионального жаргона и тем самым доступны также и его молодым коллегам. Его манера гово-

рить свидетельствовала о полном владении выразительными средствами языка. Часто в замечаниях Эйнштейна проявлялась его необычайная интуиция.

Наши учителя, прежде всего Петер Прингсгейм и Макс фон Лауэ, так сказать, с первого дня нашего пребывания в институте внушили нам, что нам неслыханно повезло, потому что мы видим, слышим и даже можем обменяться парой слов с одним из величайших физиков мира, которого можно сравнить только с самыми великими, такими как Архимед, как Ньютон. При этом ни Прингсгейм, ни фон Лауэ не любили громких слов. Оба они скорее были склонны к преуменьшению. Что касается величия достижений Эйнштейна, то большинство из нас — а отчасти также и наши учителя — вряд ли понимали в полной мере всю революционную новизну теории относительности. Изложение ее самим Эйнштейном, хотя оно в значительной мере и избегало формул, также считалось малопонятным. Многие из моих однокурсников, да и я сам тоже, получили представление об огромном значении открытия Эйнштейна лишь на проводившемся во время каникул семинаре, посвященном книге Г. Вейля «Пространство — время — материя», который вел кандидат математики Фенчел, а также по книгам Эддингтона. В математических формулировках достижения Эйнштейна

становились для нас, молодых людей, более доступными (в смысле известного высказывания Густава Герца о том, что математика делает физику более легкой для усвоения).

Гораздо более доступными для понимания были открытия Эйнштейна в области квантов и флуктуационных явлений, открытия, послужившие базой большинства исследований, проводившихся в Физическом институте университета. Это прежде всего работы Петера Прингсгейма по люминесценции, работы по теории флуктуаций и по броуновскому движению М. Черни и др.

Известное место в представлении Эйнштейна на выборах в Академию в 1913 г., подписанного М. Планком, В. Нернстом, Э. Варбургом, Г. Рубенсом (т. е. всеми физиками) — полностью предвосхищало положение, сложившееся в Физическом институте в 20-е годы:

«Какой бы фундаментальной ни была эта мысль Эйнштейна (речь идет об электродинамике движущихся тел. — Р. Р.) для развития основ физики, ее применения пока находятся на самом пределе возможностей эксперимента. Гораздо более существенным для практической физики оказалось его вмешательство в другие проблемы, стоящие сейчас на первом плане. Прежде всего, он был первым, кто доказал значение квантовой гипотезы также и для энергии, атомарных и молекулярных движений, выведя из этой гипотезы формулу теплоемкости твердых тел, которая, правда, не подтвердилась потом на опыте полностью, но все же заложила основу для дальнейшего развития современной кинетической теории атомов. Он установил связь квантовой гипотезы также и с фотоэффектом и фотохимическим эффектом, открыв интересные, проверяемые на опыте закономерности, и одним из первых указал на тесную связь между упругими постоянными и оптическими собственными частотами кристаллов».

Хотя, как было сказано, мы не могли тогда полностью понять значение того достижения Эйнштейна, которое как научная общественность, так и широкая публика считали основным, никто не сомневался в его исключительном величии. В то же время это величие сочеталось с неприязнательностью и простотой поведения, помогавшими молодым людям без стеснения встречаться, а при случае и заговаривать с ним, чем они, к сожалению, иногда злоупотребляли.

В семинаре Макса фон Лауэ Эйнштейн играл выдающуюся роль. Не то чтобы он длинно и подробно комментировал высказывания докладчика — как это было принято, например, в некоторых институтах Общества кайзера Вильгельма в Далеми, — но у него почти к каждому докладу находились краткие вопросы, целью которых было не поправлять или поучать докладчика, — в них просто проявлялся интерес Эйнштейна к предмету доклада. Уже одно присутствие Эйнштейна на семинаре поднимало его уровень. Если он участвовал, было интересно. Я помню, как был огорчен фон Лауэ, когда позже Эйнштейн перестал приходить. Семинар словно поблек.

У Эйнштейна многому можно было научиться: прежде всего, значению единства физики. Попросту говоря: физика — это то, что должны понимать все физики. Он сам говорил, что интересуется закономерностями, имеющими универсальное значение (тем самым он ни в коем случае не хотел сказать, что лишь законы физики могут иметь универсальное значение).

Он демонстрировал, что научный спор предполагает участие в нем любого физика: каждый может свободно задать вопрос, в том числе и тот, что не занят в данной сфере деятельности. Тем самым он намеренно противоречил усиливавшемуся с начала века стремлению специалистов высказываться только по самой узкой области проблем, которыми они в данный момент занимаются (и при этом, разумеется, во все более тесном кругу). Он обладал гражданским мужеством ученого задавать вопросы, не беспокоясь о том, окажется ли он прав, или иногда сделать предложение или инициировать опыт, которые оказывались невыполнимыми, — и признать это при обсуждении.

На семинаре Эйнштейн демонстрировал коллегам, зачем существует физика, в том числе и ее технические применения. Он показывал, как физик может распознать физическую основу идеи за сложностью деталей, необходимых для ее технической реализации, и какое значение это может иметь для физики.

На семинаре Макса фон Лауэ, как правило, не было принято рассказывать о собственной работе. Темы выбирались фон Лауэ в узком кругу, в который постоянно входили Эйнштейн, Планк, Прингсгейм и Герц, а также более молодые коллеги — Черни, Хеттнер, Боте, Ладенбург и др.

Некоторые темы выбирались по специальному пожеланию Эйнштейна. Курьезом было пожелание Эйнштейна ежегодно заслушивать доклад Вайссенберга из Лейпцига о сложной многомерной механике процессов прядения волокнистых веществ, который занимал целый семинар, хотя обычно за два часа обсуждались две темы и делались еще и краткие сообщения.

Оригинальные работы и сообщения обычно докладывались и обсуждались в Физическом обществе. Так, здесь были прочитаны доклады Э. Фрейндлиха о результатах экспедиции для наблюдения солнечного затмения и их обработке. Именно здесь состоялись знаменитые дискуссии между Эйнштейном и Н. Бором, которые по праву считаются одной из вех в истории физики. Мне не хотелось бы распространяться о содержании этой дискуссии, потому что Бор великолепно изложил его в своей статье в книге Шильпа «Эйнштейн — исследователь и философ». Эти дискуссии дают нам пример того, как можно четко и последовательно защищать свою позицию, не становясь при этом упрямым и недружелюбным. В. Нернст, например, этого не умел. Когда Эйнштейн во время его выступлений задавал вопросы или даже подавал реплики, Нернст сразу же набрасывался на него: «Кроме Вас все это поняли, господин Эйнштейн! Прочтите об этом в большом Кольрауше, на странице 17!»

Уважение физиков к Эйнштейну было подлинным и большим, потому что он, великий физик, был свободен от страсти к поучениям и претензий на непогрешимость. Зато он полностью сознавал ответственность ученого, был политически активен и хорошо понимал значение таких исторических переворотов, как падение Германского кайзеровского рейха в 1918 г., как, прежде всего, Октябрьская революция 1917 г. и основание Советского государства.

Он был гражданином иной, новой Германии. Гельмгольц, Планк, Нернст тоже были великими физиками, но одновременно и важными прусско-германскими тайными советниками, а Нернст — тайным советником и крупным дельцом.

Планк на общем семинаре едва ли задал хоть один вопрос, но мы знали от его ассистентов, что в Академии, в кругу равных, он часто брал слово.

Нельзя не упомянуть, что Эйнштейн был в Пруссии (он сам писал позже, что *horrible dictu* тоже когда-то был прусса-

ком) в какой-то степени *enfant terrible* — в том смысле, в каком им был бы Л. Больцман, если бы он принял приглашение в Берлин, и каким позднее действительно стал в Берлине Э. Шредингер. Старшие ученые, выходцы из высокопоставленных кругов, Планк, Прингсгейм, Лауэ многое в нем не принимали, например, рекламу теории относительности в прессе и интервью о научных достижениях, которые Эйнштейн давал журналистам. Это, однако, ни в коем случае не умаляло их восхищения его научным гением.

Эйнштейн очень интересовался техникой, это обнаруживалось не только на семинаре, но также и во время посещения института и — как говорят — в Государственном физико-техническом институте. Однако он никогда не разыгрывал роль техника-эксперта, хотя по работе в Берне детально знал многое из области техники.

Даже электророялем Нернста, этим предшественником электроакустической аппаратуры, которой пользуется сегодняшняя молодежь, он очень интересовался и просил фон Лауэ дать возможность Нернсту рассказать об этом рояле на семинаре (к величайшему возмущению моего уважаемого учителя Прингсгейма, крайне неодобрительно относившегося к этим работам Нернста). Известно, что Эйнштейн многократно открывал радиовыставки, выступая с содержательными речами, в которых он ясно высказывался за использование основных достижений физики для удовлетворения потребностей человека. Его прежде всего привлекала возможность распространять образование среди населения с помощью электронных средств массовой коммуникации, так как он видел в этом существенный элемент развития и прогресса человечества.

Эйнштейн имел право на чтение лекций в университете, но в наше время почти им не пользовался. Много раз он начинал читать одночасовые лекции по теории относительности для 5—8 слушателей, из которых 1—2 были его ассистентами. Разумеется его манера читать и то, как он расставлял акценты, производили большое впечатление. Однако для нас, молодых, это, видимо, было слишком трудно. Чаше всего он прерывал лекцию на том месте, где материал потребовал бы длинных выкладок и расчетов на доске, и отсылал нас к литературе, прежде всего, к превосходной книге Макса фон Лауэ. У него не было также учеников в

обычном смысле этого слова, таких, какие время от времени все же бывали у Планка и Макса фон Лауэ.

Он работал с очень узким кругом сотрудников и докладывал Академии новые результаты, о чем затем при возможности нам сообщали его ассистенты (Ф. Лондон, Л. Сцилард, К. Ланчош).

Но тем не менее влияние Эйнштейна на развитие физики в Берлине было чрезвычайно большим.

В качестве примера я хотел бы привести область исследований моего учителя Прингсгейма, который благодаря своим многочисленным работам и прежде всего своим книгам о люминесценции стал в то время, наверное, первым авторитетом в этой области, что вызывало посещения ученых со всех концов света (в том числе С. И. Вавилова, ставшего позднее президентом Академии наук СССР). Лаборатория Прингсгейма была в те годы, без сомнения, центром люминесцентной физики. Хотя, как говорилось, Прингсгейм не любил красивых слов, он так же, как Нернст и Варбург, был глубоким почитателем Эйнштейна и его гения, прежде всего в связи с его работами по квантовой физике. Действительно, знаменитая работа Эйнштейна 1905 г. «Об одной зрелищной точке зрения, касающейся возникновения и превращения света» («Ann. Phys.», 1905, В. 17, S. 132), в которой впервые появляются световые кванты и устанавливается универсальное значение открытой Планком константы h , а также последующие работы Эйнштейна на эту тему, содержат программу изучения весьма непонятных до той поры явлений люминесценции, начиная с открытой Р. Вудом резонансной флуоресценции и кончая сложным поведением многоатомных молекул.

Прежде всего, в этих трудах выдающимся образом использован испытанный метод Галилея и Ньютона для освоения неизведанного: отбрасывая несущественное, пробиваться к сущности явлений. Искусство заключается в том, чтобы знать, что должно быть отброшено. Так, Прингсгейм прилагал все усилия, чтобы нащупать фундаментальную основу процессов люминесценции путем выбора простых веществ (одно- и двухатомных газов) и простых реакций, обусловленных двухчастичными соударениями между ними.

Можно с некоторым правом рассматривать Прингсгейма как духовного ученика Эйнштейна, который развил основополагающие выводы открытий Эйн-

штейна 1905—1917 гг. так же, как, например, школа В. Нернста и Х. Симона сделала это в области явлений при низких температурах. Это связывало школу Прингсгейма с классическими работами Эйнштейна по квантовой физике излучения. Она в то время была не единственной в Берлине. Я хотел бы напомнить об исследованиях Ладенбурга и Копфермана: нельзя забывать, что Копферман был первым, кто смог в серии работ, производящих большое впечатление и опубликованных уже в 1930 г., успешно обнаружить постулированное Эйнштейном в 1916 г. «отрицательное поглощение».

Эти работы Ладенбурга и его школы стали возможны благодаря непосредственному влиянию работ Эйнштейна 1916—1917 гг. Как известно, они подготовили создание квантовой теории, о чем ярко написано, например, у Ван дер Вардена в книге «Возникновение квантовой теории». Влияние этих работ Эйнштейна уже тогда сказалось также и в области электротехники. М. Пирани, используя результаты Герца по физике плазмы и под влиянием работ Эйнштейна, создал свои основополагающие для осветительной техники работы по свободному от потерь превращению электрической энергии в свет в плазме газового разряда.

9 октября 1978 г., Берлин



Уникальное издание

Б. М. Болотовский,
доктор физико-математических наук
Москва



ЭЙНШТЕЙНОВСКИЙ СБОРНИК.
М., «Наука», вып. 1—9, 1966—1978.

Двенадцать лет назад, в 1966 г., вышел в свет первый Эйнштейновский сборник.

Это среднего формата том с черной суперобложкой, на которой помещена фотография скульптурного портрета Эйнштейна, такого, каким он был в последние годы жизни — с морщинами на лбу и задумчивым чуть печальным лицом. От выпуска к выпуску менялся цвет суперобложки, но и шрифт надписи, и фото остались неизменными. Эйнштейновский сборник узнаешь сразу. У него появился устойчивый круг читателей, и круг этот все время расширяется.

За прошедшие годы вышло девять сборников. Пер-

вый из них был сдан в печать в 1965 г., когда научная общественность отметила десятилетие со дня смерти А. Эйнштейна и шестидесятилетие специальной теории относительности. Он вышел в свет в 1966 г., когда отмечалось пятидесятилетие общей теории относительности. Эти памятные даты, как отмечалось в предисловии, «совпадают по времени с большим и весьма важным для современной науки и культуры ростом интереса широких научных кругов к жизни и творчеству Эйнштейна, к содержанию его работ и к судьбе его идей» (с. 6).

За прошедшие с тех пор двенадцать лет интерес к наследию Эйнштейна продолжает расти. Это обстоятельство имеет свое объяснение. Попытки так или иначе осмыслить основы современного физического знания почти всегда приводят нас к необходимости знать мнение Эйнштейна по тому или иному вопросу. Труды Эйнштейна и сейчас читаются, как современные. Например, его работа 1905 г. «К электродинамике движущихся тел», посвященная специальной теории относительности, до сих пор является лучшим учебным пособием. То же можно сказать и о других его работах. Они потому и являются современными, что, выполненные много десятилетий назад, определяют сегодня естественнаучную картину мира.

Но есть и еще одна причина, по которой непрерывно растет интерес к личности Эйнштейна, к развитию его естественнонаучных и методологических воззрений. Это — следствие растущего интереса к истории науки вообще. Теперь история науки — это не хронологический перечень событий, а, в первую очередь, история развития научных идей, наших представлений об окружающем мире. В основе современной

естественнонаучной картины мира лежат представления, имеющие не только чисто физическое, но и глубокое философское значение. В свое время Энгельс заметил, что «с каждым составляющим эпоху открытием даже в естественно-исторической области материализм должен неизбежно изменять свою форму»¹. Переворот в физике, совершенный Эйнштейном, привел и к мировоззренческим изменениям. Эйнштейн был одним из тех физиков XX столетия, которые глубоко осознали необходимость решения философских проблем, поставленных развитием самой физики. «В наше время, — писал Эйнштейн, — физик вынужден заниматься философскими проблемами в гораздо большей степени, чем это приходилось делать физикам предыдущих поколений. К этому физиков вынуждают трудности их собственной науки»². Понятно, что создание теории относительности было связано в немалой степени с философско-методологическим анализом состояния ньютоновской механики, анализом основных ее понятий, выяснением того, насколько эти понятия адекватны, насколько они соответствуют действительности. На основе этого, по существу методологического, анализа и были созданы новые понятия и представления, которые составляют фундамент современной физики.

Приведенные соображения и определяют содержание Эйнштейновских сборников. В редакционном предисловии

¹ Энгельс Ф. Людвиг Фейербах и конец немецкой классической философии. — Маркс К. и Энгельс Ф. Соч., т. 21, с. 286.

² Эйнштейн А. Собрание научных трудов в 4-х томах. Т. 4. М., 1967, с. 248.

первого сборника (его ответственными редакторами были И. Е. Тамм и Б. Г. Кузнецов), которое можно рассматривать как программное, определяющее цели издания, по этому поводу говорилось: «Не следует ограничивать... содержание Эйнштейновских сборников лишь публикацией работ Эйнштейна, их комментированием и анализом непосредственно содержащихся в них идей. Да этого, пожалуй, и нельзя было бы сделать: слишком тесно связаны идеи Эйнштейна с новыми тенденциями теоретической мысли, особенно в ядерной физике, астрофизике, квантовой электродинамике и в теории элементарных частиц. Таким образом, наряду с неопубликованными или малоизвестными статьями и письмами Эйнштейна и воспоминаниями, в Эйнштейновских сборниках будут печататься исследования и обзоры по наиболее общим и фундаментальным проблемам современной теоретической физики в целом» (с. 6).

Именно такая программа и была реализована в дальнейшем выпусках Эйнштейновского сборника. Можно только добавить (это следует из предыдущего), что заметное место в сборниках заняли вопросы философии естествознания.

В нашей стране интерес к научному творчеству Эйнштейна велик, пожалуй, как ни в одной другой стране мира. Выпущенное у нас собрание научных трудов Эйнштейна является самым полным по сравнению со всеми изданными до сих пор за рубежом³. (Переводы некоторых его статей, помещенных в этом собрании, впервые появились в Эйнштейновских сборниках.) Тем не менее часть наследия в собрании не вошла. В первую очередь, это относится к переписке Эйнштейна: в собрании сочинений приведены только его письма к Морису Соловину. Эйнштейновский сборник в раз-

ное время познакомил читателей с частью его переписки: большая часть писем, помещенных в Сборнике, была опубликована корреспондентами Эйнштейна или исследователями-историками уже после того, как у нас вышло из печати собрание его научных трудов. Так, например, в Сборнике 1967 г. было опубликовано письмо Эйнштейна к Ж. Адамару, раскрывающее некоторые взгляды Эйнштейна на психологию научного творчества.

В двух сборниках за 1971 и 1972 гг. была опубликована переписка Эйнштейна с М. Борном. Эта переписка, помимо того что содержит ряд исторических («бытовых») подробностей, интересных для историка науки, ценна еще в том отношении, что довольно полно выражает отношение Эйнштейна к квантовой механике. Существует мнение, что дискуссия по квантовой механике велась главным образом между Эйнштейном и Н. Бором. Из переписки Эйнштейна и М. Борна видно, что не один Бор пытался убедить Эйнштейна в логической непротиворечивости квантовой механики — это же пытались сделать и Борн, и Паули, и, по-видимому, другие корреспонденты Эйнштейна. Дальнейшая публикация переписки Эйнштейна может открыть много интересных деталей относительно его взглядов.

В двух сборниках (1974 и 1975—1976 гг.) опубликована (не до конца) переписка Эйнштейна с другим его студенческим лет М. Бессо. Это тот самый Мишель Бессо, которому Эйнштейн выражает благодарность в конце своей работы 1905 г. по специальной теории относительности. («В заключение отмечу, что мой друг и коллега М. Бессо явился верным помощником при разработке изложенных здесь проблем и что я обязан ему за ряд ценных указаний»⁴.) Переписка Эйнштейна с Бессо интересна, в частности, в том отношении, что в ней нашли отражение не

только физические, но и философские взгляды Эйнштейна.

В Сборнике 1975—1976 гг. приводится также письмо Эйнштейна К. Попперу, автору известных работ по методологии науки. В письме Эйнштейн разбирает вопрос о соотношении детерминизма и статистических законов в значительной степени в связи со своим отношением к квантовой механике.

Большой интерес представляют помещенные в Сборнике 1967 г. воспоминания людей, встречавшихся с Эйнштейном, — Б. Козна (профессора истории науки Гарвардского университета, автора капитальных трудов о творчестве Ньютона и других работ по истории классической физики) и американского физика Р. Шенкланда. Козн беседовал с Эйнштейном по вопросам, связанным с историей физики. Это было за две недели до смерти Эйнштейна. Шенкланд в 1950—1954 гг. пять раз приезжал в Принстон для обсуждения с Эйнштейном целого ряда вопросов, связанных, главным образом, с экспериментальным обоснованием специальной теории относительности. В частности, обсуждалась роль, которую сыграл в создании теории относительности опыт Майкельсона. Эйнштейн был очень высокого мнения об А. Майкельсоне, как об исследователе, и очень высоко ценил его знаменитый опыт, имевший целью обнаружить движение Земли относительно неподвижного «светоносного эфира». В беседах с Шенкландом выяснилась одна подробность, в одно и то же время и удивительная, и важная для понимания научного пути Эйнштейна. Эйнштейн сказал Шенкланду, что при формулировке специальной теории относительности в 1905 г. результаты опыта Майкельсона не сыграли для него большой роли. Такой же ответ Эйнштейн дал позднее и на аналогичные вопросы некоторых других ученых. По словам Эйнштейна, для него был очевиден результат этого эксперимента.

В воспоминаниях Козна и Шенкланда содержится много сведений, ценных для истории науки — авторы, в первую оче-

³ Фейнберг Е. Л. Читай Эйнштейна (Альберт Эйнштейн. Собрание научных трудов в 4-х томах). — «Природа», 1971, № 1.

⁴ Эйнштейн А. Собрание научных трудов. Т. 1. М., 1965, с. 35.

редь, ученые, поэтому основное содержание их воспоминаний составляет изложение мнений Эйнштейна по тем или иным проблемам. Но авторы не смогли удержаться и от личных впечатлений об Эйнштейне-человеке.

Вот что пишет Козн в конце своих воспоминаний: «Я знал, что Эйнштейн большой человек и великий физик, но я не имел представления о теплоте его дружелюбной натуры, о его доброте и большом чувстве юмора» (с. 55).

Шенкланд после каждой встречи записывал содержание бесед. Восхищение его Эйнштейном-человеком с каждым разом росло.

«В моей памяти сохранится воспоминание о профессоре Эйнштейне как о добром и учтивом человеке, глубоко уважающем труд и индивидуальность других. В его поведении не было ни малейшего намека на снисходительность, а только искреннее желание ответить на все мои вопросы и четко определить свои взгляды и отношения» (с. 65), — это о первом визите.

А вот что пишет Шенкланд о четвертом своем посещении: «Наступило время отъезда. Я поблагодарил Эйнштейна; я сохраняю как бесценный дар память о нем, о его замечательной улыбке, о его мальчишеском смехе и об искреннем дружелюбии этого сердца и ума» (с. 77) — после этих слов совсем иначе смотришь на портрет Эйнштейна на суперобложке...

Мы все много раз слышали, что Эйнштейн не признавал квантовой механики и неоднократно выдвигал против нее различные возражения. Поэтому у многих сложилось устойчивое представление об Эйнштейне, как о противнике квантовой механики. Но представление это одностороннее. На самом деле он был прежде всего одним из ее создателей.

Статьи М. Клейна (в разных выпусках переведено четыре его статьи) помогают оценить истинный вклад Эйнштейна в квантовую механику. Особенно интересна в этом отношении работа Клейна «Первая фаза диалога Бора и Эйнштей-

на» (Сборник 1974 г.). Из нее мы узнаем, что соотношение $E = \hbar\omega$ между энергией и частотой электромагнитного кванта, соотношение, всеобщность которого впервые показал Эйнштейн (до этого считалось, что его справедливость в лучшем случае ограничивается рамками теплового распределения), Бор рассматривал вначале (до 1924 г.), как чисто формальное. «Такое представление, — говорил Бор в докладе на III Сольвеевском конгрессе 1921 г., — кажется, с одной стороны, открывающим единственную возможность описания фотоэлектрического эффекта, если мы будем придерживаться неограниченной применимости идеи сохранения энергии и импульса. С другой стороны, однако, оно обнаруживает кажущиеся непреодолимыми трудности с точки зрения оптической интерпретации»⁵. Бор, однако, соотношением $E = \hbar\omega$ пользовался как основным в своей теории атома: если электрон в атоме находился на уровне с энергией E_2 и переходил на уровень с энергией E_1 , то, по теории Бора, при этом излучался квант света с частотой ω , причем эта частота определялась из соотношения $E_2 - E_1 = \hbar\omega$. Это соотношение имело смысл закона сохранения энергии, и, приняв этот закон, уже с необходимостью следовало считать, что энергия кванта равна $\hbar\omega$. Бор, однако, отказывался считать квант частицей — это, как он отметил, делало невозможным объяснение интерференции. Он скорее склонен был отказаться от законов сохранения энергии и импульса. В 1924 г. была опубликована работа Бора, Крамерса и Слэтера, где было принято, что энергия в индивидуальных процессах испускания и поглощения не сохраняется. Выводы этой работы были вскоре опровергнуты в опытах Боте — Гейгера и Комптона — Саймона. Бор согласился с тем, что соотношение $E = \hbar\omega$ отражает свойства кванта как частицы. На этой стадии дискуссии прав

оказался Эйнштейн. Через несколько лет Бор разработал свою концепцию дополнителности, где удовлетворительным образом согласовывались корпускулярные и волновые свойства частиц. Теперь уже Эйнштейн выдвинул ряд возражений, на которые последовали убедительные ответы Бора. Это была вторая стадия дискуссии, о которой говорят гораздо чаще, чем о первой.

Статьи, освещающие различные стороны деятельности Эйнштейна или выясняющие особенности его творчества, публикуются почти во всех выпусках сборника. Это, в первую очередь, можно сказать о работах видного американского историка науки Дж. Холтона, посвященных генезису теории относительности, а также эволюции взглядов Эйнштейна на физическую реальность и основанных в значительной мере на изучении архивов Эйнштейна, которые ранее были неизвестны или недоступны. Отметим здесь публикацию В. Я. Френкелем неизвестных ранее писем А. А. Фридмана, внесшего большой вклад в развитие релятивистской астрофизики, к Эйнштейну и П. Эренфесту, а также статью В. Л. Гинзбурга «Кто и как создал специальную теорию относительности».

Ряд статей посвящен разбору «парадоксов» теории относительности. Такие разборы помогают уяснить релятивистские закономерности и полезны для изучения и преподавания.

До сих пор мы говорили о тех статьях сборника, которые представляют интерес, главным образом, с точки зрения истории (эти статьи занимают примерно 25—30% общего объема). Но не меньшую ценность составляют материалы, отражающие сегодняшний день развития науки, в которых обсуждаются нерешенные проблемы и возможные пути их решения. Такие публикации есть в каждом выпуске сборника, начиная с первого, где помещена большая обзорная статья Я. Б. Зельдовича и И. Д. Новикова «Общая теория относительности и астрофизика», и кончая последним —

⁵ Atomes et Electrons. P., 1923, p. 241.

Сборником 1975—1976 гг., — где напечатан хорошо написанный информативный обзор В. П. Фролова «Физика черных дыр: от Эйнштейна до наших дней». Нередко в сборнике публикуются подборки статей, посвященные одной научной проблеме. Таковы подборки о термодинамике и статистике в специальной и общей теории относительности, о сверхсветовых частицах (тахюнах), о понятии твердого тела в теории относительности, о принципе Маха, о системах отсчета и т. д. Удельный вес таких научных статей в сборнике достаточно велик.

Это издание следует признать уникальным явлением в мировой научной литературе. Именно широка охвата, актуальность рассматриваемых вопросов (и, конечно, высокий научный уровень большей части публикаций) сделали его популярным, что в немалой степени зависело от издательского коллектива. Уже говорилось, что ответственными редакторами первого Сборника (1966) были И. Е. Тамм и Б. Г. Кузнецов, следующих четырех сборников (1967, 1968, 1969—1970 и 1971) — И. Е. Тамм и Г. И. Наан. После кончины И. Е. Тамма в 1971 г. ответственными редакторами двух выпусков (1972 и 1974) были В. Л. Гинзбург и Г. И. Наан. Сборник 1973 г. выпускался редакционной коллегией в составе В. Л. Гинзбурга (отв. ред.), Б. Г. Кузнецова, М. А. Маркова, Г. И. Наана. В состав редакционной коллегии последнего Сборника 1975—1976 гг., ответственными редакторами которого были В. Л. Гинзбург и Б. Г. Кузнецов, был включен также А. А. Логунов. Бесспорным составителем сборника является У. И. Франкфурт, известный историк физики. Почти все из перечисленных лиц сами активно работают в одной или нескольких областях, которые охватываются тематикой Эйнштейновских сборников; в некоторых выпусках помещены и их статьи. С 1968 г. неизменным редактором Издательства является В. А. Никифоровский.

Высоко оценивая сборник в целом, следует отметить и некоторые его недостатки.

Очень жаль, что за 12 лет вышло девять, а не двенадцать Эйнштейновских сборников. Материала хватило бы. До сих пор не переведены на русский язык многие статьи из книги «Albert Einstein Philosopher-Scientist» («Альберт Эйнштейн — философ-ученый»), выпущенной к 70-летию Эйнштейна⁶. Хорошо было бы, если редакционная коллегия сборника взяла бы на себя инициативу ознакомить читателей с неопубликованными еще материалами из архива Эйнштейна. Это, разумеется, зависит, в первую очередь, от душеприказчиков Эйнштейна, но, во всяком случае, было бы целесообразно попытаться сделать все зависящее от редколлегии. Многие проблемы релятивистской астрофизики (гравитационные волны, пульсары, эксперименты по проверке принципа эквивалентности и т. д.) также ждут своего освещения на страницах сборника. Полезно было бы перевести на русский язык целую серию работ о видимой форме быстро движущихся тел, начатую статьями Дж. Терелла и Р. Пенроуза. Напрашивается мысль о том, что следовало бы заказать для сборника хороший обзор по калибровочным полям. Список этот можно было бы продолжить. Необходимо, чтобы редколлегия заказывала обзоры не только отечественным, но и иностранным авторам⁷.

Качество переводов, помещаемых в сборник, не всегда является высоким, встречаются неточности, а иногда и ошибки анекдотического характера. Например, в письме Борна Эйнштейну за 1952 г. есть фраза: «Я снова в Германии получил пенсию (как профес-

сор Эмиритус)...» Кто такой профессор Эмиритус? Общий знакомый Борна и Эйнштейна? Нет у них такого общего знакомого. Это перевод латинского выражения Professor Emeritus (заслуженный профессор).

В Сборнике 1969—1970 г. помещены материалы обсуждения докладов, сделанных на Сольвеевском конгрессе 1911 г. В работе этого конгресса принимал участие Эйнштейн, и среди обсуждений есть и его выступления. Однако в сборнике содержание докладов не приводится, а даны только материалы обсуждений по сделанным докладам. Поэтому понять что-нибудь из текста обсуждений трудно. Нужно было поместить либо редакционные комментарии, либо тексты основных докладов, либо и то и другое вместе. То же самое можно сказать и о подборке дискуссий, опубликованной в конце Сборника 1971 г. Не приведены тексты новых докладов, хотя бы в кратком изложении, и содержание дискуссии остается в значительной мере непонятным читателю.

Если в сборнике публикуется материал с окончанием или продолжением в следующем выпуске (как, например, переписка), это почему-то нигде не оговаривается. Иногда в сборнике публикуются статьи, которые уже были напечатаны в других изданиях. Это само по себе не может вызвать возмущения, так как полностью отвечает целям сборника. Но в таких случаях надо всегда указывать, откуда взята статья, а это делается не всегда.

Бывают случаи, когда в переводе искажается физическое содержание. Справедливости ради следует сказать, что таких случаев не так уж много, но желательно, чтобы их вовсе не было.

Эйнштейновский сборник завоевал прочную репутацию в широких кругах читателей. Мы желаем ему долгих лет жизни и ждем новых выпусков.

⁶ Albert Einstein Philosopher-Scientist. Ed. by P. A. Schilpp. The library of the living philosophers, v. 7. Evanston, 1949.

⁷ В связи с этим стоит отметить, что в Сборнике 1969—1970 гг. опубликована статья В. Гейзенберга о теории единого поля, написанная им специально для Сборника.

Способ укладки ДНК в хромосоме

А. Д. Груздев



Алексей Дмитриевич Груздев, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории общей цитологии Института цитологии и генетики Сибирского отделения АН СССР. Занимается изучением структуры хромосом.

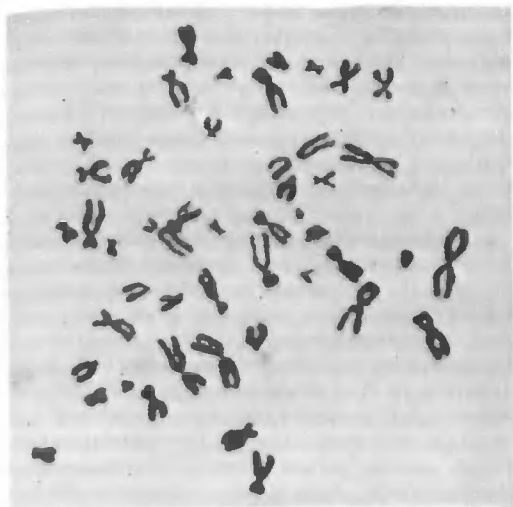
Хорошо известно, что вся наследственная информация эукариот хранится и реализуется в специальных клеточных, точнее ядерных, структурах, называемых хромосомами. Одна из задач науки о хромосомах состоит в том, чтобы объяснить способы укладки гигантской молекулы ДНК в теле хромосомы. Именно с этой точки зрения мы будем рассматривать структуру хромосомы в нашей статье.

Как хранится в клетке генетическая информация, каким образом метры, а иногда даже десятки метров ДНК, упакованы в маленькой структуре клеточного ядра, размеры которого составляют несколько микрометров? (Человек в этом отношении занимает довольно скромное положение — длина ДНК в каждой его клетке около двух метров.)

Способ упаковки ДНК очень важен для нормальной работы клетки, от него зависит активность генов (т. е. изменения способа укладки могут служить одним из механизмов регуляции работы генов); кроме того компактная форма предохраняет нуклеиновую кислоту от внешних воздействий.

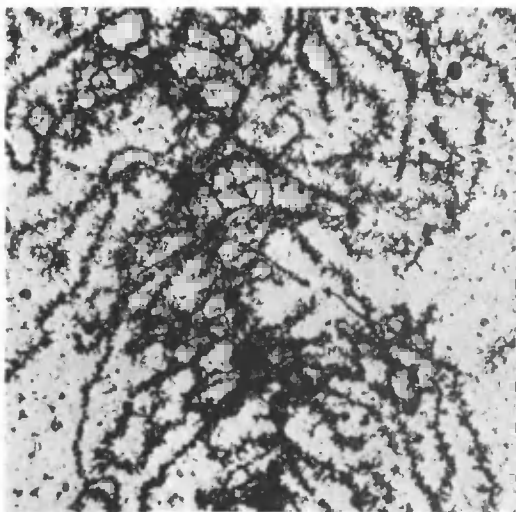
Предельная компактность хромосом необходима также при делении клетки, чтобы точно пополам распределить удвоившийся генетический материал между

дочерними клетками. В этот период хромосомы представляют собой нитевидные или палочковидные образования диаметром около микрометра и длиной до нескольких десятков микрометров. Еще 5—10 лет назад считали, что хромосома состоит из иерархии спиралей. В распространенной модели хромосомы двунитчатая спиральная молекула ДНК сначала укладывалась в спираль диаметром около 100 Å, затем в еще более толстую спираль и так до требуемого размера хромосомы. Такая модель правильно отражала некоторые особенности строения реальной хромосомы, а именно иерархию уровней ее организации и спиральность укладки, однако не учитывала известные факты, полученные при изучении хромосом, находящихся в менее спирализованном состоянии. Обычно у большинства неделящихся (интерфазных) клеток хромосомы не видны, поскольку они сильно деспирализованы и вещество хромосом — хроматин — заполняет весь объем ядра. Различимы лишь глыбки хроматина — хромомеры и специальные участки хромосом — ядрышки. Счастливые исключения составляют гигантские хромосомы, к которым относятся хромосомы типа ламповых щеток и политенные (многонитчатые) хромосомы.



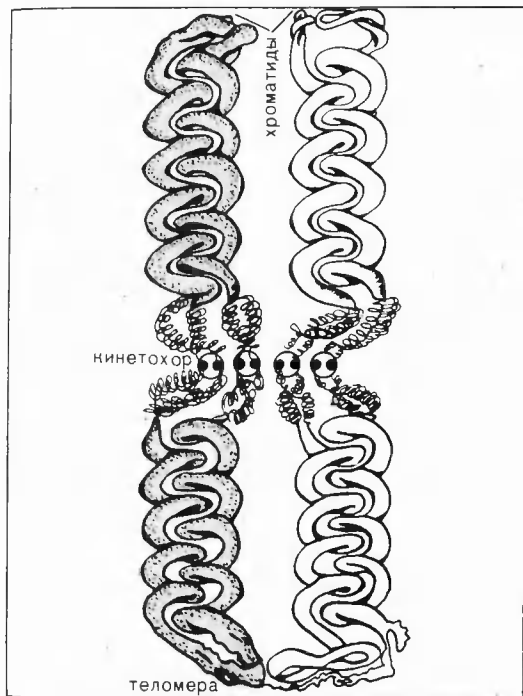
Метафазные хромосомы человека. Разделение сестринских хромосом [хроматид] искусственно задержано, они остались объединенными в районах центромер. Благодаря этому пары хроматид образуют X- или Y-образные фигуры.

Фото Н. Н. Яковченко.



Электронная микрофотография небольшого участка хромосомы типа ламповой щетки из ооцита тритона. Боковые петли расположены по обе стороны от центральной фибриллы, в некоторых местах которой видны плотные хромомеры.

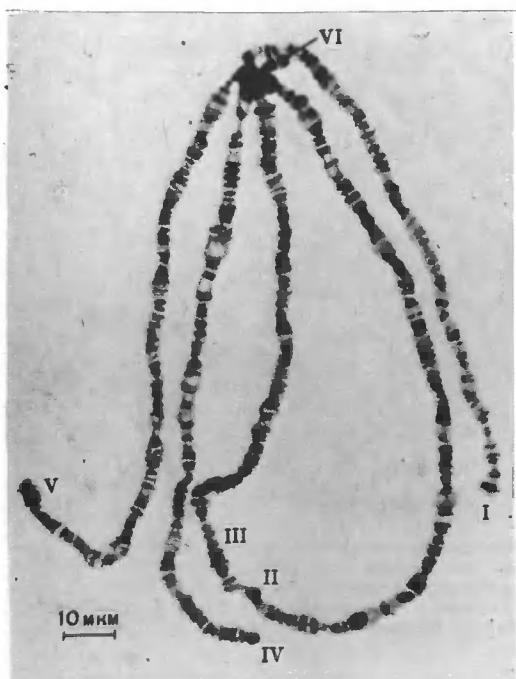
Фото Н. А. Перова.



Одна из старых схем строения метафазной хромосомы.

Хромосомы типа ламповых щеток характерны для определенной стадии развития половых клеток животных и лучше всего изучены у амфибий, у которых эта стадия длится месяцами. Благодаря интенсивному синтезу РНК и белков, сопровождающемуся увеличением размеров ядра, а также накоплению продуктов синтеза на самих хромосомах, они становятся видными в микроскоп. В соответствии со своим названием эти хромосомы выглядят как длинные хроматиновые фибриллы, на которых в определенном порядке расположены петли различной длины и толщины.

Политенные хромосомы лучше всего изучены у личинок мух и комаров, в ядрах клеток которых интерфазные хромосомы претерпевают 10—12 редупликаций и увеличивают свой объем в тысячи раз ($2^{10}=1024$). Благодаря тому, что сестринские копии не расходятся после редупликации, а остаются лежать бок о бок, политенные хромосомы имеют форму длинных (до 200 мкм) изогнутых цилиндров диаметром до 7 мкм. Для каждой хромосомы ядра характерна своеобразная поперечная исчерченность, вызванная чередованием плотных хроматиновых дисков (неактивные участки), менее плотных междисков и вздутых или пухов (активные участки). Пухы образуются из



Политенные хромосомы личинок дрозофилы. Плотные темные участки (диски) состоят из тесно расположенных хромомеров. В рыхлых участках (вздуття, или луфы) идет интенсивный синтез РНК. Отличительной особенностью политенных хромосом дрозофилы является слияние их центромерных районов в единый блок (VI). Некоторые другие участки также склонны к соединению, как, например, теломеры (концы) хромосом II и III на этом рисунке.

одного или нескольких соседних дисков при активации расположенных в них генов.

По-видимому, сходство в строении политенных хромосом и хромосом типа ламповых щеток можно экстраполировать на интерфазные хромосомы вообще. Это непрерывные хроматиновые фибриллы, имеющие ответвления в форме петель. В развернутом состоянии петли активны, т. е. на них происходит синтез РНК. В неактивном состоянии петли свернуты в компактные хромомеры.

ДНК ХРОМОСОМ ОБРАЗУЕТ ПЕТЛИ

Однако, учитывая несколько особое положение гигантских хромосом, возможность подобной экстраполяции долгое время казалась сомнительной. Сейчас существование петель показано для целого ряда объектов и является, по-види-

мому, правилом, а не исключением. Для того чтобы понять целесообразность действий природы при формировании хромосом, рассмотрим гипотетическую ситуацию, в которой, вероятнее всего, находились предки нынешних клеток, состоявшие из мембран, окружавших молекулы нуклеиновых кислот и некоторых белков.

Вероятность появления жизнеспособного потомства при делении проклеток должна быть выше у тех из них, у которых важнейшие в генетическом отношении молекулы нуклеиновой кислоты представлены большим числом отдельных копий. Действительно, без сложного аппарата, обеспечивающего разделение генетического материала поровну между дочерними клетками, малое число копий, имеющихся в материнской проклетке, может с большей вероятностью попасть лишь в одну из них, оставив тем самым вторую нежизнеспособной. Иными словами, прохромосомы проклеток должны были быть представлены большим числом копий сравнительно небольшого числа разных видов (т. е. различающихся по составу оснований) коротких молекул нуклеиновой кислоты.

Интересно отметить, что физические законы также способствовали выживанию проклеток описанного типа. Как известно из статистической физики, длинная гибкая молекула, в частности молекула ДНК, стремится свернуться в клубок, радиус которого R зависит от длины молекулы L . Эта зависимость с достаточной для наших целей точностью выражается формулой $R^2 = 2aL$, где a — некоторый параметр, характеризующий гибкость молекулы и называемый персистентной длиной. Нетрудно видеть, что объем клубка $V \sim (2aL)^{3/2}$. Если же молекула будет разорвана на N (для простоты одинаковых) кусков, то суммарный занимаемый ими объем уменьшится по формуле

$$V_N \sim N \left(2a \frac{L}{N} \right)^{3/2} = \frac{V_1}{\sqrt{N}}.$$

Иными словами, разделение генетического материала клетки на отдельные мелкие прохромосомы уже способствует его более плотной укладке.

Однако совсем не обязательно разрывать молекулу. Укладка будет компактной, если уложить молекулу в петли приблизительно так, как ковбой укладывает лассо на седле своего коня. Только природа оставила между соседними петлями небольшой отрезок ДНК и каким-то образом закрепила основание каждой петли.

Физическая целесообразность такого способа очевидна, если учесть, что для удержания концов петли вместе теоретически не требуется силы, поэтому прочность требуемой скрепки, вероятно, невелика и может быть обеспечена, например, гидрофобными или слабыми, легко обратимыми ковалентными связями типа дисульфидных мостиков. Не менее очевидна и биологическая целесообразность такого способа. Действительно, материальные затраты клетки на создание скрепок не столь уж и велики, а выигрыш, несомненно, велик — появляется возможность создавать системы совместно работающих генов!

Если природа когда-то поступала так, как мы предполагаем, то следовало бы ожидать, что одновременно со слиянием небольших молекул ДНК в гигантские «петлистые» макромолекулы должен был образоваться специальный аппарат для разделения ДНК поровну между сестринскими клетками. Такой аппарат действительно существует сейчас в клетках эвкариот. Что же касается возможности слияния прохромосом, то и сейчас мы можем наблюдать объединение истинных хромосом. Полагают, что этот процесс служит одним из факторов образования новых видов. По-видимому, слишком большое число хромосом сейчас уже не выгодно клетке, так как принуждает ее к излишним затратам на построение громоздкого аппарата деления. У реально существующих организмов в среднем на клетку приходится несколько десятков хромосом (у человека их 46), хотя известные вариации огромны — от единицы до нескольких сотен.

Экспериментально показано, что петли в хромосомах встречаются уже у наиболее просто устроенных организмов, геном которых состоит из одной, достаточно длинной молекулы ДНК. С помощью электронного микроскопа нетрудно убедиться, например, что кольцевые хромосомы бактерий состоят из нескольких десятков или сотен петель. Обнаружить этим же способом петли в хромосомах эвкариот труднее, поскольку размеры их генома, по меньшей мере, на порядок больше. Однако их все же увидели у дрожжей, имеющих малые по сравнению с другими эвкариотами размеры генома; а также в политенных хромосомах дрозофилы. Убедительные доказательства существования петель, основанные на использовании топологических и физических свойств замкнутых кольцевых молекул ДНК, получены для интерфазных хромосом дрозофилы и мыши. Своего рода сенсацией

было обнаружение петель ДНК в хромосомах из делящихся в культуре клеток человека, продемонстрированных на серии прекрасных электронных микрофотографий¹ (напомним, что петли ДНК, окруженные продуктами работы расположенных в них генов, видны в обычный световой микроскоп у хромосом типа ламповых щеток). Дальнейшие исследования, несомненно, покажут их распространенность в хромосомах эвкариот.

Высказанное нами предположение о небольшой прочности скрепок в основании петли было подтверждено в нашей лаборатории Г. Зайниевым и И. Шиловой прямым измерением их прочности. При растяжении политенных хромосом хирономуса с помощью микроманипулятора было обнаружено, что при малых кратностях растяжения (до 5X) хромосомы ведут себя подобно упругой резине и полностью восстанавливают свою форму после снятия нагрузки. При больших степенях растяжения, когда растягивающая сила превышала 10^{-2} дины, возникали необратимые деформации, морфологически выражающиеся в уширении дисков. Для наглядности приведенной оценки прочности скрепок укажем, что разрыв ковалентных связей во всех молекулах ДНК хромосомы, приводящий к ее разрыву, наступал при силах порядка 10^{-1} дин. Интересно при этом отметить, что малая прочность скрепок сочетается с их устойчивостью к ферментам, расщепляющим белки и РНК, а также к некоторым денатурирующим агентам, например к солям, щелочи и мочеvine.

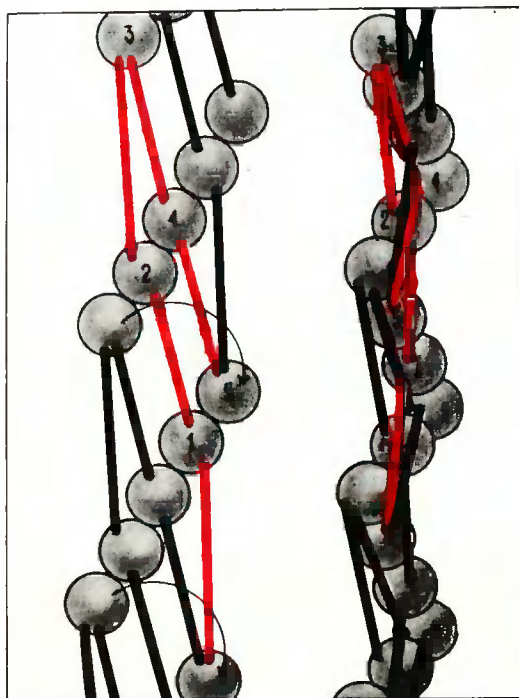
ДНК ХРОМОСОМ УЛОЖЕНА В ФИБРИЛЛЫ

Следующий способ, которым пользовалась природа для укладки молекул ДНК в ядрах эвкариот — это изменение ее персистентной длины. Большое значение $\approx 500 \text{ \AA}$ у ДНК обусловлено, в основном, наличием в ее структуре остатков фосфорной кислоты, взаимное отталкивание которых и придает ей ощутимую жесткость. Действительно, при образовании комплексов ДНК со многими поликатионами ее гибкость заметно увеличивается. Однако не любые поликатионы, а лишь специальный класс этих веществ может удовлетворить требованиям, предъявляемым к ним клеткой.

¹ Paulson J. R., Laemmli U. K. — «Cell», 1977, v. 12, p. 817.

Во-первых, при любом способе укладки регуляторная часть гена должна быть доступна для вещества-регуляторов, во-вторых, укладка должна быть обратимой, чтобы не прекращалось движение РНК-полимеразы, синтезирующей молекулы РНК на матрице ДНК, в-третьих, компактность укладки. Всем этим требованиям удовлетворяют гистоны — основные белки, впервые обнаруженные в 1884 г. А. Коссе-лем в ядрах эритроцитов гусей.

За редкими исключениями гистоны присутствуют в ядрах всех эукариот. Коли-



Модель хроматиновых фибрилл. Для большей наглядности модель построена в два этапа: сначала цепочка нуклеосом уложена зигзагом, а затем свернута так, чтобы нуклеосомы образовали спираль. В представленном виде модель выглядит, как слегка извитая тонкая фибрилла. При последующем сворачивании отрезков межу核осомной ДНК молекулами Н1 гистона образуется спираль из тесно расположенных нуклеосом. Цифрами обозначены номера нуклеосом.

чество их довольно велико — весовое отношение ДНК/гистоны примерно равно единице. За основные свойства гистонов ответственны положительно заряженные остатки аминокислот лизина и аргинина. По своему составу гистоны разделяются на 5 основных фракций, обозначаемых Н1,

Н2А, Н2В, Н3 и Н4. Среди них особняком стоит гистон Н1, самый большой (в 1,5—2 раза больше) по молекулярному весу (21 тыс Д). В этом гистоне много остатков пролина, мешающих упорядоченной укладке полипептидной цепи, меньше остатков неполярных гидрофобных аминокислот, способствующих агрегации белков в водной среде, больше остатков лизина, а не аргинина и т. д. В клетке гистоны испытывают ряд превращений — они фосфорилируются, ацетилируются и метилируются, а гистон Н1 даже рибозилируется. Не вызывает сомнений, что модификации изменяют свойства гистонов и тем самым их взаимодействия с ДНК и между собой, однако смысл модификаций до конца еще не ясен.

В 1943 г. Е. и Э. Седманы предложили гипотезу, согласно которой гистонам отводилась роль регуляторов генной активности. Обнаруженная при этом эволюционная консервативность гистонов, свидетельствующая о важности выполняемой ими функции, казалось бы, подтверждала гипотезу Седманы. Однако согласовать имеющееся разнообразие генетически детерминированных типов клеток в многоклеточном организме с небольшим числом фракций гистонов оказалось невозможным. Существующий экспериментальный материал говорит, что основная роль гистонов заключается прежде всего в упаковке, компактизации ДНК в ядрах эукариот, а регуляция активности генов осуществляется другими белками.

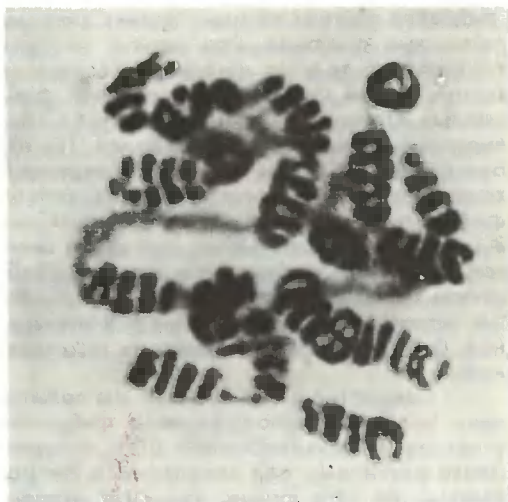
Долгое время строение дезоксирибонуклеопротеидных (ДНП) фибрилл хроматина оставалось неясным. Изменяя условия выделения и способы фиксации хроматина, в электронном микроскопе можно увидеть фибриллы диаметром около 40, 100 или 250 Å. Самые тонкие фибриллы получаются в денатурирующих условиях и представляют собой нить ДНК с присоединенными к ней отдельными молекулами гистонов. Методом рассеяния рентгеновских лучей Дж. Пардону удалось установить, что фибрилла ДНК диаметром 100 Å уложена в виде спирали, однако взаимное положение белка и нуклеиновой кислоты оставалось неизвестным. В кажущемся противоречии с непрерывной спиральной укладкой находились данные о дискретном расположении гистонов на ДНК, полученные Г. Гурским. К тем же выводам пришли Р. Кларк и Г. Фельзенфельд, обнаружившие, что лишь около половины ДНК хроматина доступно для некоторых нуклеаз — фер-

ментов, расщепляющих нуклеиновые кислоты. Фундаментальное значение этих фактов стало очевидным лишь в 1974 г., когда Д. Хьюиш и Л. Бургойн из Австралии нашли в хроматине после обработки нуклеазами отрезки, кратные 200 парам оснований ДНК, а супруги А. и Д. Олинсы с помощью электронного микроскопа увидели глобулы, расположенные на нитях ДНК через равные интервалы. В это же время Р. Корнберг выдвинул предположение, что хроматин состоит из комплексов ДНК с октамерами (H2A, H2B, H3, H4) гистоновых молекул. Дискретные единицы хроматина, состоящие из белковой глобулы и прочно связанного с ней участка ДНК, получили название ν -частиц или нуклеосом.

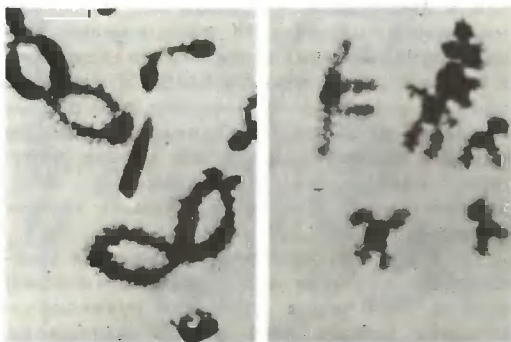
К настоящему времени выяснено², что белковая сердцевина нуклеосомы по форме напоминает толстый диск диаметром около 70 Å и толщиной 57 Å. Она составлена из октамера гистонов (по две молекулы H2A, H2B, H3 и H4), удерживаемых вместе гидрофобными взаимодействиями между остатками неполярных аминокислот. После обработки хроматина нуклеазами вокруг белковой сердцевины нуклеосомы ионными связями удерживается отрезок ДНК длиной в 140 пар оснований, образующий около 1,7 витка спирали и недоступный действию нуклеаз (переваривается межнуклеосомная ДНК).

При удалении гистона H1, хроматин выглядит как фибриллы толщиной в 100 Å, в которых ДНК расположена снаружи в виде спирали с переменным шагом. Гистоновые глобулы расположены внутри спирали. В таком состоянии ДНК слегка напряжена (недокручена до нормального состояния), и поэтому она стремится развернуться, но скрепка, имеющаяся в основании каждой петли, препятствует этому. При внесении хотя бы одного разреза в одну из цепей двуцепочечной ДНК, образующей петлю, цепь разворачивается и фибрилла распадается на отдельные нуклеосомы, соединенные отрезками межнуклеосомной ДНК. Именно такая картина бусинок на нитке и была обнаружена Олинсами. В естественных условиях (внутри клеточного ядра) скручивание и раскручивание петли производится специальным ферментом гиразой.

Существуют три основные модели,



хромосомы Tradescantia, обработанные азотной кислотой. Спиральность укладки хроматина обычно обнаруживается лишь после специальных обработок препаратов хромосом.



Хроматиновые петли в спирализующихся хромосомах саранчука видны в течение почти всего мейоза. На фото — две разные стадии мейоза.

Фото Л. В. Высоцкой.

объясняющие, каким образом фибрилла толщиной 100 Å расположена внутри более толстой фибриллы диаметром 250 Å. Получены они преимущественно из результатов электронно-микроскопических исследований. В первой модели, предложенной Г. Рисом еще в 1966 г., толстая

² Finch J. T., Lutter L. C., Rhodes D., Brown R. S., Rushton B., Levitt M., Klug A. — «Nature», 1977, v. 269, p. 29.

фибрилла состоит из пары тонких взаимно перевитых фибрилл. Ряд других авторов считает, что толстая фибрилла состоит из одной тонкой суперспирализованной фибриллы. Однако реальная структура, по-видимому, сложнее этих моделей. По наблюдениям Г. Кириянова и соавторов³, толстая фибрилла состоит не из тонкой фибриллы, а из глобул, содержащих 6—8 нуклеосом. Не вызывает сомнений лишь тот факт, что стабильность толстой фибриллы определяется молекулами H1 гистона, связанного с участками межнуклеосомной ДНК и способствующего их скручиванию.

Совместно с Г. Кищенко⁴ мы попытались выяснить расположение в фибрилле участков межнуклеосомной ДНК, которые плохо различимы под электронным микроскопом, но зато лучше, чем ДНК нуклеосом, окрашиваются многими красителями. С этой целью мы сравнивали эффективность миграции энергии возбуждения флюоресцентного красителя акридинового оранжевого, связанного с хроматином в виде толстых нитей и в виде бусинок на нитке. Результаты исследования показали, что в фибриллах толщиной 250 Å участки межнуклеосомной ДНК расположены тесным пучком (или пучками), содержащим в сечении около трех отрезков. Эти данные явно не согласуются с моделями в форме спиралей из спиралей. Однако спиральную укладку нуклеосом все же можно получить, расположив одновременно межнуклеосомные ДНК в требуемой конфигурации.

Известно, что ДНК связывается с октамером гистонов в растворе самопроизвольно. Поэтому в ядре, где нуклеосомы мешают работе РНК и ДНК-полимераз, нуклеосомы должны разворачиваться при активном участии каких-то внутриядерных ферментов. Полагают, в частности, что вызываемые соответствующими ферментами модификации гистонов (ацетилирование, метилирование, фосфорилирование и рибозилирование) способствуют изменениям укладки ДНК как на уровне нуклеосом, так и на уровне хроматиновой фибриллы. Набегающие при этом лишние или недостающие витки в петле ДНК снимаются или, соответственно, добавляются

в двойную спираль ДНК механизмом гиразы.

Хотелось бы отметить удивительно большую скорость взаимно согласованных реакций, приводящих к декомпактизации хромомера при активации расположенных в нем генов. Так называемые t^0 -пuffs дрозодилы, индуцированные в политекных хромосомах личинок кратковременным прогревом, обнаруживаются уже через 2—3 минуты после начала прогрева. Более того, к этому времени в них уверенно регистрируется даже процесс синтеза молекул РНК.

ХРОМАТИДА

Перейдем теперь к рассмотрению хромосом в делящихся клетках, когда они полностью прекращают синтез РНК и конденсируются в плотные палочковидные образования, легко наблюдаемые в световой микроскоп. В процессе их формирования каждая петля собирается в хромомер и образуется толстая хроматиновая фибрилла диаметром 0,2—0,3 мкм — хромонема. Напомним, что в интерфазе, т. е. до начала деления, происходит редупликация всего генетического материала ядра, и поэтому каждая хромосома состоит из пары сестринских хроматид, которые разойдутся в сестринские клетки. Для укладки хромонемы в тело хроматиды механизм типа гираз явно не годится. Но здесь следует учесть то обстоятельство, что деление — очень важный этап в жизни клетки, без которого ее существование невозможно. Здесь природа «изобрела» новый, причем весьма дорогостоящий механизм. Материально он воплощен в виде так называемого митотического аппарата, состоящего из белков типа тубулина, полимеризующихся в виде длинных нитей или трубочек и способных выполнять опорные функции, а также сократительных белков типа актина и миозина мышц. Наличие больших количеств белков этих типов в ядрах клеток неоднократно демонстрировалось в ряде работ. По-видимому, механизм укладки хромонемы в хроматиду очень близок к механизму движения хромосом при делении клетки, эволюция которого, вероятнее всего, привела к появлению мышц у животных.

Что же касается пространственного расположения хромонемы в хроматиде, то здесь опять обнаруживается спираль — факт, известный еще классикам цитологии, назвавшим процесс формирования хромосомы спирализацией. Но именно на этом

³Тезисы V Всесоюзного симпозиума «Структура и функции клеточного ядра». Новосибирск, 1975, с. 7.

⁴«Молекулярная биология», 1977, т. 12, № 3, с. 663.

уровне организации хромосомы больше всего нерешенных проблем.

Одна из них — проблема многонитчатости. Суть ее заключается в том, что результаты исследования структуры хромосом, полученные разными методами, можно разделить на две группы. Одни из них говорят о существовании лишь двух хроматид в хромосоме перед делением, тогда как другие различают в ней четыре полухроматиды.

Наиболее ярким доказательством существования полухроматид служат ки-

следовательном линейном расположении генов в каждой хромосоме, полуконсервативный способ редупликации ДНК хромосомы, выявляющий лишь две (в точности как у двухнитевой молекулы ДНК) субъединицы в хроматиде, а также данные по кинетике нуклеазного расщепления петель и осевых фибрилл хромосом типа ламповых щеток.

Было предложено немало моделей, авторы которых пытались найти компромиссные решения проблемы, подвергая сомнению достоверность результатов тех

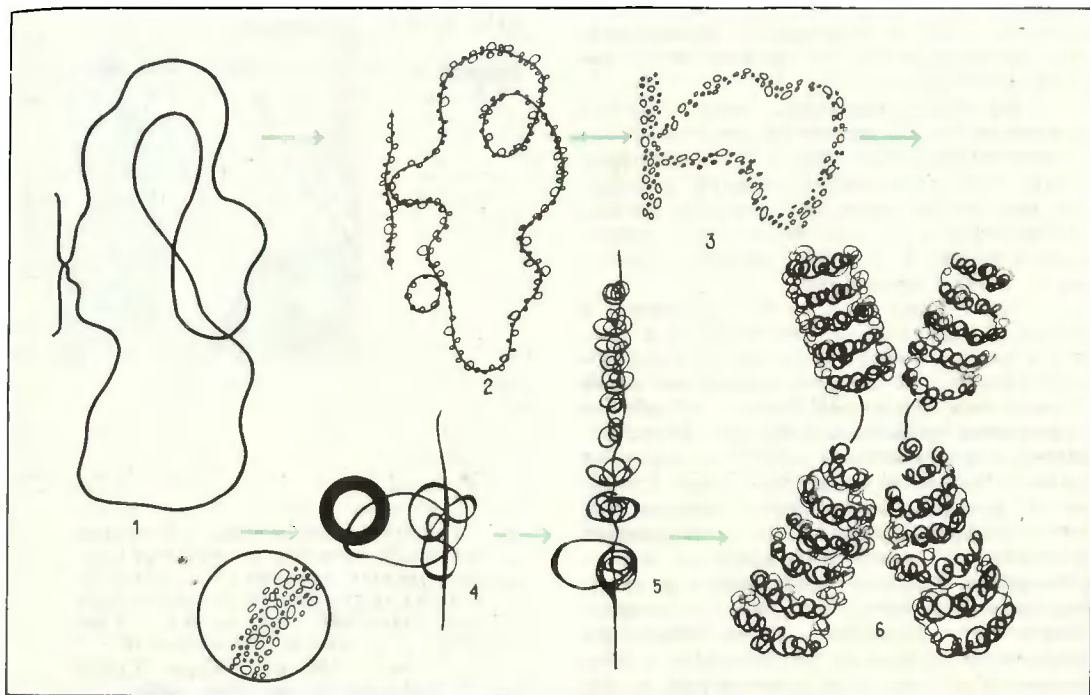


Схема укладки ДНК в хромосомах эукариот. Участок молекулы ДНК, образующий петлю (1), сворачивается в цепочку нуклеосом вокруг октамерного комплекса гистонов (H2A, H2B, H3, H4), (2). С помощью гистона H1 образуются фибриллы толщиной 250 Å (3), которые затем укладываются в хромонему (4). Нить тесно уложенных хромонем образует хромонему (5). Метафазная хромосома содержит пару спирализованных хромонем (6).

Рис. Ф. С. Валеевой.

нофильмы А. Байера о делении хромосом в эндосперме *Naemanthus*, заснятые им на живом, нефиксированном материале. В пользу однострочности хромосомы (одна молекула ДНК в одной хромонеме в одной хроматиде) свидетельствует вся совокупность генетических данных о по-

или иных экспериментов. Полагали, например, что хроматида содержит две хромонемы и, следовательно, две параллельные нити молекулы ДНК. Для согласования свойств такой двунитчатой хроматиды с данными в пользу однострочности приходилось допускать генетическую тождественность обеих молекул ДНК, специальный механизм коррекции, поддерживающий эту тождественность, вводить жесткие ограничения на взаимное расположение молекул ДНК, и опять же, специальный механизм для их разделения после репликации и т. д. Большинство вводимых таким образом постулатов с трудом поддавалось экспериментальной проверке и, вероятнее всего, попросту неверны.

Эксперименты Р. Кавенова и Б. Цимма⁵, проведенные в 1973 г. на хромосомах дрозофилы методом вязкоэластометрии, говорят в пользу однострочности. Однако для других объектов, в частности для дрожжей, результаты оказались менее четкими. Вместе с Н. Резник мы попытались разрешить эту проблему очень простым методом. Мы измеряли степень удлинения полнотенных хромосом хирономуса, которые растягивались иглами микроманипулятора. Было обнаружено, что предельное значение этой величины в точности соответствует коэффициенту укладки ДНК в полнотенной хромосоме, сформировавшейся из однострочной интерфазной хромосомы.

Из всего сказанного выше следует, что решение обсуждаемой проблемы заключается не в том, чтобы путем эксперимента отбросить альтернативную модель, а в том, чтобы найти единственное непротиворечивое решение. Искать его, наверное, следует в способе укладки хромонемы в теле хроматиды.

Еще одна неясность, связанная с укладкой хромонемы, заключается в том, что в каждой клетке толщина всех хромосом и плотность укладки хроматина в них практически одинакова. После обработки препаратов хромосом щелочью, кислотой, высокой температурой и другими агентами удается выявить неоднородность укладки — хромосомы становятся полосатыми. Таким образом, сейчас идентифицируют хромосомы, не отличающиеся по своим размерам. Причину появляющейся неоднородности резонно связывают с неоднородностью хромонем, составленных из больших и маленьких хромомеров, с различием в составе ДНК хромомеров, с различиями в составе белков и т. д. Но как и почему все эти неоднородности сглаживаются при укладке хромонемы в хроматиду, остается неясным.

К сожалению, нам не удалось обойти молчанием многочисленные неясности и получить целостную картину строения хромосомы. В целом мы можем лишь перечислить уровни структурной организации хромосомы или, если угодно, уровней укладки ДНК в ней. Порядок расположения уровней соответствует возрастанию их пространственного масштаба и сложности: 1 — нуклеосома, 2 — фибрилла диаметром 250 Å, 3 — хромомер, 4 — хромонема, 5 — хроматида.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Кикнадзе И. И. ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ХРОМОСОМ. Л., 1972.

Ченцов Ю. С., Поляков В. Ю. УЛЬТРАСТРУКТУРА КЛЕТОЧНОГО ЯДРА. М., 1974.

Прокофьева-Бельговская А. А. ХРОМОСОМА ГЛАЗАМИ СОВРЕМЕННОЙ НАУКИ.— «Природа», 1974, № 9.

Богданов Ю. Ф. КАК ХРОМОСОМЫ УЗНАЮТ ДРУГ ДРУГА.— «Природа», 1976, № 5.

Захаров А. Ф. ХРОМОСОМЫ ЧЕЛОВЕКА. М., 1977.

Очередные номера «Природы» можно приобретать по предварительным заказам, оставив заказ лично до 5 числа за два месяца до выхода журнала (например, заказ на № 6 до 5 апреля) в магазинах «Академкнига»:

№ 1 — Москва, 103009, Центр, ул. Горького, 8, тел. 229-11-78.

№ 2 — Москва, 117313, ул. Вавилова, 55/7, тел. 135-63-49.

Наложенным платежом журнал высылается при заказе по адресу: 103012, Москва, К-12, Центр, Большой Черкасский пер., д. 2/10, тел. 221-57-26. Центральная контора «Академкнига».

⁵ Kavenoff R., Zimm B. — «Chromosoma», 1973, v. 41, p. 1.



Способность окружающей среды к самоочищению

М. А. Глазовская



Мария Альфредовна Глазовская, доктор географических наук, заведующая кафедрой геохимии ландшафтов и географии почв географического факультета Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова. Занимается ландшафтно-геохимическими исследованиями в целях поиска месторождений полезных ископаемых и прогноза антропогенного геохимического воздействия на природные системы. В последние годы разрабатывает общие вопросы классификации почв мира и теорию ландшафтно-геохимических систем. Автор монографий: Геохимические основы типологии и методики исследования природных ландшафтов. М., 1964; Почвы мира. М., 1972 и 1973 и др.

Производственная деятельность людей сопровождается извлечением на поверхность земли минеральных и органических веществ, их перегруппировкой и синтезом новых органических соединений, многие из которых очень токсичны. Одни токсичные вещества вырываются в природную среду лишь в силу несовершенства технологических процессов, и при изменении технологии их рассеяние может быть ограничено или даже сведено на нет. В противоположность этим «стихийным» загрязнителям существует большая группа органических веществ, которые синтезируются человеком специально для того, чтобы быть рассеянными. Это разнообразные пестициды, среди которых есть очень стойкие и весьма токсичные не только для растительных организмов и беспозвоночных, но также для теплокровных животных и для человека.

Для того, чтобы определить состав и нормы внесения пестицидов, планировать размещение производств, опасных с точки зрения загрязнения среды токсичными минеральными и органическими веществами, а также строительство очистных сооружений, необходим строгий анализ степени устойчивости природных ландшафтно-геохимических систем к различного рода техногенным воздействиям. Такие исследования проводятся в последние

годы на кафедре геохимии ландшафтов и географии почв МГУ.

Пути миграции, места накопления и скорость разложения токсичных техногенных органических веществ, в том числе пестицидов, в разных природных ландшафтах существенно различны. Они зависят от химической природы этих веществ, от ландшафтно-геохимической обстановки, в которую они попадают, и от общей структуры той ландшафтно-геохимической природной системы, в которую вливается поток загрязнителей.

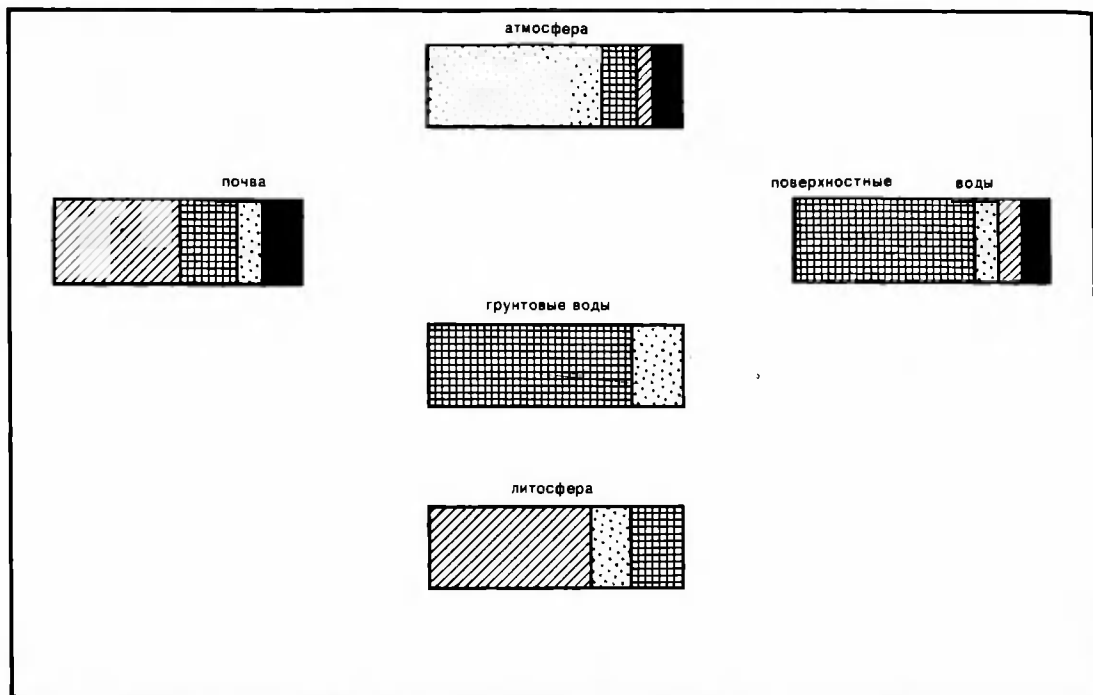
По уровням организации и степени внутренней взаимосвязи ландшафтно-геохимические системы можно разделить на элементарные и каскадные¹. Элементарная ландшафтно-геохимическая система — это часть территории или акватории, в пределах которой качественный состав и напряженность миграционных потоков между компонентами ландшафта (приземной атмосферой, горными породами, растительностью, поверхностными и грунтовыми водами) сходны в той степени, в какой это приводит к формированию на суше одинаковой разности почв, а в аква-

¹Глазовская М. А. Ландшафтно-геохимические системы и их устойчивость к техногену. В кн.: Биогеохимические циклы в биосфере. М., 1976.

тории — одной определенной фации донных отложений. Почвы и донные отложения водоемов — это именно те блоки ландшафтно-геохимических систем, в которых накапливаются техногенные вещества; они несут наибольшую информацию о различного рода техногенных аномалиях.

Во всех блоках: в атмосфере, в природных водах, в почвах, и в верхних горизонтах донных отложений — присутствует живое вещество. Если в один из блоков элементарной системы поступают тех-

на отдаленные территории. Пестициды и их метаболиты, смытые с поверхности растительного покрова, попадают в почвы, частично выносятся с поверхностным стоком, накапливаются в депрессиях или же выносятся ручьями и реками в бессточные водоемы. Часть пестицидов, поглощенная растениями, из воздуха и почвы попадает с корневыми прижизненными выделениями растений и с их остатками в почвенную толщу, вызывая деградацию почвенной микрофлоры. При хорошей водопроницаемости почв и промывном водном



Потоки вещества между блоками элементарной ландшафтно-геохимической системы.

Фазы вещества в блоках



ногенные токсичные вещества, то в силу взаимосвязанности всех блоков, они в той или иной мере поражают живое вещество всей системы. Так, например, при авиационной обработке полей и лесов часть вещества еще в воздухе рассеивается и попадает на окружающие, а часто и

режиме наиболее растворимые пестициды проникают до грунтовых вод и обнаруживаются в колодцах.

Таким образом, относительное самоочищение одного блока ландшафтно-геохимической системы вызывает загрязнение других блоков. Этот процесс идет до тех пор, пока не произойдет полного распада (минерализации) органических загрязнителей или они не будут выведены за пределы данной элементарной системы.

Но и в последнем случае вредоносное действие загрязнителей не будет исчерпано, поскольку элементарные ландшафтно-геохимические системы, находящиеся на различных гипсометрических уровнях, связаны между собой миграционными потоками и объединяются, в свою

очереди, в каскадные ландшафтно-геохимические системы. Поток вещества от более высоких к более низким ступеням каскада идет с поверхностным и подземным стоком, с перемещением твердых масс, с воздушными потоками. Обратное движение вещества от более низких к более высоким ступеням каскада осуществляется преимущественно воздушным путем и поэтому несколько слабее. Элементарные ландшафтно-геохимические системы, образующие верхнюю ступень каскада, геохимически относительно автономны, а те, что находятся на более низких ступенях,— геохимически подчинены. В связи с этим потоки техногенных веществ одинаковой степени токсичности и интенсивности опасны в большей или меньшей мере в зависимости от того, поступают ли они в верхние звенья каскада (и таким образом могут охватить всю каскадную систему) или локализируются в ее конечных звеньях, образуя менее обширные техногенные аномалии.

Местные геохимические ландшафты, находящиеся в одном бассейне стока (например, ландшафты горных долин, подгорных равнин, межгорных впадин), образуют еще более сложные и протяженные каскадные ландшафтно-геохимические территориальные системы — так называемые ландшафтно-геохимические арены. Бассейны рек первого, второго и третьего порядков представляют собой ландшафтно-геохимические арены различной степени сложности. Ландшафтно-геохимические арены можно разделить на открытые, с конечным сбросом веществ в моря и океаны, и замкнутые, с конечным сбросом веществ в бессточные впадины. Естественно, что от типа арены зависит и судьба поступающих в ее пределы техногенных веществ: в одних случаях идет аккумуляция токсичных веществ в конечных областях стока, в других — загрязнение приморских дельт и эстуариев, в третьих — рассеяние на больших пространствах суши и океана и, при устойчивости загрязняющих веществ, — повышение уровня их содержания в глобальном масштабе.

На территории СССР имеется ряд замкнутых ландшафтно-геохимических арен. Это бессточные области Прикаспийской и Туранской низменностей, многочисленные бессточные бассейны в Центральном и юго-восточном Казахстане, среди которых наиболее крупные — Алакульский, Балхашский, Тенгиз-Кургальджинский и бессточные озерные бас-

сейны Западно-Сибирской низменности в Ишимской, Кулундинской и Барабинской степях. Ряд рек с истоками, лежащими в горах Тянь-Шаня, Памиро-Алая, Копетдага, воды которых на подгорных равнинах используются на орошение (например, Мургаб, Теджен, Зеравшан, Кашка-Дарья, Талас, Чу), заканчиваются слепыми дельтами. В области дельт почвы и грунтовые воды обогащены не только солями, но и воднорастворимыми остаточными пестицидами и дефолиантами, которыми обрабатываются орошаемые массивы. Бассейны этих рек — яркие примеры замкнутых ландшафтно-геохимических арен, в которых процессы самоочищения почв, поверхностных и грунтовых вод на более высоких ступенях каскадной системы сопровождаются процессами загрязнения в геохимически подчиненных ландшафтах нижних ступеней каскада, отстоящих часто на десятки и сотни километров от места обработки полейдохимикатами.

Таким образом, замкнутые ландшафтно-геохимические арены — это территории с наибольшей опасностью накопления в конечных звеньях каскадной системы токсичных органических и других загрязняющих веществ, поступающих в данный водосборный бассейн.

Скорость самоочищения геохимически автономных и «транзитных» геохимически-подчиненных звеньев каскадных систем за счет сброса загрязняющих веществ с поверхностным и грунтовым стоком зависит от величины стока. На территории СССР годовой слой поверхностного стока варьирует от 800—1000 мм до 10 мм и менее, т. е. отличается более чем в 100 раз. Для Камчатки, Кольского полуострова, всех горных областей характерен наибольший слой стока. На равнинах Европейской части СССР, Западной Сибири, Казахстана и Средней Азии слой стока уменьшается с севера на юг от 500—300 мм в зоне тайги до 200—150 мм в лесостепной зоне и северной степи. Далее, в южной части степной зоны величина поверхностного стока падает до 50—30 мм, в полупустынях составляет лишь 20—10 мм, а в пустынях опускается ниже 10 мм, доходя в бессточных областях до 0.

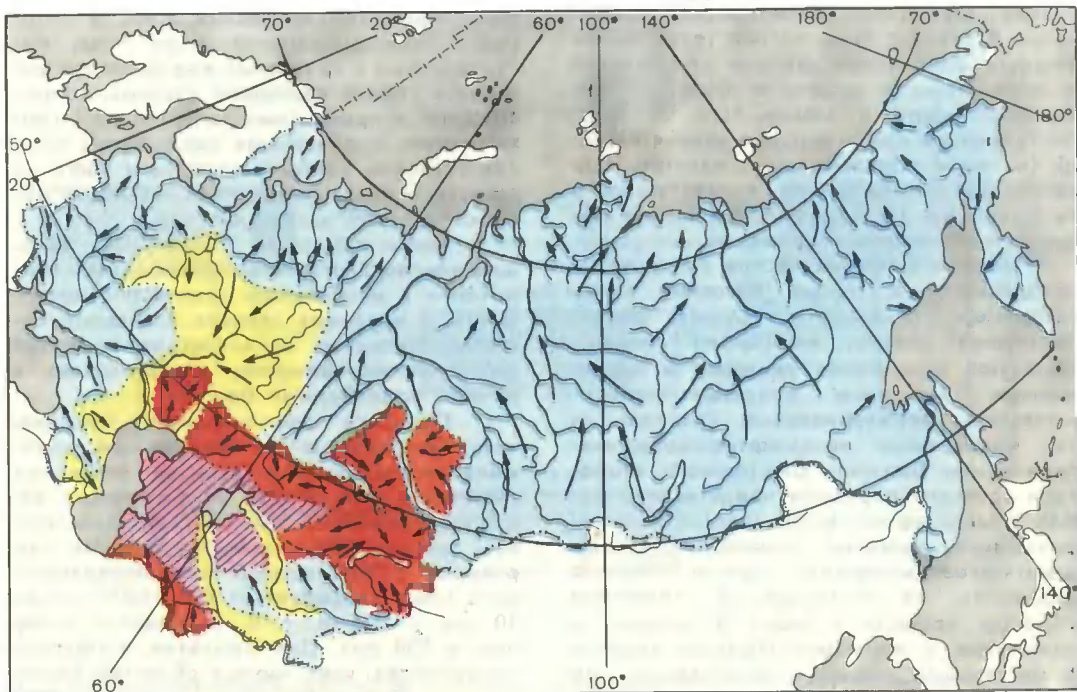
Естественно предполагать, что и скорость самоочищения ландшафтов и водоемов от воднорастворимых загрязняющих веществ также уменьшается в направлении с севера на юг пропорционально уменьшению слоя стока.

Самоочищение атмосферы путем выноса загрязняющих веществ, с воздуш-

ными потоками зависит от скорости и направления ветров, частоты штилей и температурных инверсий, препятствующих рассеянию загрязняющих атмосферу аэрозолей и газов. Вероятность штилей изменяется на территории СССР в достаточно широких пределах. Она наибольшая во внутриконтинентальных областях Сибири, особенно в Якутии, где вероятность штилевых погод составляет 60%, а во время зимнего антициклона создаются длительные температурные инверсии в приземной и свободной атмосфере. Поэтому здесь

особенно опасны зимние техногенные смоги.

Вероятность штилей весьма велика (50—55%) также в межгорных котловинах и замкнутых межгорных долинах Кавказа и горных районах Средней Азии, в которых часто сосредоточены крупные промышленные комплексы. Зимние температурные инверсии, весьма обычные здесь, сопровождаются устойчивым техногенным загрязнением атмосферы, а соответственно и земной поверхности. Об этом свидетельствуют ярко выраженные



Типы ландшафтно-геохимических арен и основные направления поверхностного стока на территории СССР.

Ландшафтно-геохимические арены

- замкнутые
- открытые во внутренние бассейны
- открытые в морские бассейны
- территории без поверхностного стока
- общее направление потоков веществ

техногенные аномалии, проявляющиеся в загрязнении снежного покрова.

На равнинах Европейской части СССР, Западной Сибири и Средней Азии вероятность штилевых погод почти вдвое ниже (20—30%). Наименьшая вероятность штилей характерна для морских побережий, где она составляет 12—10% и менее. Это хорошо «продуваемые» и поэтому легко самоочищающиеся территории.

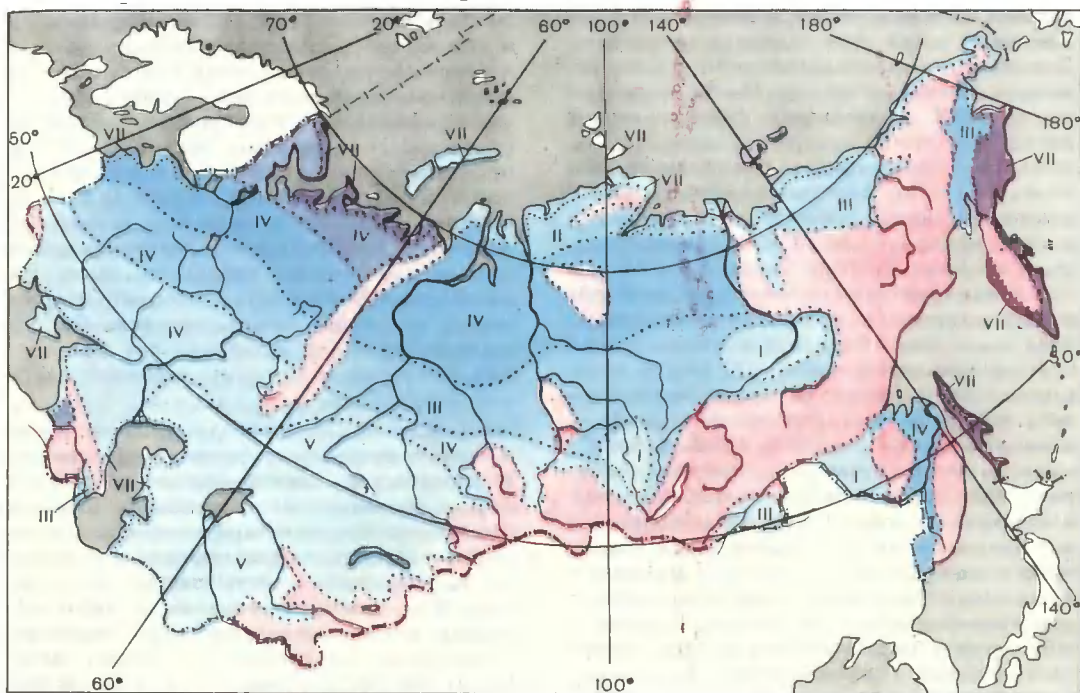
Сочетания рассмотренных выше показателей интенсивности рассеяния продуктов техногенеза водными и воздушными потоками позволяют выделить на территории СССР регионы, различающиеся по относительной скорости самоочищения

или, наоборот, опасности локального загрязнения².

Однако, как уже говорилось ранее, «самоочищение» ландшафтов путем рассеяния загрязняющих веществ или «сброса» их в геохимически подчиненные ландшафты приводит в определенных условиях к их вторичной аккумуляции в подчиненных звеньях ландшафтно-геохимических систем, т. е. к постепенному повышению содержания загрязняющих веществ на обширных пространствах воздушного бассейна, суши и акваторий. Истинное само-

очищение всех компонентов ландшафта и ландшафтно-геохимических систем в целом от органических загрязняющих веществ наступает при разложении этих веществ до нетоксичных органических метаболитов или, что более радикально, до полной минерализации.

Разложение органических загрязняющих веществ в атмосфере, на поверхности растительного покрова, на поверхности почв и водоемов обязано различного рода фотохимическим реакциям, протекающим под воздействием ультра-



Типы регионов с различной степенью рассеяния органических загрязняющих веществ в поверхностных водах и в атмосфере, выделенные с учетом годового стока (показан цветом) и среднегодовой вероятности штелей [в %]: I—60; II—50—55; III—30—35; IV—25—29; V—20—24; VI—13—19; VII < 12.

Годовой слой стока (мм слоя)



фиолетовой радиации. Чем больше годовые дозы ультрафиолетовой радиации, тем быстрее, при прочих равных условиях, идет самоочищение среды. На территории СССР годовые дозы ультрафиолетовой радиации возрастают с севера на юг от 100 до 800 Вт·час/м², т. е. в 8 раз, а если учесть и низкие дозы ультрафиолетовой радиации в арктической зоне, то в 10—15 раз.

В этом же направлении возрастает сумма среднегодовых температур и сум-

² Глазовская М. А. Технобиогеоми — исходные физико-географические объекты ландшафтно-геохимического прогноза. «Вестник МГУ, сер. географическая», 1972, № 6.

ма активных температур воздуха и почв (от 200—500°C — в лесотундре и северной тайге, до 4000—5500°C — в пустынях). С возрастанием суммы активных температур, как известно, увеличивается скорость разложения растительного опада. Можно предполагать, что подобным же образом меняется скорость разложения загрязняющих органических веществ. В качестве показателя скорости разложения опада пользуются так называемым опадо-подстилочным коэффициентом³: отношением массы лесной подстилки или степного войлока, накопившихся на поверхности почвы, к массе ежегодного наземного опада (на единице площади). Значения опадо-подстилочного коэффициента уменьшаются от 75—90 в тундре до 0,7—0,3 во влажных субтропических лесах и пустынях.

Так, например, в пределах Нечерноземной зоны Европейской части СССР сумма активных температур в почвах и в воздухе возрастает от подзоны лесотундры к лесостепной зоне более чем в 10 раз. Средние значения опадо-подстилочных коэффициентов в незаболоченных сосняках, ельниках и березняках уменьшаются в этом направлении в 15—20 раз. В лесостепной зоне в сосновых лесах накапливается лишь 1,5—2-годовой запас подстилки, в лесотундре — 17-летний запас. В березняках в лесотундре накапливается запас подстилки, равный массе опада за 16 лет, а в средней и южной тайге запас подстилки в березняках не превышает массу годичного опада. Столь же большая разница в значениях опадо-подстилочного коэффициента характерна для ельников-зеленомошников в подзонах лесотундры, северной, средней и южной тайги.

Таким образом, общая тенденция увеличения скорости минерализации в направлении с севера на юг сохраняется для органических растительных остатков различного состава: как для опада хвойных пород, богатого трудно разлагаемыми битумами, смолами, восками, лигнином, так и для листовенно-травяного опада березовых лесов, разлагающегося гораздо быстрее. Надо полагать, что подобные же тенденции сохраняются и для загрязняющих органических веществ. Одни из них

разлагаются медленнее, другие быстрее, но разница в скорости разложения органических загрязнителей одного и того же состава в тундрах, лесах, степях и пустынях должна быть того же порядка, как и для растительных остатков.

Исключение из этой общей картины составляют заболоченные территории и болота. Так, например, в подзоне южно-таежных лесов Валдайской возвышенности от вершин моренных гряд к межгрядовым понижениям можно наблюдать смену различных типов ельников в связи с возрастающим увлажнением почв. Наиболее сухие места заняты ельниками-кисличниками и ельниками хвощево-папоротниковыми; с увеличением увлажнения они сменяются ельниками-черничниками, затем сфагново-черничными и по окраинам болот — ельниками сфагновыми. Значения опадо-подстилочного коэффициента возрастают при этом от 1,9; 3,4; 6,8; 9,7 до 25,5, т. е. при перемещении от вершины к местной депрессии на расстоянии нескольких сотен метров мы можем наблюдать столь же значительную разницу в скорости разложения наземного опада, как если бы мы переместились на несколько сот километров к северу в подзону северной тайги или лесотундры.

Еще медленнее разлагается органическое вещество в болотах, где микробиологическая деятельность вследствие переувлажнения и анаэробных условий подавлена. Возраст торфяников, согласно радиоуглеродным датировкам, измеряется тысячелетиями. Есть основания полагать, что слаборастворимые и нерастворимые органические токсичные вещества, попадающие на поверхность болот, также будут разлагаться очень медленно, а при поступлении новых порций загрязнителей из атмосферы или с водами их концентрация может угрожать существованию биоценоза в целом. Имеются данные о накоплении вдоль автотрасс в почвах, растениях и водах токсичных веществ, причем на общем повышенном фоне выделяются пересекаемые автотрассами заболоченные массивы, где уровень содержания этих веществ увеличивается на целый порядок⁴. Болота — это восстановительные ландшафтно-геохимические барьеры, своеобразные «ловушки», где могут аккумулироваться токсичные техногенные

³Базилевич Н. И., Родин Л. Е. Географические закономерности продуктивности и круговорота химических элементов в основных типах растительности Земли. В кн.: Общие теоретические проблемы биологической продуктивности. М., 1969.

⁴Никифорова Е. М. Загрязнение природной среды свинцом выхлопных газов автотранспорта. «Вестник МГУ, сер. географическая», 1975, № 3.

органические вещества и некоторые металлы.

Следовательно, с увеличением заболоченности территории, при прочих равных условиях, возрастает опасность ее загрязнения. Она не ограничивается болотными массивами, так как через пищевые цепи может проявиться в нарушении здоровья животных и людей на окружающих территориях, а в случае промышленного сбора грибов и ягод и их консервации отразиться на здоровье жителей даже отдаленных территорий.

Уменьшение скорости разложения органических веществ в направлении с юга на север проявляется не только в почвах, но и в поверхностных водах. Чем больше взвешенных и растворенных органических веществ в речных водах, тем больше окисляемость вод. Она изменяется от 2—3 мг растворенного кислорода в литре в пустынях и степях до 5—10 — в лесостепной зоне и 15—20 — в тайге. В северной тайге на Европейской части СССР окисляемость речных вод максимальная, она составляет 20—30 мг растворенного кислорода в литре.

Так как величина годового слоя стока также увеличивается к северу, можно ожидать, что ландшафты северных территорий способны скорее «сбрасывать» в водоемы воднорастворимые и взвешенные органические загрязняющие вещества. Но именно это обстоятельство при малой скорости минерализации органических веществ в водных средах создает особую опасность загрязнения озер и рек.

В водах рек, принадлежащих бассейну Северного Ледовитого океана, создаются условия, способствующие наиболее длительному сохранению загрязняющих органических веществ. Бассейны этих рек представляют открытые ландшафтно-геохимические арены с конечным сбросом в северные моря, поэтому особенно велика опасность загрязнения эстуариев и дельт крупных водных артерий — Печоры, Оби, Енисея, Лены и др.

Реки, принадлежащие бассейну Балтийского моря (Нева, Даугава, Неман и др.), протекают в пределах одной ландшафтной зоны, поэтому нельзя ожидать существенной разницы в скорости минерализации органических загрязнителей в их истоках и устьях. Относительно северное положение побережий Балтики, замкнутость Финского и Рижского заливов создают опасность их загрязнения токсичными органическими веществами, выносимыми реками.

Часть органических взвесей оседает при половодьях на поймах рек, аккумулируется донными отложениями заводей и старичных озер. Все проточные озера и водохранилища также служат седиментационными барьерами, так как в их донных отложениях могут аккумулироваться токсичные техногенные вещества.

Реки, принадлежащие бассейнам Черного и Каспийского морей, которые текут с севера на юг, перемещают взвешенные и растворенные органические вещества в условия с более высокими температурами, благоприятствующими их разложению. Следовательно, в дельтах этих рек и в области шельфов опасность загрязнения меньше, чем на Севере. Исключение составляют те случаи, когда органические загрязнители сбрасывают непосредственно вблизи устьев рек, и они, не успев минерализоваться, выносятся в морские бассейны.

Опасность загрязнения грунтовых вод воднорастворимыми органическими токсичными веществами наибольшая в тех областях, где распространены водопроницаемые почвы и рыхлые отложения, а сумма годовых осадков превышает годовую норму испарения (коэффициент увлажнения больше 1). Подобная обстановка особенно характерна для песчаных равнин таежной и лесной зон. Локально грунтовые воды могут быть загрязнены и в тех областях, где коэффициент увлажнения меньше 1, а водный режим почв — непромывной. В этом случае загрязнение грунтовых вод обычно связано с проникновением сквозь толщу почв и наносов техногенных загрязненных вод. Например, в районах нефтедобычи Северного Прикаспия и близ нефтеперерабатывающих предприятий нефтяные воды, содержащие битумоиды, проникают до грунтовых вод и загрязняют последние.

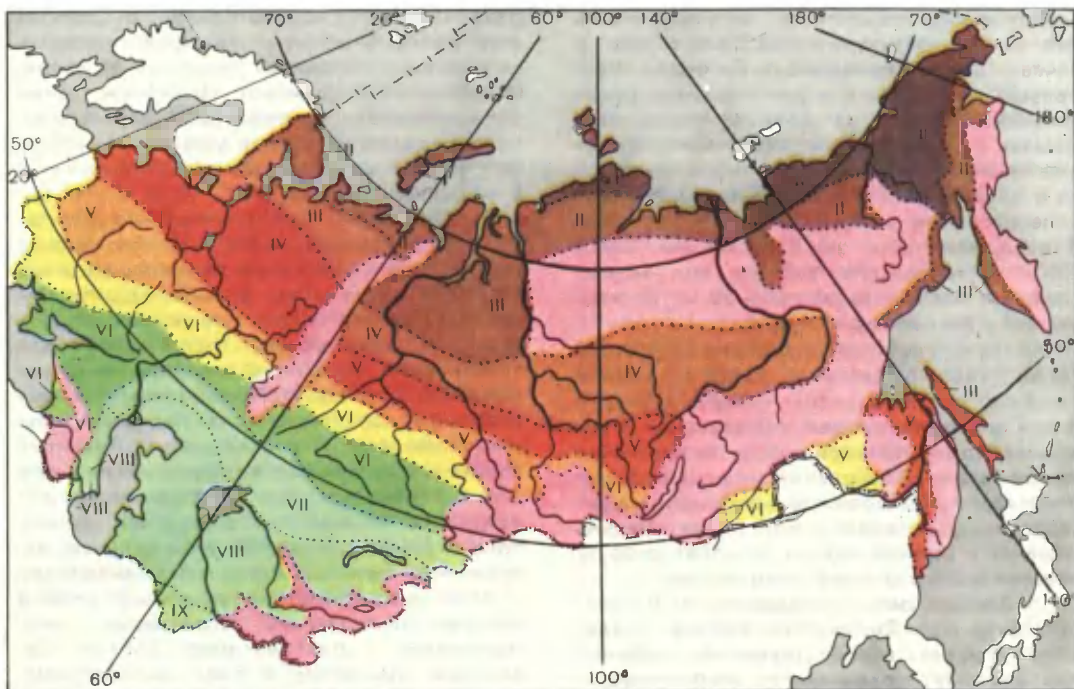
Большая опасность загрязнения грунтовых вод создается на орошаемых массивах, где поля усиленно обрабатываются пестицидами, а ирригационные воды выносят воднорастворимые стойкие пестициды и их метаболиты в грунтовый поток. Здесь разложение их идет медленнее, чем в почвах, так как температуры грунтовых вод значительно ниже, а микроорганизмов меньше.

Итак, условия самоочищения и риск загрязнения окружающей среды токсичными органическими веществами техногенного происхождения в различных ландшафтных зонах и областях СССР существенно различны. На территории СССР

можно выделить различающиеся по степени устойчивости к загрязнению органическими веществами регионы, названные нами технобиогеомами. В своем распространении они подчинены географическим закономерностям, что и позволило создать схему прогнозного районирования территории СССР по опасности загрязнения токсичными органическими техногенными веществами.

Так, например, если сопоставить размещение на территории СССР нефти и газопромыслов, а также районов, пер-

спективных для добычи нефти и газа, со схемой размещения технобиогеомов, то можно очертить территории с различной степенью опасности загрязнения окружающей среды нефтепродуктами. В настоящее время возникает опасность устойчивого загрязнения нефтепродуктами в Тимано-Печорском и в Западно-Сибирском бассейнах, где особенно неблагоприятны условия для разложения органических загрязнителей в почвах и водах. В северной части этих бассейнов, где ультрафиолетовая радиация меньше, опасность



Типы регионов с различной скоростью разложения органических загрязняющих веществ в атмосфере, в почвах, на поверхности водоемов. Скорость разложения зависит от величины ультрафиолетовой радиации ($\text{кВт} \cdot \text{час}/\text{м}^2$ в год) I— <100 ; II— $100-200$; III— $200-300$; IV— $300-400$; V— $400-500$; VI— $500-600$; VII— $600-700$; VIII— $700-800$; IX— >800 . Эта скорость может быть сопоставлена с изменением опадо-подстильного коэффициента (показано цветом).

Опадо-подстильный коэффициент

	> 50		1,6—5
	26—50		1—1,5
	16—25		0,8—0,9
	6—15		0,3—0,7



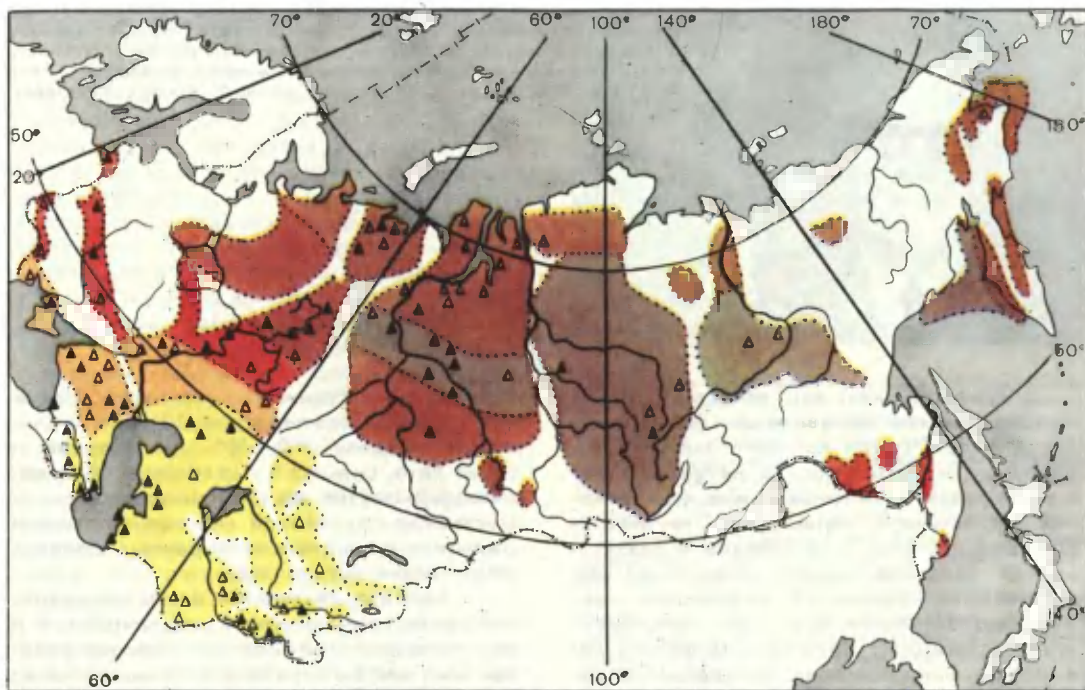
горные районы с резко изменяющейся скоростью разложения органических веществ в зависимости от высоты

загрязнения атмосферы наибольшая. На втором месте по опасности загрязнения почв, вод и особенно атмосферы (в связи с антициклональным режимом) стоят районы газо- и нефтепромыслов в Лено-Вилуйском и Алдано-Ленском бассейнах. В случае освоения новых нефтегазоносных бассейнов в Западной и Восточной Сибири также необходимо учитывать опасность загрязнения среды нефтепродуктами. К третьей группе по вероятности формирования устойчивых техногенных аномалий можно

отнести Прибалтийский, Припятский и Волго-Уральский (северная его часть) бассейны. К четвертой группе по уровню опасности загрязнения окружающей среды можно отнести районы нефте- и газодобычи в Карпатах и в Северочерноморском бассейне. К особой, пятой группе, с наименее стойкими техногенными аномалиями, можно отнести нефтегазоносные районы вблизи Каспийского и Аральского морей: Терско-Каспийский, южную часть Волго-Уральского, Мангышлакский, Устьюртский, Южно-Каспийский, Каракумский, Ферган-

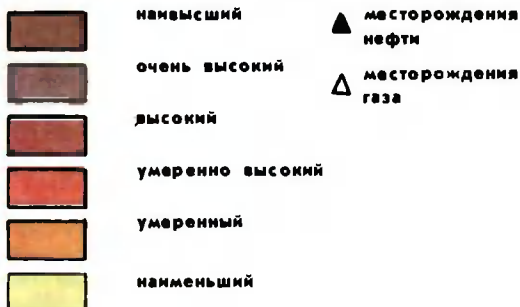
ский и Афгано-Таджикский. В этих районах опасность устойчивого загрязнения атмосферы, поверхности почв и водоемов по сравнению с названными ранее районами значительно меньше, хотя и здесь она достаточно высока.

К настоящему времени в результате совместной работы Института агрохимии и почвоведения АН СССР и кафедры геохимии ландшафтов и географии почв географического факультета МГУ проведено районирование Нечерноземной зоны Европейской части СССР и всей тер-



Районы нефте- и газодобычи с различными уровнями опасности загрязнения окружающей среды.

Уровни опасности загрязнения



ритории страны в целом по условиям детоксикации пестицидов с учетом доз и состава вносимых на поля пестицидов. Проводится изучение техногенных аномалий углеводородов и тяжелых металлов, связанных с автотранспортом, с влиянием промышленных центров и горнодобывающей промышленности, в различных природных ландшафтно-геохимических условиях.

Полученные материалы свидетельствуют, что выбор комплекса защитных мероприятий и определение предельных норм техногенной нагрузки должны быть основаны на анализе устойчивости природных ландшафтно-геохимических систем с учетом природных факторов самоочищения.

К сохранению редких растений и фитоценозов Дагестана

П. Л. Львов



Петр Леонтьевич Львов, кандидат биологических наук, профессор, заведующий кафедрой ботаники Дагестанского государственного университета им. В. И. Ленина, изучает лесную растительность Дагестана и закономерности ее распределения. Автор книг: *Леса Дагестана*. Махачкала, 1964; *Лес — наше богатство*. Махачкала, 1974.

Дагестан как бы является живым музеем, местом концентрации более трех тысяч видов, среди которых очень много полезных и интересных в научном отношении растений и уникальных фитоценозов реликтового характера. Они имеют большое научное, эстетическое и хозяйственное значение, однако многим из них грозит исчезновение. А между тем каждый биологический вид — это неповторимый эксперимент природы, хранитель генофонда и информации филогенетического развития. Его вымирание — невозместимая утрата. Особого внимания заслуживают дагестанские эндемики, некоторые редкие и реликтовые виды растений, находящиеся на границе своих ареалов или занимающие островное положение. Эти природные богатства являются народным достоянием, заслуживают внимания и строгой охраны.

Дагестанская АССР — самая южная республика Российской Федерации. Расположена она между Каспийским морем и Главным Кавказским хребтом. По характеру поверхности Дагестан делится на равнинную и горную части.

Равнинная часть тянется полосой вдоль побережья Каспийского моря, у подножья гор, на протяжении около 500 км в длину и от 3 до 40 км в ширину. Харак-

теризуется засушливым климатом. Средняя годовая температура 10—11°, количество осадков 200—480 мм. Жаркое и сухое лето, сильная испаряемость обуславливают развитие на низменности преимущественно пустынной и полупустынной растительности, только в речных долинах встречаются луга и леса.

Территория горной части подразделяется на внешнегорный, внутригорный и высокогорный геоморфологические районы. Они как бы ступенчато повышаются от Каспийского моря до вершин Большого Кавказского хребта и отличаются природными условиями.

Так, например, верхние предгорья (700—1500 м) сложены песчаниками и известняками; климат умеренно теплый, количество осадков колеблется от 360 мм в низких предгорьях до 600 мм в верхних. Растительный покров представлен аридными редколесьями, дубовыми и буковыми лесами, субальпийскими лугами с березовыми и дубовыми рощами.

Во внутригорном районе в северо-западной части хребты (800—3500 м) сложены известняками, а в юго-западной части — юрскими сланцами. Климат сухой, континентальный, осадков выпадает 300—650 мм. Растительность представлена нагорными ксерофитами, сосновыми и бере-

зовыми лесами, субальпийскими и альпийскими лугами.

В высокогорном районе (1500—4400 м) преобладают метаморфизированные сланцы; климат холодный и влажный, осадков 800—1000 мм. Это район альпийской, субальпийской, нагорно-ксерофильной и отчасти лесной растительности.

На сравнительно небольшой территории Дагестана (50,3 тыс. км²) насчитывается около 3000 видов высших растений. Богатство растительного покрова объясняется не только разнообразием климата, сильно расчлененным рельефом, географическим положением, но и историей формирования флоры.

Современные виды растений Дагестана формировались на протяжении многих геологических эпох как из местных кавказских (в том числе и дагестанских) видов, так и из видов других географических регионов. Так, в нагорном Дагестане среди ксерофитов преобладают виды дагестанского, средиземноморского и переднеазиатского типов ареала. Особенно много их в аридных котловинах. Распространены также среднеазиатские пустынные виды, встречающиеся на песках и засоленных почвах равнинного Дагестана. Видное место принадлежит северным элементам — преимущественно водным, луговым и лесным видам растений и европейским степным видам.

Больше всего во флоре Дагестана видов кавказского ареала; среди них выделяют центральнокавказские, северокавказские, дагестанские. Особый интерес представляют дагестанские эндемики.

По последним данным, в Дагестане насчитывается более 200 эндемичных видов (в то время как на Центральном Кавказе — 150, в Кабардино-Балкарии — 90, а в соседней Чечено-Ингушетии — всего 5 видов). Из эндемичных видов Дагестана наибольший интерес представляют прежде всего виды, которые можно считать палеоэндемиками третичного периода преимущественно известнякового района, например, солянка дагестанская, скабиоза гумбетовская, колокольчик андийский, ромашник Акинфиева, бурачок дагестанский, люцерна зеленоватая, астрагал дагестанский, астрагал щельный, копеечник дагестанский, нежник дагестанский, юринея Рупрехта.

Большинство эндемиков приурочено к нагорно-ксерофитной растительности внутригорного известнякового Дагестана, отличающегося большой сухостью климата. Эта растительность сложена ксерофитны-



Карта-схема Дагестана с редкими фитоценозами, нуждающимися в охране: 1 — водная флора Аграханского залива с реликтами: водяной орех гирканский, кушника белая, валлиснерия спиральная, сальвиния плавающая; 2 — торфяное болото, где доминирует сфагнум кшваррозум; 3 — березовые и сосновые рощи с рamiшней одиобоккой и другими бореальными элементами; 4 — уникальный Сарыкумский бархан с редкими эндемиками: василек Майорова, касатик остро-дольный, эремеспартон безлиственный, астрагал каракугинский; 5 — дубовые леса с узкими дагестанскими эндемиками: лук крупный, хохлатка таринская, астрагал кукурттавский; 6 — арчевые редколесья с плодод эндемиков: вьюнок Рупрехта, лупавка кустарничковая, катран бугорчатый, лавкой дагестанский, дубровник седой, ре-зеда шароплодная, гипсолюба головчатая; 7 — участки тиса на известняковых почвах; 8 — Бот-лихская аридная котловина с дагестанскими палео-эндемиками: ячмень дагестанский, юринея Руп-рехта, копеечник дагестанский, нежник дагестан-ский, скабиоза гумбетовская, колокольчик даге-станский; 9 — карахские сосняки с зеленомошны-ми группировками ассоциаций; 10 — окрестности Цудахара с узким эндемиком — ромашником Акинфиева; 11 — гунибская березовая роща с третичным реликтом и эндемиком Кавказа — березой Радде; 12 — буйняки с кисличкой и гру-шанкой; 13 — леса низовий Самура с гирканскими видами: лапина крылоплодная, плющ Пастухова — и редким эндемиком: нектароскордун трех-футовый.

ми травянистыми многолетниками нередко с древесными стеблями и примесью кустарников и полукустарников. Почти отсутствуют однолетники, луковичные и клубненосные растения. Особенно интересна флора Ботлихской аридной котловины. Расположена она по среднему течению Андийского Койсу в пределах высот 750—1300 м над ур. м. Этот район отличается наибольшей сухостью климата. Средняя годовая температура равна 9,9°, а количество осадков не превышает 375 мм. Здесь выявлено около 40 эндемичных (в том числе 8 палеоэндемиков) видов. Красиво цветут розовый нежник, копеечник со светло-пурпуровым венчиком, желтолепестная скабиоза гумбетовская, люцерна с бледно-желтым венчиком, колокольчик с нежно-голубыми лепестками и курчавка.

Научный интерес представляет нахождение в котловине галофитов (солелюбивых видов) Прикаспийской низменности (солянка древовидная и вересковидная, нитрария Шобера). Было бы целесообразно объявить Ботлихскую аридную котловину ботаническим памятником Дагестана.

Все эндемики нагорного Дагестана заслуживают охраны, так как они нигде (за немногими исключениями) больше не встречаются, а некоторые из них к тому же являются декоративными, эфиромасличными, кормовыми и другими полезными растениями.

В «Красную Книгу СССР» из дагестанских эндемиков нагорно-ксерофитной флоры вошел только эдрайнт Оверина. Из других редких видов в «Красную Книгу СССР» вошло около 40 видов, в том числе тис ягодный, лапина крылоплодная, медвежий орех, джузгун безлистный, касатик сетчатый, тюльпан Шренка, пион тонколистный.

Ромашник Акинфиева — узкий эндемик известнякового Дагестана, известен только в одном пункте в районе селения Цудахар по р. Казикуюхское Койсу. Растет на известняках на высоте 1000—1800 м над ур. м. Декоративное многолетнее растение, до 30 см высотой, с шелковистыми серыми листьями и с оранжево-желтыми язычковыми цветками, раскрывающимися в июне. Желательна организация заказника в этом месте, сбор и рассылка семян по ботаническим учреждениям и подсев их в районе распространения.

Эдрайнт Оверина — из семейства колокольчиковых. Образует густые дернины с жесткими линейными листьями, одиночными мелкими (около 1 см) цвет-



Крокус Адама — одно из редких ранневесенних растений Дагестана. В отдельные годы его синеватые цветки вместе с узкими листьями появляются уже в феврале среди кустарников.

Фото П. Л. Львова.

ками, раскрывающимися в июне. Встречается на известковых скалах на высоте 1000—1500 м, на Андийском хребте близ селения Чиркаты, на склонах хребта Салау и ниже селения Гимры по Аварскому Койсу.

В новое издание «Красной Книги СССР» следует включить и ряд других, не менее интересных эндемичных видов, находящихся под угрозой исчезновения (например, курчавку дагестанскую, жестер аварский, бурачок андийский, астрагал кукурттавский, хохлатку таркинскую, чабер мелкозубчатый).

В связи со сведением лесной и кустарниковой растительности, выпасом скота, освоением склонов гор под сельскохозяйственные угодья и карьеры по добыче стройматериалов, прокладкой новых дорог и усилением эрозионных процессов ареал ряда видов сокращается.

Следует отметить, что некоторые эндемики нагорно-ксерофитной расти-



Высокодекоративным растением является пушкиния пролеснивидная.

Фото А. А. Лепехиной.



Гмацинт.

Фото А. А. Лепехиной.

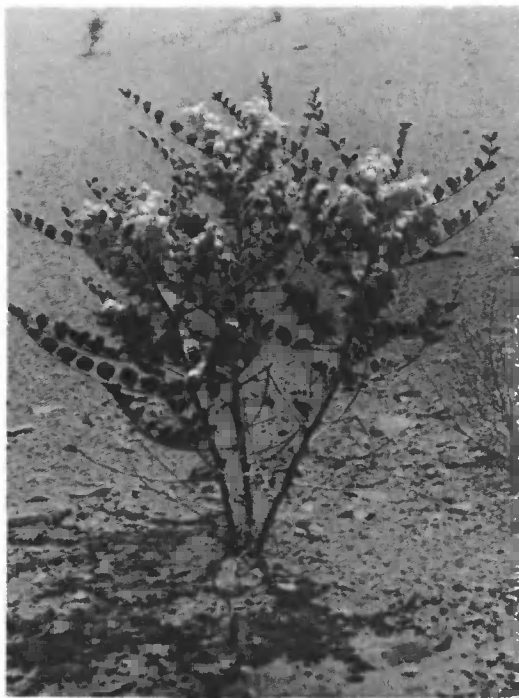
тельности недавно были найдены нами и в низких сухих предгорьях. Например, в районе курорта Талги сохранились небольшие рощи, группы и отдельные деревья можжевельника многоплодного. По мнению некоторых ученых, изучавших арчевые редколесья в Армении, Азербайджане, Грузии и Крыму, эти сообщества возникли в третичное время и являются истинно реликтовыми. Талгинские арчевники характеризуются разнообразием, пестротой и мозаичностью состава растительных группировок и ксерофитностью покрова. Тут выявлено около двадцати нагорно-ксерофитных эндемиков. Эти интересные редколесья, примыкающие к курорту Талги, необходимо оберегать от вырубки, выпаса и т. п.

Интерес представляет растительный покров окрестностей Махачкалы — места стыка степей, среднеазиатской полупустынной и кавказской лесной растительности, где представлен пестрый набор сооб-

ществ и флористических комплексов. Здесь сохранились леса и редколесья, образованные дубом скальным и пушистым, сосновые редколесья, заросли так называемого шибляка, скальная, степная и полупустынная растительность. Наблюдается некоторая общность лесной флоры горы Таркитау с флорой Закавказья, особенно Талыша, вследствие наличия общих видов: клена гирканского, лука парадоксального, ячменя луковичного, осоки листоколосой и многих других. Здесь сохранились также клен красивый, эндемичные виды: лук крупный, хохлатка таркинская, астрагал кукурттаевский и др.

Некоторым редким видам, реликтам и эндемикам окрестностей Махачкалы грозит истребление вследствие сведения лесов, застройки горы Таркитау и массовых для продажи сборов растений, особенно красиво цветущих ранней весной.

Одним из первых вестников весны является мерендера трехстолбиковая из



Астрагал Лемана с пузыревидными плодами.

Джузгун безлистный.

Фото П. Л. Львова.

семейства лилейных. Уже в конце января — начале февраля на поверхность земли выходят три листа и от одного до пяти нежных цветков со светло-розовыми лепестками, они цветут 20—25 дней, а если выпадает снег, то фаза цветения затягивается до апреля. Одновременно с мерендерой на опушках леса и травянистых склонах появляются узкие листья с белой полоской посредине и лиловые цветки шафрана Адама. Сине-голубыми соцветиями цветет пролеска, бело-розовыми или чисто розовыми цветками — первоцвет Воронова и хохлатка таркинская — виды, недавно открытые Я. И. Прохановым. В районе Махачкалы, на горе Таркитау, в дубовых и дубово-грабовых лесах и среди кустарников можно встретить декоративное луковичное растение — лук крупный. Этот вид был открыт и описан В. И. Липским в 1891 г. Стебли его достигают около 1 м высоты, несут 2—4 ремневидных листа до 25 см длины. В конце апреля на вершине стебля появляется шаровидное соцветие в виде зонтика с многочисленными бело-розовыми лепестками и лиловыми жилками.

Весьма интересным памятником природы является Сарыкумский бархан, расположенный на левом берегу реки

Шура-Озень у железнодорожной станции Кумторкала. По своей величине бархан является уникальным не только в СССР, но и во всей Азии — его относительная высота 213 м. Бархан представляет собой как бы оторванную окраину древних среднеазиатских пустынь. Здесь был открыт редкостный оазис флоры сыпучих песков, свойственных Средней Азии.

На подвижных песках бархана обычным растением является джузгун безлистный — «детище песчаных пустынь». Это кустарник с красной или пурпурно-бурой корой и мелкими в виде чешуй листьями, рано опадающими. В мае появляются розовые цветки, а затем шаровидные плоды с крыльями. У джузгуна могут образовываться корни до 30 м длины, покрытые пробковой тканью, которая защищает их от высыхания, если они будут обнажены, и от механических повреждений при трении о песок.

Хорошо растет здесь также одно из интереснейших растений бархана, корнеотпрысковый кустарник — эremosпартон безлистный. На его обнаженных корнях возникают почки, а из них — корневые отпрыски, способные укореняться в дождливое время. Его прутьевидные серо-белые стебли до 2 м высоты с многочислен-



ными тонкими зелеными безлистными веточками, направленными вверх, напоминают метелку. Цветки красно-фиолетовые, мелкие.

Характерная особенность песколюбивых растений бархана — приспособление к распространению плодов: разрастание чашечки цветов в шары, которые перекатываются по песку на большие расстояния, наличие у плодов (джузгун, эремоспартон, астрагал и др.) крыльев, летучек. Так, у астрагала Лемана плоды заключены во вздутые шаровидные белого цвета мешочки, развивающиеся из чашечки. Астрагал Лемана встречается редко. Растение достигает 70 см высоты. Пучки бледно-желтых цветков образуют длинное цилиндрическое соцветие. Вздутые плодики, покрытые шелковистыми волосками, имеются также у астрагала каракугинского — эндемика туранского происхождения. Это полукустарник с тонкими, прутьевидными серебристыми стеблями и фиолетовыми цветками. Сарыкумский бархан как уникальный памятник природы должен стать заповедником.

На юге Дагестана, в низовьях р. Самур, находится замечательный уголок природы — низинные леса, отличающиеся богатством видового состава деревьев, ку-

старников и лиан. Здесь древесные породы достигают гигантских размеров, многие из них относятся к редким эндемичным и реликтовым видам. Одних только деревьев и кустарников в этих лесах насчитывается около 70 видов; среди них — лапина крылоплодная, ольха бородатая, клен красивый, более 15 видов лиан. По опушкам и на вырубках непроходимые заросли из длинных шиповатых побегов сассапарили высокого, ежевики. В глубине тенистого леса стволы дубов обвивают побеги плюща Пастухова с многочисленными придаточными корнями и вечнозелеными листьями, или по ветвям высоко взбираются канатовидные стебли лесного винограда и обвойника. К ним присоединяются лозы.

Местами можно встретить лиановидную жимолость — каприфоль с крупными розовыми душистыми цветками, хмель, спаржу мутовчатую и изредка — паслен персидский и марену грузинскую. Лианы нередко сильно переплетаются своими стеблями, делают лес непроходимым и придают ему экзотический вид.

Из очень редких и эндемичных видов, вошедших в «Красную Книгу СССР», здесь встречаются нектароскордум трех-

футовый, касатик сетчатый, пыльцеголовник красный и длиннолистный.

Особого внимания заслуживает нектароскордум трехфутовый. Классическим местонахождением этого очень редкого эндемичного вида является р. Истису в Даралагезе (Нахичеванская АССР). Недавно этот вид обнаружен нами в дельте Самура, в грабово-ясеневом лесу, в 1,5 км от берега Каспийского моря. Здесь под пологом древесно-кустарникового яруса, сложенного грабом обыкновенным, ясенем, бородастой ольхой, а из лиан — плющом Пастухова и виноградом лесным, на лесной коричневой почве были обнаружены цветущие в начале мая великолепные растения нектароскордума, высотой 80—100 см, с многочисленными беловатыми цветками. Так как в Дагестане нектароскордум встречается на весьма ограниченной территории, равной примерно одному гектару, и произрастает в иных экологических условиях, чем в Нахичеванской АССР, то необходимо принять меры к сохранению участка леса с этим очень редким видом растения.

По берегу Самура встречаются единичные экземпляры лапины крылоплодной, которая также нуждается в охране.

Дагестанское побережье Каспийского моря (Махачкала — низовья Самура) является курортной зоной; в связи с этим резко возрастает рекреационная нагрузка на растительный покров, и особенно на леса Самура. Поэтому следует взять эти леса под охрану в качестве природных резерватов и своеобразных эталонов, необходимых при создании культурных ландшафтов.

В низовьях Самура следует выделить, во-первых, заповедную зону в целях сохранения генофонда богатой флоры (лапина, плющ Пастухова, нектароскордум), во-вторых, экспозиционную зону для организованного посещения, показа и пропаганды редких видов.

Давно привлекает внимание ботаников гунибская березовая роща, расположенная в центральной части горного Дагестана. Известковое плато имеет два склона. Северный — покрыт преимущественно березовым лесом с преобладанием березы Литвинова и более редкой, эндемичной для центрального и Восточного Кавказа березой Радде, впервые найденной в Гунибе (здесь же она отличается большим разнообразием форм). На южных склонах преобладает нагорно-ксерофитная растительность (много эндемиков). Еще в 1913 г. ботаник Н. И. Кузнецов писал, что он запретил бы всякую рубку леса на



Подснежник кавказский.

Фото А. А. Лепехиной.

Верхнем Гунибе, всякую пастьбу скота здесь, сенокосы и сделал бы грандиозный национальный парк, интересный для нас и как памятник природы, и еще больше, пожалуй, как исторический памятник...

За последние годы в результате геоботанических и флористических исследований было выявлено много новых видов флоры Дагестана. Некоторые из них — белладонна (красавка) кавказская, телекия прекрасная, тайник сердцелистный, шалфей поникший, молочай длиннорогий, колокольчик бледноохристый, миндаль низкий, чубушник кавказский, периканта ярко-красная, молочай миндалевидный, водяной орех, или чилим, валлиснерия спиральная — встречаются редко и поэтому нуждаются в охране.

Некоторым же видам в пределах Дагестана угрожает полное исчезновение. Это, в первую очередь, относится к красиво цветущим видам, таким как тюльпан Шренка и тюльпан Эйхлера, шафран пре-



Чистяк.

Фото А. А. Лепехиной.



Птицемлечник.

Фото А. А. Лепехиной.

красный, безвременник великолепный, произрастающим на низменности и в предгорных районах; они уничтожаются из-за сбора для продажи. Другие виды (лапина и нектароскордум — в низовьях Самура; тис и многие эндемики, произрастающие на известняковой почве, плющ Пастухова — в Новолакском районе; бук, клены гирканский и красивый, рябина греческая, лук крупный, хохлатка таркинская — на горе Таркитау; эремоспартон безлистный, астрагал каракугинский и Лемана — на Сарыкумском бархане) находятся на грани уничтожения в связи с рубкой леса.

К сожалению, ни один редкий вид растений Дагестана не взят под защиту законом, как это предпринято в ряде республик и областей нашей страны.

Нарушение же естественного покрова в условиях горного Дагестана приводит к эрозии склонов гор и селевым потокам, к иссушению горных источников, обмелению рек, ухудшению климата и другим

нежелательным явлениям. Уничтоженные на крутых склонах гор естественные леса, степи, луга вместе с эндемиками и другими видами растений нельзя восстановить или создать заново. Поэтому в целях сохранения естественного генофонда, введения в культуру ряда полезных растений, предотвращения эрозионных процессов на горных склонах все редкие фитоценозы и слагающие их эндемичные, реликтовые и другие редкие виды растений подлежат тщательной охране.

Обитаемые подводные аппараты в морской геологии

Б. И. Васильев,
кандидат геолого-минералогических наук
Тихоокеанский океанологический
институт ДВНЦ АН СССР
Владивосток

Геологи, работающие на суше, не представляют себе, как можно без геологической основы эффективно вести поиски полезных ископаемых, составлять тектонические, прогнозные и другие карты, являющиеся производными от карты геологической. По-видимому, так должно быть и при изучении «земли под морем», т. е. морского и океанического дна. Однако в морской геологии пока дело обстоит иначе.

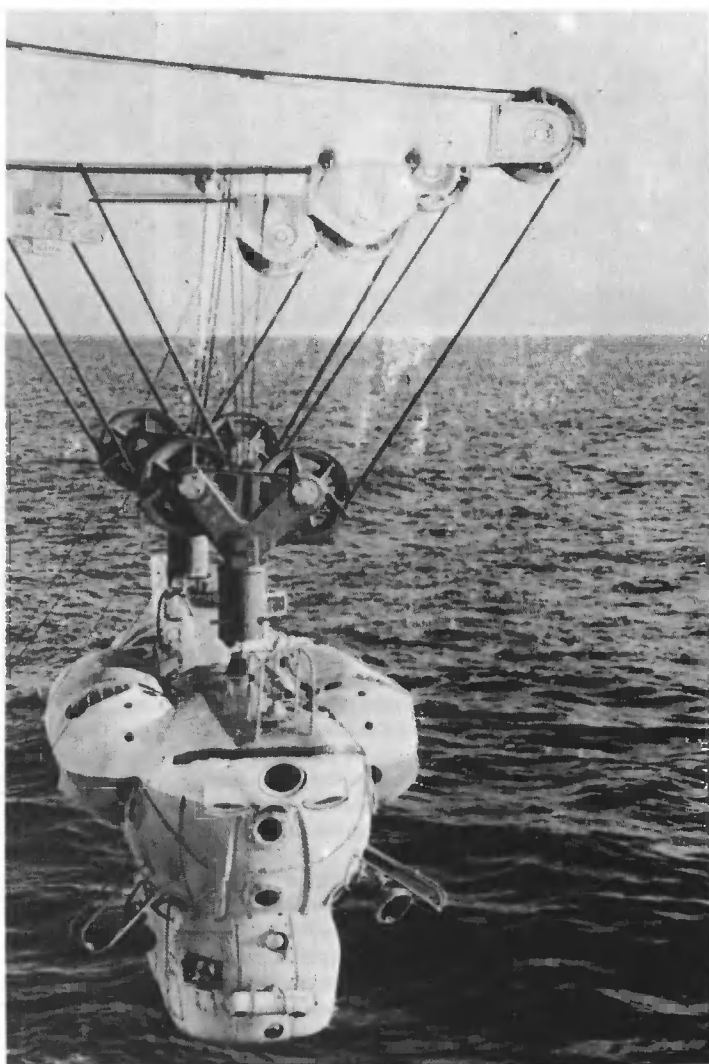
Большую часть информации о строении морского дна дают геофизические методы и, в первую очередь, сейсмопрофилирование. В небольших объемах, главным образом на мелководье, применяется бурение. А на долю собственно геологических методов приходится изучение колонок рыхлых осадков, извлеченных при помощи пробоотборников различных конструкций, и образцов коренных пород, поднятых драгами.

О драгировании известный американский морской геолог Г. Менард писал: «...сама идея драгирования абсурдна. Мы останавливаем судно над местом, где, по нашим расчетам, дно представ-

ляет ровную поверхность коренных пород. Затем опускаем в море драгу на стальном тросе толщиной в дюйм, а длиной с милю или около того и пытаемся разорвать породу, не разрывая троса... Лишь когда драга извлекается на поверхность, можно судить, насколько

ко успешными или безуспешными были наши старания»¹. Главный недостаток драгирования — невозможность получения образцов, привязанных

¹Менард Г. В неведомых глубинах океана. М., 1974.



Спуск аппарата «ТИНРО-2» (вид спереди). Цилиндрические захваты, спускающиеся на тросах с выдвижного моста, защелкиваются на подъемных штоках аппарата, после чего при помощи мощной лебедки аппарат спускается на воду.

Фото автора.

к определенной точке: поднятые драгой образцы могут быть оторваны на любом участке ее долгого, трудного пути по скалистому дну. Этот метод не дает информации об условиях залегания пород, а в ряде случаев по набору поднятых при драгировании образцов невозможно установить, какие из них оторваны от коренных, а какие принесены течениями, оползнями или льдами. Все приведенные особенности метода убеждают в том, что драгирование целесообразно применять лишь для рекогносцировочных и региональных исследований.

Что касается глубоководного морского бурения, то оно в силу сложности и высокой стоимости вряд ли в ближайшем будущем получит широкое распространение. Поэтому для детальных исследований морского дна следует, на наш взгляд, идти по пути использования специальных обитаемых подводных аппаратов. В настоящее время во всем мире их число превышает 150. Наибольшее количество аппаратов построено в США, ФРГ, Японии и Франции. Есть они и в нашей стране. Имеется уже и определенный опыт геологических исследований с их помощью.

Первыми автономными обитаемыми подводными аппаратами, применяемыми для научных целей, были батискафы. Самый первый из них — батискаф ФНРС-II, сконструированный и построенный в 1948 г. швейцарским ученым О. Пикаром, мог погружаться на несколько тысяч метров. Спустя пять лет Пикар построил свой знаменитый батискаф

«Триест», покоривший максимальную глубину Мирового океана в Марианском желобе — 11 000 метров! В этом же 1953 г. успешно прошел испытания франко-бельгийский собрат «Триеста» — «ФНРС-III». Сменивший его в 1961 г. батискаф «Архимед» погружался на дно Японского и Курило-Камчатского желобов на глубину 9600 м. Геологи, принимавшие участие в этих погружениях, получили много ценной информации².

²Уо Ж. 20 лет в батискафе. Л., 1976.

Однако батискафы не нашли широкого применения в связи с очень высокой стоимостью их эксплуатации, большими размерами (за счет поплавков с бензином), трудностью доставки в район работ и сложностью обслуживания. Для того чтобы обеспечить необходимую для погружения на большие глубины прочность, стенки корпуса приходилось делать толстыми. В результате вес батискафа значительно превышал его водоизмещение, и к нему привешивали поплавки с бензином. Для погружения на дно



Аппарат «ТИНРО-2» перед погружением (вид сверху). Для придания аппарату нулевой плавучести заполняются водой балластные цистерны. Дальнейшее погружение и всплытие аппарата осуществляется при помощи вертикальных винтов, помещенных в шахтах в передней части аппарата. В горизонтальном направлении аппарат движется за счет гребного винта, помещенного в поворотной насадке в хвостовой части аппарата.

Фото автора.

батискаф загружался балластом — чугунной дробью, который затем сбрасывался, а аппарат всплывал на поверхность. Создание новых сверхпрочных сортов стали, а также применение других материалов — титана, алюминия и стеклопластика — дало возможность строить принципиально новые, беспоплавковые аппараты, плавучесть которых обеспечивается за счет водоизмещения прочного корпуса. Это позволило значительно уменьшить габариты и вес аппаратов, устанавливать их на судах-носителях водоизмещением 1500—2500 т и даже перевозить самолетом.

Первенцем среди подводных аппаратов нового типа была «Дениза», или «ныряющее блюдо», Ж. Кусто. Этот аппарат, успешно испытанный в 1959 г. в Средиземном море, совершил около 500 (1) погружений. Дважды его арендовали ученые США для проведения комплексных подводных исследований, в том числе геологических.

С 1960 г. было начато массовое строительство таких подводных аппаратов, одновременно росла глубина их погружения и техническая оснащенность. В настоящее время имеются беспоплавковые аппараты, которые могут погружаться на глубину до 6000 м и производить на дне сложные работы.

В 1973—1974 гг. американские и французские геологи на уже упоминавшемся батискафе «Архимед» и подводных аппаратах «Алвин» и «Сиана» изучали участок рифтовой зоны Срединно-Атлантического хребта на глубине от 2500 до 3000 м к юго-западу от Азорских островов³. Эти исследования дали уникальный материал, качественно отличающийся от того, что был



Поверхность базальтового плато на глубине 200 м напоминает булыжную мостовую. Такие формы характерны для подводных излияний.

Фото автора.

получен ранее при изучении морского дна с надводных кораблей. В частности, было установлено, что рифтовая зона представляет собой грабен (ров) шириной около 2 км, высота бортов которого достигает 1000 м. В осевой части грабена иногда почти на 200 м возвышаются вулканы, днище его разбито трещинами, расширяющимися от оси грабена к бортам. Лавовые потоки имеют текстуры течения, подобно лавам наземных вулканов. Неожиданным оказалось отсутствие термальных аномалий. Согласно представлениям новой глобальной тектоники, в рифтовых зонах срединно-океанических желобов в результате конвекции происходит подъем сильно нагретого мантийного вещества, а следовательно должно наблюдаться повышение температуры вбли-

зи дна. Но на деле подобных повышений температуры не оказалось. Не было обнаружено и трансформных (поперечных к рифтовой зоне) разломов, существование которых также предсказано этой теорией.

В нашей стране первым автономным обитаемым аппаратом для научных исследований стал «ТИНРО-2», представляющий собой двухместную лодку⁴.

Через два года появился второй аппарат этого же типа, на котором автор вместе с конструктором М. И. Гирсом проводил геологические исследования в Атлантическом океане. Их целью была отработка методики и определение круга задач, которые можно решать с помощью подобных обитаемых аппаратов. Дело в том, что на «ТИНРО-2» нет манипулятора — это не позволяло

³ Ballard R. D., Bryant W. B., Heirtzler J. R., Keller Y., Moore J. Y., van Andel T. J. Manned submersible observations in the FAMOUS area: mid — Atlantic ridge. — «Science», 1975, v. 190 №4210.

⁴ Аронев М. П., Выхребенцев Б. В. «ТИНРО-2» исследует жизнь моря. — «Природа», 1975, № 1.



Трещины в базальтах, заполненные белым органогенным песком. Несмотря на значительную глубину (180 м) встречается довольно много морских ежей и горгонарий.

Фото автора.

отбирать образцы горных пород. Однако опыт показал, что и визуальные наблюдения дают очень ценную информацию.

Основным объектом исследований служила банка Дасия, расположенная в Атлантическом океане в 185 милях к юго-востоку от о-ва Мадейра. Банка представляет собой одиночную конусообразную подводную гору со срезанной вершиной и с минимальной глубиной 83 м. Диаметр горы на глубине 1000 м равен 18—20 км, а на глубине 200 м — 10—15 км. Крутизна склонов от 5—10 до 25—30°. Вершина горы представляет собой плато, полого наклоненное с востока на запад.

Перед началом работ мы произвели здесь драгирование, отбор проб донных осадков дночерпателем, эхо-

лотный промер и подводное фотографирование. При драгировании было поднято несколько мелких обломков туфопесчанника, а дночерпателем, в основном, был поднят белый органогенный песок. На фотографиях дно тоже выглядело песчаным. Создавалось впечатление, что поверхность банки покрыта песком, а что находится под ним — оставалось неизвестным. Этот вопрос удалось решить только при погружении на аппарате.

Поверхность банки, действительно, оказалась в значительной мере покрытой белым органогенно-детритусовым песком, слегка припорошенным серым илом. Благодаря высокой прозрачности воды, дно на глубине до 200 м просматривалось в полосе шириной 40—60 м. Пейзаж напоминал пустыню: длинные, узкие, гребневидные барханы, разделенные широкими ложбинами, отдельные камни и скалы, у которых с «подветренной» стороны образовались глубокие ниши. Длинные, изогнутые, ветвящиеся и пересе-

кающиеся борозды на поверхности песка разделены линзовидными грядами шириной от 0,5 до 2,5 м и высотой 10—40 см. Ширина борозд по дну 10—30 см; на их дне находится, как правило, более крупный материал — дрова, щебень, иногда мелкие глыбы, обломки раковин моллюсков и кораллов, которые хорошо различаются из аппарата. Местами в песке встречаются идеально правильные конические воронки диаметром от 0,3 до 3 м и глубиной от 0,2 до 1,5—2 м, по окружности которых насыпан валик-бруствер высотой до 30—40 см. Песок в воронках и на бруствере снежно-белый, свежий, в отличие от сероватого вокруг. Определить природу этих воронок не удалось.

Когда полоса песка кончилась, перед нами возник отвесный скалистый обрыв с нишами, карнизами и навесами. Медленно поднимаясь вверх, почти касаясь иллюминаторами скал, определяем по глубиномеру высоту обрыва — 26 м. Затем некоторое время движемся вдоль него, замеряя по компасу простирание обрыва (330—350°). Снова опускаемся вниз, замеряем толщину отдельных чередующихся пластов, видимо подушенных лав и туфов.

Поднимаемся на вершину обрыва и оказываемся на розовом каменном плато, напоминающем булыжную мостовую. Это, несомненно, шаровые лавы базальтов, в чем мы впоследствии убедились при повторном драгировании. Затем пересекаем еще несколько песчаных и каменистых полос, разделенных обрывами высотой от 5 до 20 м, и достигаем склона банки, круто спускающегося в недостижимые для нас глубины. Возвращаемся параллельным курсом, примерно в полумиле от первого галса. На каменистых участках ложимся на дно, фотографируем, записываем свои наблюдения на магнитофон и видеоманитофон. Через пять часов после начала погружения поднимаемся на поверхность: это норма работы гидронавтов под водой, труд которых врачи — физиологи и гигиенисты — определили как «средней тяжести



Трехместный подводный обитаемый аппарат «ОСА-3».

Фото А. П. Штырлева.

с высоким уровнем нервно-эмоциональной напряженности».

Собранные нами данные позволяют сделать вывод о том, что банка Дасия представляет собой не вулкан, как считалось раньше, а срезанную абразией вершину подводной горы, опустившуюся под уровень моря в конце плейстоцена (примерно 10—12 тыс. лет назад). Песок на поверхности банки и ее склонах образовался в результате разрушения в прибойной зоне остатков населявших ее ранее бентосных организмов — моллюсков, ко-

раллов и известковых водорослей. Погружение банки происходило быстро, в связи с чем пляжевые отложения на ней образоваться не успели. Этим же объясняется и отсутствие коралловой надстройки на ее вершине.

Приведенный пример показывает, что наблюдения из подводного аппарата позволяют получить качественно новую информацию. Но, пожалуй, самое главное достоинство аппаратов такого типа — это создаваемый ими «эффект присутствия», когда исследователь максимально приближен к объектам исследования, имеет возможность выбирать эти объекты по своему усмотрению, вести визуальное наблюдение и фотографирование. В общем, с помощью обитаемого аппарата геолог под водой может делать почти все, что он делает на суше.

Большие возможности открывает применение обитаемых подводных аппаратов для геофизических и гидрофизических исследований. С борта этих аппаратов можно проводить магнитометрические, сейсмические, гравиметрические и гидрофизические наблюдения на строго определенном расстоянии от дна независимо от его рельефа, а также в режимах дрейфа и зависания, что имеет очень важное значение при интерпретации материалов. Используя подводные аппараты, можно устанавливать донные сейсмографы и другие приборы, что довольно трудно делать с надводных кораблей.

Проведенные исследования позволяют считать обитаемые подводные аппараты перспективным и незаменимым средством изучения океана и дают основания надеяться, что у них большое будущее.

Рельеф дна океана и новая глобальная тектоника

А. В. Ильин



Александр Васильевич Ильин, доктор географических наук, старший научный сотрудник Акустического института им. Н. Н. Андреева АН СССР. Специалист в области морской геологии и геоморфологии. Автор монографии: Геоморфология дна Атлантического океана, М., 1976¹. В «Природе» опубликовал статьи: Рифтовая долина в Атлантическом океане (1961, № 3); Новейшие исследования дна Атлантического океана (1966, № 3).

В рельефе дна океана, как в зеркале, отражаются многие черты внутреннего строения земной коры. Крупные формы рельефа дна соизмеримы с толщиной земной коры и могут быть сопоставлены с ее структурой. Можно без преувеличения сказать, что история изучения подводного рельефа — это одновременно история развития современных представлений о происхождении дна океана. Именно с расширением знаний о подводной топографии связаны основные вехи становления новой глобальной тектоники — одной из распространенных концепций развития литосферы.

В 50-х годах нашего столетия выдающиеся морские геологи Г. Менард и Б. Хейзен открыли планетарную систему срединно-океанических хребтов, гигантским спрутом обнимающих земной шар. Вообще говоря, эти хребты были известны и ранее, но в середине нашего века прояснились многочисленные детали их строения. Важнейшим элементом открытия стала рифтовая долина — глубоководное

ущелье, рассекающее срединные хребты на две симметричные части. С рифтовыми долинами совпадают интенсивные аномалии магнитного поля Земли, аномалии силы тяжести, высокий тепловой поток и почти все землетрясения, когда-либо отмечавшиеся в центральных областях океана. Общая длина срединных хребтов составляет 60 тыс. км, а их площадь соизмерима с общей площадью материков.

Открытие рифтовой долины в сочетании с результатами геофизических исследований стало основой нового научного направления в геологии — концепции расширения дна океана. В разработке этого направления немалую роль сыграло изучение подводных гор с плоскими вершинами. Американский исследователь Г. Хесс объяснил происхождение этих гор погружением древних вулканических островов, вершины которых были срезаны волнами и течениями у поверхности океана. Он же отметил не известную ранее закономерность — увеличение глубины подводных гор с плоскими вершинами с удалением от некоего исходного пункта. Много лет спустя уже в 60-х годах идеи Хесса о постепенном погружении океанической земной коры в связи с горизонтальными движениями дна океана легли в основу новой глобальной тектоники.

¹В 1978 г. Географическое общество СССР присудило за эту работу Большую золотую медаль им. Литке, учрежденную Русским географическим обществом в 1873 г.

Определяющую роль в совершенствовании гипотезы расширения дна океана сыграло открытие поперечных разломов, перпендикулярных срединно-океаническим хребтам (которые впоследствии были названы трансформными). Это достижение морской геологии также связано с именами Менарда и Хейзена. Первый из них открыл разломы на дне Тихого океана, второй — в Атлантическом, Индийском и Северном Ледовитом океанах. В рельефе эти разломы выражены глубокими грабенами и желобами, разделяющими срединные хребты на отдельные блоки. Осева́я линия хребтов во многих местах смещена вдоль разломов на сотни километров.

В конце 60-х годов один из основоположников новой глобальной тектоники Л. Сайкс установил, что в разломах между смещенными осями срединных хребтов происходят тектонические сдвиги типа горизонтальных сбросов. При этом блоки земной коры по обе стороны от разлома движутся в противоположных направлениях.

Итак, в 60-х годах была определена структура срединно-океанических хребтов. Главные тектонические элементы этой структуры — продольные рифтовые разломы и перпендикулярные к ним поперечные разломы. Анализ этих разломов в масштабах всего Мирового океана позволил У. Моргану и К. Ле-Пишону связать происхождение срединных хребтов с единым глобальным процессом — вращением жестких сферических плит литосферы вокруг собственных полюсов. Подобное вращение обеспечивает раздвигание литосферных плит с последующим внедрением глубинного вещества мантии Земли в рифтовой долине, причем площадь новообразованной коры в масштабах всей рифтовой системы океанов возрастает ежегодно на 2—3 км². Направление движения плит совпадает с поперечными разломами срединных хребтов. Эти разломы наследуют «линии слабости» в земной коре, образовавшиеся еще до разрыва двух соседних плит. Главной силой, движущей плиты, принято считать конвекционные потоки в мантии, растаскивающие литосферу по кровле астеносферы в стороны от осей срединных хребтов.

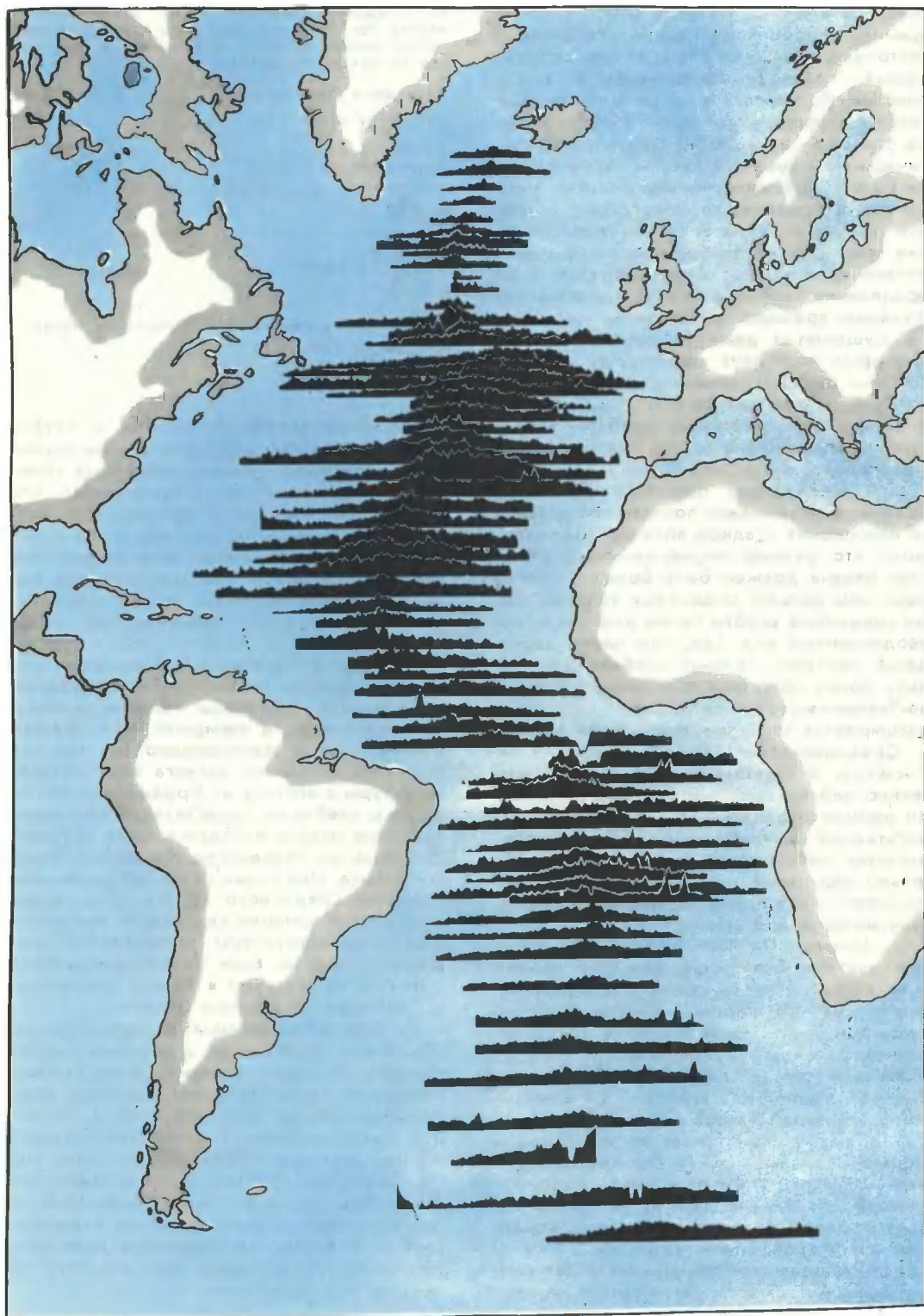
Впоследствии в пределах срединных хребтов были обнаружены магнитные аномалии, направленные вдоль осевых разломов, определен их возраст и на этой основе — темпы расширения дна океана.

В конечном итоге, магнитные аномалии были выявлены по всему Мировому океану вплоть до окраин континентов. Экстраполяция возраста земной коры по магнитным данным, в общем подтвержденная результатами глубоководного бурения на судне «Гломар Челленджер», позволила определить возраст океана в целом. Он оказался равен 180—200 млн лет. Этот вывод о сравнительно молодом возрасте океанов производит сильное впечатление, и новая глобальная тектоника с наиболее общих позиций представляется весьма эффективной.

Однако в настоящее время еще не совсем ясно, насколько дно океана во всей его сложности вписывается в рамки новой системы взглядов на развитие литосферы Земли. В данной статье мы не будем касаться всех аспектов комплексного геологического значения, из которых складывается концепция новой глобальной тектоники. Их слишком много. Останемся лишь на вопросах, связанных с изучением морфоструктуры дна океана, т. е. геологической его структуры, выраженной в рельефе.

В соответствии с гипотезой расширения дна застывшие массивы вулканических пород отодвигаются от оси хребтов, причем существенных изменений в новообразованной земной коре не происходит. Это важное условие новой глобальной тектоники, ибо любые деформации внутри плит могут вызвать отклонение от их расчетных орбит. Единственно допустимые процессы — остывание и кристаллизация глубинного вещества, вызывающие уплотнение материала и увеличение толщины плиты. При этом периферические части плиты движутся вниз. Поскольку других изменений не происходит, рельеф дна океана наследует первичную структуру лавовых потоков и глубинных интрузий, возникающих в осевой зоне срединных хребтов. Региональная форма самих хребтов с позиций новой глобальной тектоники создается за счет погружения плит по мере удаления от оси хребта. Примерно в области подножия срединных хребтов, время формирования которых соответствует 80—100 млн лет, погружение практически

Схематическое изображение рельефа Срединно-Атлантического хребта. Поперечный профиль хребта выглядит, как симметричный зубчатый свод с амплитудами рельефа от десятков до сотен метров. Рельеф хребта на всем протяжении однотипный.



сводится к нулю. Именно здесь, с точки зрения сторонников новой глобальной тектоники, проходит внешняя морфологическая граница срединно-океанических хребтов. По обе стороны от этой границы глубина поверхности земной коры океана, равная 5—6 км, стабилизируется. Океанические котловины с такими глубинами — наиболее древние участки земной коры океана. В пределах глубоководных котловин дальнейшее латеральное перемещение плит уже не приводит к погружению океанического дна. Таким образом, распределение глубин в океане представляет функцию времени расширения дна океана. Существует даже математическая зависимость этих двух величин, по которой глубина океана, начиная с уровня около 2500 м, соответствующего средней глубине гребней срединных хребтов, возрастает пропорционально $\sqrt{t}$, где t — время расширения дна в миллионах лет.

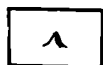
Следуя этому простому правилу и принимая во внимание постоянство процесса накопления осадков, логично предположить, что рельеф периферических областей океана должен быть более сглаженным, чем рельеф срединных хребтов. Сами срединные хребты также должны иметь неодинаковый вид. Там, где плиты расходятся быстрее, склоны хребтов должны быть более пологими и наоборот. Восточно-Тихоокеанское поднятие, например, расширяется со скоростью 10—14 см/год, а Срединно-Атлантический хребет — 1—2 см/год. В первом случае мы действительно наблюдаем пологие склоны и слабо расчлененный рельеф, во втором — относительно крутые склоны и более контрастную топографию. Ясно, что сравнительно медленное расхождение плит обеспечивает накопление больших объемов вулканического вещества.

Именно так расшифрованы с позиций тектоники литосферных плит основные этапы развития структуры океанического дна. Но верны ли установленные закономерности? Сохраняют ли унаследованное развитие периферические области океана, и соответствует ли региональная форма срединных хребтов выявленной математической закономерности?

Самый общий ответ на эти вопросы можно получить, изучая батиметрические карты. Даже на первый взгляд видно, что рельеф дна океана далеко не полностью соответствует теоретическим предпосылкам новой глобальной тектоники. В любом океане выделяются прежде всего две резко различные морфоструктурные зоны —

Крупнейшие подводные горы Атлантического океана. По своим размерам горы периферических частей океана близки к «пятитысячникам». Таких гор на срединных хребтах нет.

подводные горы высотой:



менее 2 км



от 2 до 4 км



выше 4 км



подводные горы с плоскими вершинами

срединно-океанические хребты и глубоководные котловины с подводными окраинами материков. Рельеф срединных хребтов на всем протяжении однотипный. Его следует рассматривать как результат единого тектонического процесса, сформировавшего рифтовую систему Земли. Поперечный профиль хребтов выглядит как симметричный зубчатый свод с амплитудами рельефа от десятков до сотен метров.

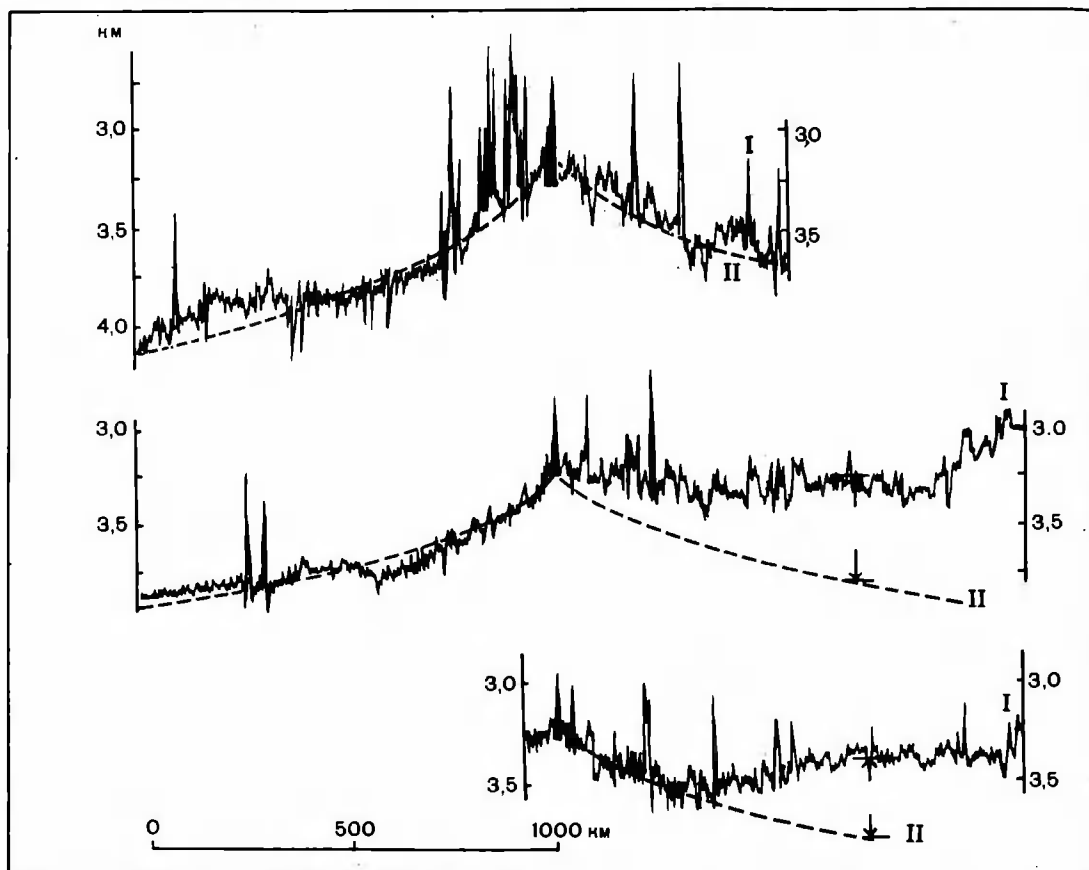
Полной противоположностью срединным хребтам являются глубоководные котловины и подводные окраины материков. Например, в западной части Северной Атлантики расположено Бермудское поднятие. Никакого аналога этой морфоструктуры к востоку от Срединно-Атлантического хребта не существует. В восточной половине океана находятся такие крупные поднятия, как Гвинейское, Канарское, Зеленого Мыса. Они также не имеют двойников западнее срединного хребта. Тем самым нарушается принцип симметрии океанической морфоструктуры относительно срединного хребта. Еще более контрастные различия существуют в Тихом, Индийском и Северном Ледовитом океанах.

Для сопоставления морфоструктуры срединных хребтов и окраинных частей океанов большой интерес представляют подводные горы. По своим размерам горы периферических областей океана близки к «пятитысячникам», т. е. их относительная высота достигает 4000—5000 м. Таких гор на срединных хребтах нет. Максимальные амплитуды рельефа там — 1000—1500 м. Мы не имеем в виду большие перепады глубин в зонах трансформных разломов, поскольку образование этих структур не связано с вулканизмом.



Итак, с одной стороны, отсутствие симметрии в морфоструктуре периферических частей океана противоречит идее унаследованного развития земной коры с удалением от осей срединных хребтов. Но, с другой стороны, океаническая кора действительно древнее в приматериковых областях, что соответствует идеям новой глобальной тектоники. Однако это противоречие кажущееся. Не следует лишь представлять, что рельеф дна, сформировавшийся на гребне срединного хребта, остается неизменным.

Рельеф дна изменяется уже в пределах самих срединно-океанических хребтов. Гребни хребтов, как известно, представляют собой совокупность прямолинейных форм — рифтовых вулканических гряд. На флангах ориентировка становится менее строгой. Переход от одного типа морфоструктуры к другому соответствует примерно той области хребта, которая сформировалась около 20 млн лет назад. С этой границей связано возрастание толщины донных отложений. Магнитные аномалии, которые были параллельны оси хребта,



Соотношение рельефа срединного хребта, полученного в результате эхолотирования, — I и кривой термальной контракции — II [Восточно-Тихоокеанское поднятие]. Превышение реального рельефа над теоретической кривой термальной контракции достигает иногда 50% [стрелками показан «избыток» земной коры]. Верхний профиль сделан на 7° ю. ш., средний — на экваторе, нижний — на 3° ю. ш. [По П. Лонсдейлу, 1977].

теряют здесь прямолинейную ориентировку. Меняется характер теплового потока. Смесь вулканических базальтов и донных осадков, свойственная центральной части хребта, на флангах сменяется массивными базальтовыми породами без заметных включений рыхлых отложений. Трудно объяснить указанные изменения с позиций новой глобальной тектоники, поскольку об унаследованности морфоструктуры в данном случае говорить не прихо-

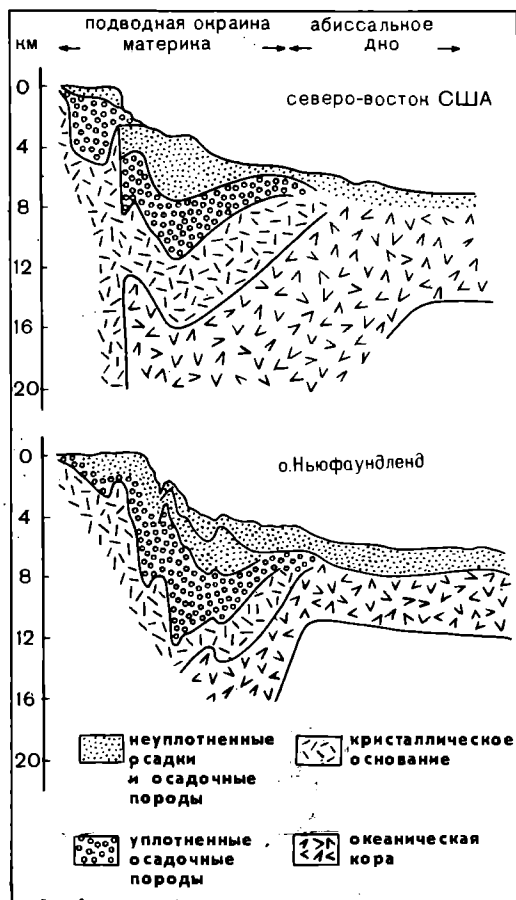
дится. Возникает сомнение в правильности исходных представлений новой глобальной тектоники, касающихся специфики тектонических процессов земной коры океанов.

Одна из основных теоретических предпосылок тектоники литосферных плит — постулат о жесткости этих плит. Вторая важная предпосылка — представление о «горячих точках» в мантии Земли². С помощью этой концепции сторонники плитовой тектоники пытаются объяснить аномальные черты океанической морфоструктуры. Они предполагают, что глыбовые и крупные вулканические хребты сформировались в ходе поступательного движения земной коры над мощными очагами вулканизма, длительное время действующими в мантии Земли.

Некоторые черты подводной топографии они объясняют с помощью гипотезы «перфорированной трубы», согласно которой материал частичного плавления мантии Земли находится неглубоко под осевыми частями срединных хребтов и может перетекать с более высокого гипсометрического уровня на более низкий. Например, от высокой «горячей точки» Исландии базальтовый материал течет к югу. Трансформный разлом Гиббса служит для потока преградой, и перед фронтом разлома возникает своеобразная запруда. Образовавшийся избыток вещества по мере горизонтального перемещения плит «растаскивается в стороны» и расходится на построение вулканических хребтов, параллельных зоне трансформного разлома. Так формируется подводный рельеф, в котором осевые рифтовые гряды и поперечные вулканические хребты сочленяются в виде буквы L. По мысли создателей гипотезы П. Вогта и Л. Джонсона, поток базальтового материала течет под гребнями срединных хребтов, как по трубе. Неглубокие трансформные разломы не могут противостоять потоку и под его напором деформируются. При этом образуется рельеф, напоминающий в плане скелет рыбы.

Теоретические разработки новой глобальной тектоники привлекают своей простотой и наглядностью. Тем не менее изучение современной морфоструктуры дна океана не позволяет признать выводы глобальной тектоники вполне корректными. Остановимся, например, на пред-

ставлении о «горячих точках». По своей природе с ними должны быть связаны вулканические формы рельефа симметричной формы. Мы же наблюдаем самые разнообразные, нередко асимметричные, формы. К ним относятся хребт Китовый, Рио-Гранде и Наска в Тихом океане и Восточно-Индийский хребт. Хребты и поднятия с подобным рельефом занимают около 10% площади дна Мирового океана. По своим геоморфологическим параметрам асимметричные океанические поднятия ближе всего к глыбовым структу-



Предматериковые прогибы в Атлантическом океане у восточного побережья Северной Америки. Подобные прогибы свидетельствуют об активизации тектонической жизни периферийных частей океана. [По Б. Хейзену, М. Юингу и М. Тарп, 1959.]

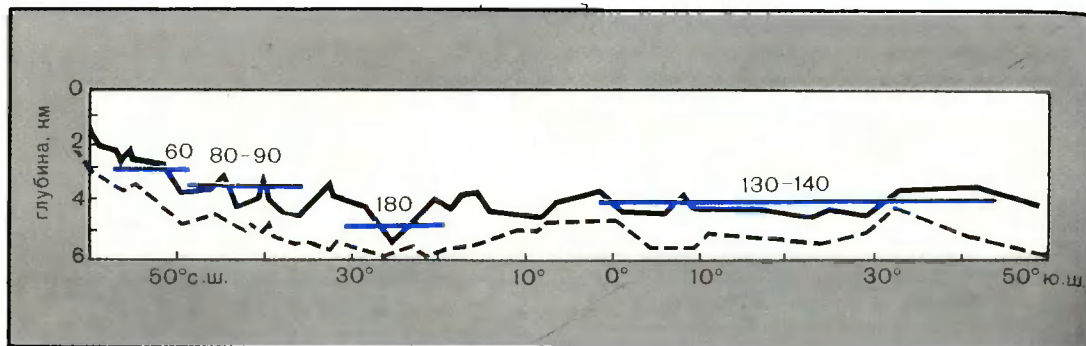
²Казьмин В. Г. «Горячие точки» Земли.— «Природа», 1977, № 7.

рам земной коры. Другими словами, их формирование могло быть связано с тектоническими движениями. Но если допустить вероятность подобных движений на дне океана, то можно подвергнуть сомнению тезис о жесткости литосферных плит и вращении плит по «расчетным» орбитам.

Это несоответствие усугубляется при анализе рельефа подводных гор. Тот факт, что размер гор увеличивается по периферии океанов, нельзя объяснить постепенным затуханием вулканизма, как

Морфология срединных хребтов часто не вписывается также в рамки гипотезы «перфорированной трубы». Например, к югу от Азорских о-вов течение расплавленного материала под гребнем хребта должно быть направлено от островов, а трансформные разломы ориентированы в противоположном направлении.

В оценке генезиса рельефа дна океана центральное место занимает гипотеза термальной контракции — уменьшения объема при остывании и кристаллизации глубинного вещества. Сущность гипотезы



Сопоставление средней глубины Срединно-Атлантического хребта (показано цветом) с возрастом отдельных областей Атлантического океана (млн лет). Средняя глубина рифтовых океанических хребтов (показаны сплошной линией) тем больше, чем древнее океанические котловины, в которых этот хребет находится. Глубина подножия Срединно-Атлантического хребта показана пунктиром.

это делают сторонники тектоники плит. Скорее, мы должны предположить нарастание со временем вулканических процессов, способных создавать грандиозные подводные горы и вулканические поднятия на окраинах океана. Вулканические образования в древней океанической коре возникли, по-видимому, за счет поступления мантийного вещества по трещинам, появившимся в ходе неравномерного движения отдельных частей литосферных плит. Поскольку толщина плит к окраинам континента возрастает в 5—10 раз по сравнению с толщиной осевых частей срединных хребтов, то и вулканизм, создающий крупные подводные горы и поднятия, должен быть более глубинным. Наиболее внушительные вулканические образования появились там, где глубинные трещины и разломы пересекаются, образуя в земной коре подвижные тектонические узлы.

заключается в том, что региональную форму срединных хребтов описывает вогнутая кривая, которую можно построить, исходя из предположений о темпах расширения дна океана. Такая кривая неплохо согласуется с региональной формой срединных хребтов, но сейчас появляется все больше данных, не позволяющих принимать эту гипотезу как общую закономерность. Например, для Срединно-Атлантического хребта в районе Азорских островов «избыток рельефа» над кривой термальной контракции достигает иногда 50% (по данным А. Лаутона). Такая точность оценки рельефа дна представляется довольно грубой. На Восточно-Тихоокеанском поднятии (по данным П. Лонсдейла) обнаружена резкая асимметрия его региональной формы, хотя расширение хребта происходит здесь симметрично. Это несоответствие формы хребта кривой термальной контракции сторонники плитовой тектоники объясняют повышенной плавучестью восточного фланга поднятия, расположенного над обширной «горячей точкой» Галапагосского района. Земная кора как бы всплывает над расплавленным веществом мантии Земли, образуя избыток массы, и соответственно рельефа, над кривой термальной контракции. Но при таком решении вопроса неясно, почему превышение рельефа характерно лишь

для восточного склона срединного хребта. Почему граница земной коры соответствует осевой линии Восточно-Тихоокеанского поднятия? При огромных размерах Галапагосской «горячей точки» едва ли в рельефе могут быть соблюдены подобные разграничения. Трудно поверить в исключительную избирательность вулканических процессов по отношению к морфологическим границам хребта. Более логично в данном случае связывать отличия в региональной форме флангов со столь же различными условиями их тектонического развития.

В последние годы было обнаружено, что средняя глубина рифтовых океанических хребтов тем больше, чем древнее возраст океанической котловины, в которой этот хребет находится³. Например, средний высотный уровень Срединно-Атлантического хребта наиболее низок в центральной части северной Атлантики, возраст которой равен 180—200 млн лет. Самое высокое положение среднего высотного уровня хребта Рейкьянес отвечает наиболее молодому возрасту этой части океана — 60 млн лет.

Сопоставление батиметрических уровней срединных хребтов с возрастом океанических котловин вызывает ряд новых вопросов. Как быть, например, с тематической зависимостью глубины океана от темпов расширения океанического дна? Напомним, что при определении величины погружения океанического дна с позиций указанной закономерности отсчет принято вести от глубины около 2500 м, которая якобы и характеризует средний уровень гребней срединно-океанических хребтов. Но мы уже видели, что гребень хребта Рейкьянес, например, лежит на глубинах менее 2000 м, а на широтах 20—25° с. ш. он опускается до 4000 м.

Не менее важно отметить следующее обстоятельство. Если гребни срединных хребтов, имеющие одинаковый геологический возраст (~10 млн лет), находятся на разных батиметрических уровнях, значит, помимо собственно рифтовых процессов, связанных с тектоникой литосферных плит, существует более общий геотектонический процесс, управляющий развитием дна океана. Этот процесс ведет к непрерывному углублению океанических

впадин, а расширение дна океана является вторичным процессом, осложняющим общую геотектоническую обстановку. При этом возникновение срединных хребтов представляется закономерной компенсацией непрекращающегося погружения земной коры и мантии Земли под океаном. Следовательно, речь должна идти о тектоническом поднятии срединных хребтов, в отличие от представлений новой глобальной тектоники, по которым региональная форма срединных хребтов образуется в результате нисходящих движений земной коры океана по обе стороны от их осей. Именно восходящие тектонические движения лучше всего объясняют сводовую форму срединно-океанических хребтов.

Сопоставив реальную морфоструктуру дна океана с общими положениями новой глобальной тектоники, мы выявили существенные противоречия. Эти противоречия можно сгладить, если в схему тектонических процессов новой глобальной тектоники ввести некоторые новые элементы. Одним из таких дополнений, на наш взгляд, может послужить представление о тектонической подвижности внутренних частей литосферных плит. Действительно, резкое обособление срединных хребтов от остальной морфоструктуры дна океана можно связать лишь с действием различных тектонических факторов и магматизма. В зоне гребней срединных хребтов морфоструктура создается за счет нормальных сбросов, что находит выражение в сбросовых структурах — грабенах, рифтовых вулканических грядках, трещинах. Всем им свойственна строгая линейность. Линейно вдоль гребня хребта «выстраиваются» и резко очерченные магнитные аномалии. На флангах хребтов линейные формы рельефа сменяются случайно ориентированными, исчезают и строго ориентированные магнитные аномалии, т. е. на флангах мы наблюдаем своеобразный перекосящий структурных форм хребта.

Л. Сайкс, изучавший механизмы землетрясений, установил, что на гребнях сейсмотектонических напряжения направлены строго перпендикулярно к оси хребта. На флангах картина менее закономерна. Напряжения там могут быть ориентированы даже вдоль хребта. Следовательно, мы вправе говорить о смене тектонического режима земной коры на границе гребня и флангов срединного хребта. По предположению Сайкса, при переходе от гребней к флангам режим нормальных сбросов постепенно сменяется надвиго-

³Ильин А. В. Морфоструктура дна океана и некоторые вопросы новой глобальной тектоники. — «Геотектоника», 1978, № 6.

выми деформациями. Именно надвиги нарушают стройную картину морфоструктуры и магнитных аномалий.

В окраинных частях океана действуют тектонические факторы, создающие наиболее контрастную морфоструктуру. Здесь отмечены крупнейшие глыбовые и вулканические поднятия, глубокие структурные прогибы, наиболее высокие подводные горы. Асимметричная форма глыбовых поднятий вызвана тектоническими надвигами. Расположение глыбовых поднятий под углом к береговой линии наводит на мысль о сколовых движениях, возникающих в земной коре при взаимодействии океанической и материковой частей литосферных плит. Огромные горы на периферии океана — результат какого-то нового типа вулканизма, иного, чем на срединных хребтах. Этот вулканизм, более дискретный, но весьма мощный, приводит к формированию крупнейших подводных гор и вулканических поднятий.

По-видимому, литосферные плиты не становятся все более монолитными по мере их удаления от срединных хребтов. Напротив, в пределах плит возникают постоянные или периодические деформации, происходит — по терминологии А. В. Пейве — «скупивание и разрежение земной коры». Подобным движениям способствуют ослабленные зоны земной коры — трансформные разломы, разделяющие плиту на отдельные блоки.

Существует немало примеров недавних тектонических движений в земной коре океанов, сформированной значительно раньше. В миоцене, например, крупный участок океанической плиты к северо-востоку от о-вов Земного Мыса был поднят на 1000—1500 м. Для района о-ва Барбадос, также находящегося на окраине океанической плиты, были характерны тектонические движения в голоцене. Мощный вулканизм испытали окраинные части плит в районе Канарских о-вов, Гвинейского залива, о-вов Зеленого Мыса. По данным глубоководного бурения, возраст Канарских о-вов едва ли достигает одной десятой возраста земной коры, в пределах которой они сформировались.

Амплитуда интенсивных вертикальных движений, которые испытывают шельфы Мирового океана, только в голоцене достигает 100 м. В результате этих движений перед материками образуются глубокие тектонические прогибы. При этом сумма донных отложений у подножия материков зависит от глубины погребен-

ных трогов. Наибольшие толщи осадков характерны для восточной окраины Северной Америки, Мексиканского и Бенгальского заливов, где накапливаются продукты разрушения пород материков. Все эти факты трудно связать с представлениями новой глобальной тектоники о прочном соединении материковой и океанической частей литосферных плит и о затухании тектоно-магматических процессов с удалением от срединных хребтов.

Вопреки концепции унаследованного развития океанической морфоструктуры можно выделить, по крайней мере, три крупные тектонические зоны в пределах современных океанов. Первая из них соответствует гребням срединно-океанических хребтов. Это область интенсивных сбросовых движений и трещинного вулканизма. За пределами центральных частей хребта сбросовые движения уступают место деформациям надвигов. Наряду с трещинным вулканизмом появляются вулканы центрального типа, возникают мощные вулканические поднятия. На границе материков и океанов появляются контрастные морфоструктуры — глыбовые и глыбово-вулканические хребты, а также глубокие прогибы.

В результате наших исследований мы пришли к выводу, что развитие океанической морфоструктуры связано с возрастом земной коры. Чем древнее кора, тем контрастнее морфоструктура. Эволюция океанической морфоструктуры определяется зональностью тектонических процессов. Такой взгляд на формирование дна океана представляется более обоснованным, чем выводы новой глобальной тектоники, в которых почти полностью отсутствует идея развития морфоструктуры.



Ладожская нерпа — объект исследования

Д. Д. Тормосов, И. Е. Филатов



Дмитрий Дмитриевич Тормосов, кандидат биологических наук, исполняющий обязанности заведующего отделом биоресурсов открытой части Атлантического океана Атлантического научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии Министерства рыбного хозяйства СССР. Биолог, автор работ, посвященных различным аспектам биологии, экологии, распределения, численности, охраны и использования запасов морских млекопитающих.



Игорь Евгеньевич Филатов, старший инженер сектора по изучению морских млекопитающих того же института. Биолог, автор работ, посвященных ладожской нерпе.

В наше время плохо продуманное вторжение человека в природные сообщества ставит под угрозу существование многих животных. Особенно это остро касается тех видов, которые отличаются небольшим ареалом и малой численностью. хозяйственное использование таких животных требует постоянного наблюдения, изучения и соответствующих научно обоснованных рекомендаций.

Ладожская кольчатая нерпа (*Pusa hispida*) относится к семейству настоящих тюленей, является представителем пресно-

водных ластоногих млекопитающих, она внесена в «Красную Книгу СССР».

Крупнейшее в Европе Ладожское озеро — один из немногих пресноводных бассейнов земного шара, где обитает нерпа.

Существует несколько гипотез о возникновении Ладожского озера. Одна из них объясняет обитание в озере некоторых морских реликтов (6 видов рачков, четырехрогого бычка и нерпы): в аллередское время (более 12 тыс. лет назад) Белое море соединялось с Балтийским через Ладожское, Онежское озера и северную Карелию. Примерно 12 тыс. лет назад, когда океан отступил, связь с Белым морем прервалась и образовалось Иольдиево море.

Затем (примерно 8—9 тыс. лет назад) Ладожское озеро изолировалось от Иольдиева моря и от озера Сайма. Таким образом образовались три изолированные популяции кольчатой нерпы — балтийская, сайменская, ладожская — все берут свое начало от беломорской популяции.

Сведения о ладожской нерпе до последнего времени были очень отрывочными. 6 лет назад сотрудники Атлантического научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии Министерства рыбного хозяйства СССР (АтлантНИРО) начали программу комплексного ее изучения. Результаты проведенных исследований позволили уточнить и расширить представление о многих сторонах биологии, поведения, распределения этого вида.

Ладожская нерпа — относительно некрупное животное. Максимальная длина — 150 см, обычная — 120—140 см. Самцы немного крупнее самок. Для этого животного характерна высокая индивидуальная изменчивость как в размерах, так и в окраске тела. Взрослая нерпа обычно весит 40—60 кг. Наибольшей упитанности животные достигают к зиме. Иногда жир у самок достигает 50% от общего веса тела. Колебание количества жира зависит от сезонных колебаний затрат энергии и возможности их восполнения (выкармливание молодняка, линька, размножение, состояние кормовой базы, температурные условия и т. д.).

По своей окраске ладожская нерпа очень резко отличается от других представителей семейства тюленей. Прежде всего это выражается в общем темном фоне и в разных типах рисунков на спине и брюхе: то серебристо-серые кольца беспорядочно разбросаны, то они разорваны и сливаются в красивый узорчатый рисунок, то узор отсутствует и на темном фоне изредка встречаются светлые крапинки, то кольца на светлом фоне выражены слабо, на спине хорошо выражен темный ремень, а в различных частях тела встречаются темно-бурые пятна. Половых различий и возрастных изменений в окраске не обнаружено.

Как показали наши исследования, самки начинают рожать не раньше 6 лет, у самцов половая зрелость наступает в 6—7 лет. Предельный возраст ладожской нерпы пока не установлен, но наблюдения животных в возрасте 32—33 лет указывают на сравнительно высокую продолжительность жизни.

Для деторождения самки выбирают прочный лед берегового припая, где в торосистых заснеженных местах устраивают логова. Эти «квартиры» имеют довольно сложное строение. «Коридоры» соединяют несколько «комнат», в которых имеются лунки-лазы в воду. Одна из «комнат» большая, в ней обычно в конце февраля — марте и рождается нерпенок.

Детеныши рождаются в белом густом пушистом наряде. В этот период у новорожденных еще жировой прослойки нет, и пушистый мех предохраняет их от охлаждения. Весит новорожденный 4—5 кг. За период лактации, который длится 1,5—2 мес., детеныш достигает 90—95 см в длину и весит 20—25 кг. К этому времени он линяет и приобретает окраску взрослых животных.

Линька у ладожской нерпы растянута с начала апреля до июня. Характерно, что первыми начинают линять неполовозрелые животные, затем самцы и половозрелые самки, не участвующие в размножении. Кормящие самки линяют после периода лактации. Пик линьки — с середины апреля до середины мая. В это время на плавучих льдинах можно встретить по нескольку десятков линяющих зверей. Во время линьки они менее осторожны, в воду сходят неохотно и сравнительно близко подпускают к себе шлюпку или небольшое судно.

После таяния льдов (в мае — июне) основная масса животных устремляется к предустьевым участкам рек южного и юго-восточного побережья Ладоги, где в это время скапливается значительное количество рыбы. В июле с прогревом воды и отходом рыбы от берегов нерпа откочевывает севернее, в островную часть озера. В безветренные дни на островных лежбищах можно видеть 20—40, а иногда и до 100 животных.

Летом и осенью нерпа в спокойную погоду вечером подходит в район лежбищ. Обычно это скрытые или чуть-чуть возвышающиеся над водой каменные гряды недалеко от берегов или же отдельные каменные плиты (луды). За подходом нерпы наблюдать очень интересно, особенно если водная поверхность спокойна, как зеркало. Вдруг на этом зеркале появляется черный мяч — голова нерпы. Пробыв на поверхности несколько секунд, мяч исчезает, в стороне появляется другой, а то сразу несколько. Так, исчезая и появляясь на поверхности, черные мячи медленно приближаются к лежбищу. Зверь ведет себя чрезвычайно осторожно. С расстоя-



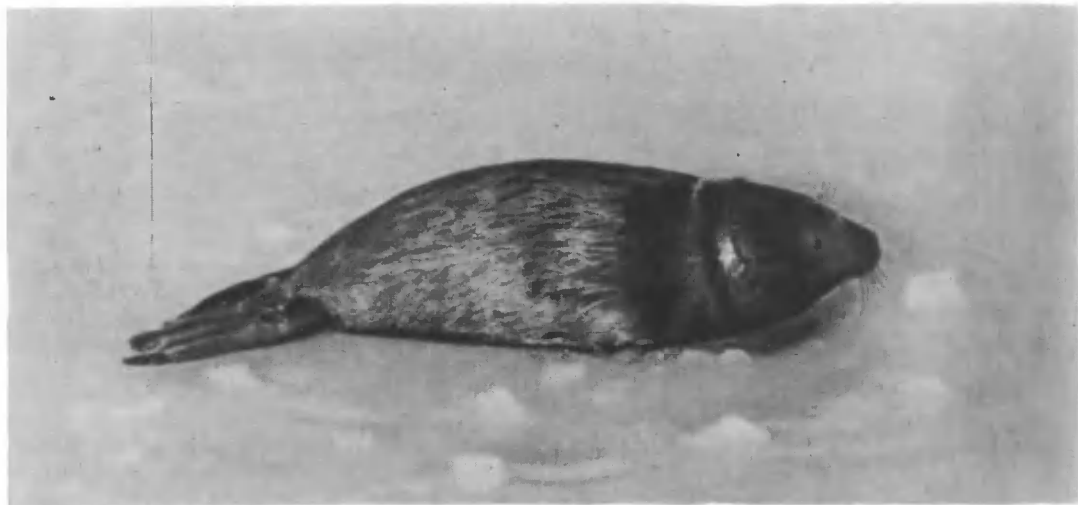
Голова ладожской нерпы.

ния 100—200 м нерпа уже кажется не черным мячом, а миниатюрным водолазом, по плечи высовывающимся из воды. Наконец, убедившись в безопасности, нерпа влезает на каменную плиту и лежит очень чутко.

Основное же время животные проводят в воде. Находясь вдали от берега,

нерпа ведет себя настолько смело, что, проявляя любопытство, высовывается из воды примерно в тридцати метрах от проходящей лодки.

В период ледостава, который начинается на Ладозе сначала в южной и юго-восточной части озера, нерпа перемещается в эти районы. Здесь лед толще и прочнее, чем в остальных районах. Здесь же на мелководье в это время концентрируется рыба.



Ладожская нерпа у лунки.

В холодные зимы, когда береговой припай занимает большую площадь, нерпа рассредоточивается, а мягкие зимы проводит в районах ледового припая, который относительно узкой полосой примыкает к береговой линии, причем неполовозрелые животные зимуют в большем удалении от берега и не так привязаны к ледовому припаю, как взрослые.

Сколько же нерпы в Ладожском озере? Сведения о численности ладожской нерпы очень разноречивы. Вопросы учета водных животных довольно сложны и предусматривают проведение целого комплекса работ с тем, чтобы оценка численности животных была более или менее объективной. Важно выбрать период года, время суток, погоду, когда зверь доступен для наблюдения и визуального учета с воздуха. Обычно эта работа проводится в апреле, когда лед еще не растаял, а ледовая уже под весенним солнцем разрушена. В тихую погоду нерпа выходит на лед — такой момент наиболее удобен для проведения учетных работ. При этом необходимо учитывать, какой процент зверей находится на льду и какой в воде. В зависимости от времени года, суток, погоды, по нашим наблюдениям, на Ладоге количество нерпы, выходящей на лед, может колебаться от 10 до 90%.

На Ладоге авиаучетные работы проводились в 1970—1972 и 1974 гг. Данные, полученные в 1974 г., подтверждают ре-

зультаты авиаучетных работ, проведенных ранее, и указывают на стабильное состояние численности — около 10—12 тыс. голов (на апрель).

Долгое время бытовало мнение, что нерпа наносит серьезный ущерб рыбному хозяйству. В книге «Валаам» можно прочитать: «Тюлень — прожорливый хищник, уничтожающий в день по несколько килограммов рыбы, причем поедает он не всякую рыбу, а предпочитает лосося»¹. Предпринимались попытки снизить численность нерпы как «вредного» хищника путем отстрела. За добычу нерпы выплачивалась премия. Рыбаки, охотники-любители, местное население считали своим долгом уничтожать нерпу любым способом. У отловленных нерп мы не раз встречали следы ружейных ран, обнаруживали дробь, застрявшую в шкуре, в костях черепа.

Наши данные показали, что в рационе питания нерпы насчитывается не более 10 видов рыб, в то время как в Ладожском озере насчитывается 58 видов. Нерпа питается в основном мелкими, наиболее многочисленными видами рыб — корюшкой, ряпушкой, ершом, налимом, колюшкой. При этом, поедая колюшку и ерша, нерпа в известной степени приносит пользу, так как эти виды уничтожают икру лососевых рыб.

Соотношение пищевых компонентов в рационе меняется по сезонам и районам. Так, например, окунь встречается в желудке нерпы только в южной части озера в

¹ Стромиллова Е. Н., Родионов Ю. В. Валаам. Петрозаводск, 1970.

марте — апреле, ерши, налимы — чаще весной и летом, минога — в сентябре в северной части озера, ряпушка — чаще осенью. Корюшку нерпа ест всюду и постоянно. Второстепенное значение в питании нерпы имеют четырехрогий бычок, трехиглая колюшка, лосось, сиг, а также миноги и ракообразные. Лососей и сегов в естественных условиях нерпа, очевидно, ловит в редких случаях. Вероятно, иногда добывает их из рыболовных сетей. Возвращаясь к теме о «вреде нерпы», следует заметить, что нерпа является верхним звеном в пирамиде трофических отношений в биоценозе озера, которые формировались в процессе длительного исторического становления. В результате сложилось сообщество, функциональная целостность которого определяется взаимосвязью каждой группы живых организмов, занимающих свое место в иерархии биоценоза. За год 10 тыс. нерп съедают около 5—7 тыс. т корюшки, что составляет незначительную долю из общей биомассы этого вида. Несмотря на то, что корюшка является основным объектом питания нерпы, запасы ее находятся в стабильном состоянии². Если же говорить о снижении запасов лососевых, то главную причину этого нужно усматривать в загрязнении нерестилищ лесосплавом и отходами целлюлозно-бумажной промышленности.

В довоенные годы в северной части озера добывалось до 1500 нерп в год. Добыча не лимитировалась, так как нерпа считалась «вредным хищником». В настоящее время положение изменилось. Рациональное использование всех ресурсов природы, в том числе и животного мира, все больше ставится под контроль человека. Для добычи ладожской нерпы, красивый мех которой пользуется высоким спросом, установлен ежегодный лимит добычи в 500 голов. Это ниже возможного уровня, что является определенной подстраховкой в сохранении стабильной численности популяции. Корректировка этого лимита будет осуществляться в дальнейшем на основе результатов исследований о воспроизводящих возможностях и биологии ладожской нерпы, которые мы надеемся получить в ближайшие годы. В настоящее время отлов нерпы ограничивается сроками и способами. Спортивная охота на нее запрещена, премия за добычу от-

менена. В последние годы пытались организовать отстрел нерп весной. Однако оказалось, что отстреливаются главным образом половозрелые животные (маточное поголовье), что может отрицательно сказаться на воспроизводстве. Кроме того, 30—40% зверей погибают от ран.

Учитывая это, мы предлагаем запретить отстрел нерп, заменив добычу ее сетями.

Задача предстоящих исследований сводится к выработке рекомендаций по рациональной эксплуатации этого зверя, к постоянному контролю за состоянием численности, к изучению реакции популяции на антропогенные факторы, роли и места нерпы в биоценозе озера, а в перспективе — и к разработке новых форм хозяйственного использования животных, вплоть до вольерного разведения.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Смирнов Н. А. ЛАДОЖСКАЯ НЕРПА. — В кн.: Очерк русских ластоногих, СПб., 1908.

Кулагин Н. М. ВОДНЫЕ ПРОМЫСЛОВЫЕ МЛЕКОПИТАЮЩИЕ СССР. М., 1929.

Огнев С. Н. ЗВЕРИ СССР И ПРИЛЕГАЮЩИХ СТРАН. Т. 3, М. — Л., 1935.

Ивашкин М. В., Попов Л. А., Цапко А. С. МОРСКИЕ МЛЕКОПИТАЮЩИЕ. М., 1972.

Тормосов Д. Д., Филатов И. Е. О ЧИСЛЕННОСТИ ЛАДОЖСКОЙ НЕРПЫ И РАЦИОНАЛЬНОМ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЕЕ ЗАПАСОВ. — В кн.: Редкие виды млекопитающих фауны СССР и их охрана. М., 1973.

Бычков В. А., Антонюк А. А. ЛАДОЖСКАЯ НЕРПА И ВОПРОСЫ ЕЕ ОХРАНЫ. — В кн.: Научные основы охраны природы. М., 1975.

Медведев Л. П. О СОВРЕМЕННОМ СОСТОЯНИИ ПОПУЛЯЦИИ ЛАДОЖСКОЙ НЕРПЫ. — В кн.: Редкие виды млекопитающих фауны СССР и их охрана. М., 1973.

Чапский К. К. КОЛЬЧАТАЯ НЕРПА. — В кн.: Млекопитающие фауны СССР. М. — Л., 1963.

² Архипцева Н. Т. Биология и состояние запасов корюшки в Ладожском озере. — В сб.: Биологические ресурсы (зоология) Ладожского озера. Л., 1968.

Космические исследования

Запуски космических аппаратов в СССР (ноябрь — декабрь 1978 г.)

В ноябре — декабре 1978 г. в Советском Союзе было запущено 25 космических аппаратов, в том числе 24 спутника серии «Космос» с научной аппаратурой, предназначенной для продолжения исследований космического пространства.

На новом спутнике связи «Горизонт» установлена усовершенствованная многоканальная ретрансляционная аппаратура, предназначенная для обеспечения телефонно-телеграфной радиосвязи и передачи телевизионных программ. С помощью «Горизонта» в 1980 г. планируется обеспечить трансляцию телевизионных передач с XXII Олимпийских игр. Кроме аппаратуры связи и телевидения на спутнике установлены трехкоор-

динатная система точной ориентации на Землю, система энергоснабжения с независимым наведением и слежением солнечных батарей за Солнцем, система терморегулирования, радиотелеметрическая система для передачи на Землю данных о работе бортового оборудования, радиосистема для точного измерения параметров орбиты и управления спутником, система коррекции орбиты.

На околоземной орбите продолжает функционировать научная станция «Салют-6», запущенная 29 сентября 1977 г. К 14 час московского времени 29 декабря 1978 г. станция совершила 7200 оборотов вокруг Земли, параметры ее орбиты составляли: высота в апогее 357 км, высота в перигее 337 км, наклонение 51,6°, период обращения 91,2 мин. После возвращения на Землю 2 ноября 1978 г. космонавтов В. В. Коваленка и А. С. Иванченкова станция «Салют-6» совершает полет в автоматическом режиме, в ходе которого прово-

дятся испытания отдельных бортовых систем, агрегатов и аппаратуры.

Таким образом, в 1978 г. в Советском Союзе было запущено 119 космических аппаратов, в том числе космические корабли «Союз-27, -28, -29, -30 и -31», четыре автоматических грузовых корабля «Прогресс», автоматические межпланетные станции «Венера-11 и -12», автоматическая станция «Прогноз-7», 96 спутников серии «Космос», восемь спутников связи, два радиолобительских спутника «Радио» и один спутник серии «Интеркосмос».

Космические исследования

«Интеркосмос-18»

24 октября 1978 г. в Советском Союзе произведен запуск спутника «Интеркосмос-18». Запущенный в соответствии с программой сотрудничества социалистических стран в области исследования и использования космического пространства в мирных целях, спутник был выведен на орбиту с высотой в перигее 407 км, в апогее — 768 км, наклонением 83° и периодом обращения 96,4 мин.

На борту спутника установлена научная и служебная аппаратура, созданная специалистами ВНР, ГДР, ПНР, СРР, СССР и ЧССР. В задачу комплексных исследований, являющихся составной частью программы «Международные исследования магнитосферы», входят: исследование магнитных полей токов, текущих из магнитосферы в ионосферу вдоль геомагнитных силовых линий; электрических полей, переносимых продольными токами, и магнитных полей полярных электроструй; исследование изменений электрон-

Космический аппарат	Дата запуска	Параметры начальной орбиты			
		перигей, км	апогей, км	наклонение, град	период обращения, мин
«Космос-1046»	1.XI	212	353	72,9	89,9
«Космос-1047»	15.XI	182	378	72,9	89,8
«Космос-1048»	17.XI	788	824	74	101
«Космос-1049»	21.XI	183	375	72,9	89,7
«Космос-1050»	28.XI	258	298	62,8	89,8
«Космосы 1051—1058»	5.XII	1451	1530	74	115,5
«Космос-1059»	7.XII	188	360	62,8	89,7
«Космос-1060»	8.XII	209	311	65	89,5
«Космос-1061»	14.XII	211	333	62,8	89,6
«Космос-1062»	15.XII	508	548	74	95,1
«Космос-1063»	19.XII	632	661	81,2	97,4
«Горизонт»	19.XII	22 581	48 365	11,3	1420
«Космос-1064»	20.XII	435	991	83	98,7
«Космос-1065»	23.XII	346	556	50,7	93,4
«Космос-1066»	23.XII	848	908	81,2	102,2
«Космос-1067»	26.XII	1148	1226	83	109,2
«Космос-1068»	26.XII	187	408	62,8	90,2
«Космос-1069»	28.XII	244	290	62,8	89,8

ной концентрации и температуры ионосферы над полярными областями Земли под воздействием потоков заряженных частиц, выпадающих из магнитосферы в верхнюю атмосферу Земли; изучение электромагнитных волн естественного происхождения и искусственных низкочастотных сигналов от наземных радиостанций.

На спутнике установлена следующая аппаратура:

- трехкоординатный магнитометр для измерения напряженности магнитного поля Земли (ИЗМИРАН СССР, АН СРР);

- электростатический анализатор заряженных частиц для измерения энергетического спектра и углового распределения электронов и протонов с энергиями в диапазоне 0,1—50 кэВ (НИИЯФ МГУ);

- низкочастотный анализатор для измерения трех компонентов электромагнитного поля в диапазоне частот 0,07—16 кГц (ИЗМИРАН СССР, Геофизический институт АН ЧССР);

- анализатор электрических параметров плазмы для измерения трех компонентов электрического поля в диапазоне частот 0—70 Гц (ИЗМИРАН СССР);

- прибор для определения температуры электронов в диапазоне 600—6000 К (Геофизический институт АН ЧССР, ИКИ АН СССР);

- цилиндрический и сферический зонды Ленгмюра для измерения плотности и температуры «холодных» электронов в плазме (Институт электроники АН ГДР);

- плоская ионная ловушка для измерения параметров ионосферной плазмы (Институт электроники АН ГДР);

- масс-спектрометр для измерения состава ионов в ионосфере (Геофизический институт АН ЧССР, ИКИ АН СССР).

На спутнике установлена также единая телеметрическая система, созданная специалистами ВНР, ГДР, ПНР, СССР и ЧССР и предназначенная для передачи научной информации непосредственно на наземные приемные станции стран-участниц эксперимента.

14 ноября 1978 г. от «Интеркосмоса-18» отделился чехословацкий малый научный спутник «Магион» массой около 15 кг. Цель совместного автономного полета спутников «Интеркосмос-18» и «Магион» — изучение пространственно-временной структуры низкочастотных электромагнитных полей в ионосферно-магнитосферной плазме методом синхронного измерения одних и тех же параметров в двух точках пространства, движущихся вдоль одной и той же орбиты (при постепенном расхождении спутников).

За исключением систем электропитания и терморегулирования, созданных советскими специалистами, спутник «Магион» целиком разработан чехословацкими специалистами из Геофизического института АН ЧССР и Института техники связи им. Попова объединения «ТЕСЛА». В состав научной аппаратуры «Магиона» входят приборы для измерения магнитной и электрической составляющих поля в диапазоне частот 0,04—16 кГц, для измерения электрического поля в диапазоне 0,01—80 Гц; блок приборов для измерения резонансных свойств плазмы на частотах до 10 кГц и прибор для регистрации потока электронов с энергиями выше 30 кэВ.

После отделения от спутника-носителя «Магион» и «Интеркосмос-18» начали медленно расходиться, и на расстояниях от нуля до ~1000 км проводились измерения с помощью идентичной, но независимо работающей аппаратуры. Благодаря такой постановке эксперимента впервые появилась возможность разделить пространственные изменения измеряемых параметров от временных.

осуществлен запуск автоматической станции «Прогноз-7», предназначенной для изучения солнечной активности и ее влияния на межпланетную среду и околоземное космическое пространство. Станция выведена на сильно вытянутую эллиптическую орбиту с высотой в апогее 202 965 км, высотой в перигее 483 км, наклонением 65° и начальным периодом обращения 98 ч 08 мин.

«Прогноз-7» продолжает исследования, начатые в 1972 г. станцией «Прогноз»; как и на шести предыдущих станциях этого типа, научная аппаратура на «Прогнозе-7» предназначена для исследований корпускулярного и электромагнитного излучений Солнца, потоков солнечной плазмы и магнитных полей в околоземном космическом пространстве. Кроме того, на станции «Прогноз-7» установлены приборы для исследования галактических ультрафиолетового, рентгеновского и гамма-излучений.

Большая часть научной аппаратуры на «Прогнозе-7» была разработана и изготовлена в Советском Союзе в рамках национальной программы космических исследований. Кроме того, на станции установлены приборы, созданные в СССР, ВНР, ЧССР, Франции и Швеции по программам международного сотрудничества в области исследования и использования космического пространства в мирных целях. К ним относятся:

- рентгеновский фотометр РФ-2П для изучения рентгеновского излучения Солнца в периоды вспышек в диапазоне энергий 2—100 кэВ (Астрономический институт АН ЧССР);

- комплект приборов «ПЛАЗМАГ» для исследования распределения потоков ионов солнечного ветра по энергиям (в диапазоне 0,1—20 кэВ) и по направлениям (ИКИ АН СССР, ИЗМИРАН СССР, Центральный институт физических исследований АН ВНР, Геофизический институт Словацкой АН, Карлов университет в Праге);

- прибор «Снег-2МП» для исследования рентгеновского и гамма-излучений в диапазоне энергий 20 кэВ — 3 МэВ

Космические исследования

«Прогноз-7»

30 октября 1978 г. в 8 ч 23 мин по московскому времени в Советском Союзе

(ИКИ АН СССР и Центр по изучению космических лучей в Тулузе);

● прибор «ЖЕМО-С2» для исследования корпускулярного излучения Солнца и частиц высоких энергий в верхней атмосфере и магнитосфере Земли, в частности для регистрации электронов (с энергиями в диапазоне 0,3—20 МэВ), протонов (2—500 МэВ) и α -частиц (30—75 МэВ) (ИКИ АН СССР и Центр ядерных исследований в Сакле, Франция);

● прибор «Галактика» для регистрации УФ-излучения в диапазоне длин волн 120—350 нм (КРАО АН СССР и Лаборатория космической астрономии в Марселе, Франция);

● масс-анализатор для изучения частиц высоких энергий в плазме магнитосферы Земли (ИКИ АН СССР и Геофизический институт в Кируне, Швеция).

С. А. Никитин
Москва

Космические исследования

Космический аппарат ISEE-3

12 августа 1978 г. в 15 ч 12 мин по гринвичскому времени с космодрома на м. Канаверал (США) с помощью ракеты-носителя «Торад-Дельта» был произведен запуск космического аппарата «ISEE-3», предназначенного для исследования солнечно-земных связей совместно со спутниками «ISEE-1 и -2», которые были залущены одной ракетой-носителем 22 октября 1977 г. «ISEE-3» должен быть выведен на эллиптическую гало-орбиту² вокруг одной из точек либрации

в системе Земля—Солнце на расстоянии 235 земных радиусов (~1,5 млн км) от Земли. После старта спутник был выведен на промежуточную орбиту с параметрами: высота в апогее 1 151 666 км, в перигее — 180 км, наклонение 28,8°, период обращения 73 702 мин. Окрестностей точки либрации аппарат достиг через 20 сут после старта, а через 105 сут после старта он должен выйти на расчетную орбиту вокруг этой точки.

«ISEE-3» имеет массу 470 кг и цилиндрический корпус диаметром 1,73 м и длиной 1,61 м; в полете аппарат стабилизируется вращением с угловой скоростью около 20 об/мин, ось вращения перпендикулярна к плоскости эклиптики.

С помощью научной аппаратуры спутника будут выполнены 12 экспериментов. Среди них:

● регистрация интенсивности и углового распределения потоков электронов в диапазонах 2—8, 10—1000 кэВ и измерение временных вариаций рентгеновских лучей (6—228 кэВ), возникающих при солнечных вспышках;

● изучение структуры межпланетной среды и теплового состояния межпланетной плазмы (регистрация протонов с энергиями 0,15—7 кэВ и электронов с энергиями 0,005—2,5 кэВ);

● определение изотопного состава космических лучей высоких энергий путем регистрации в их составе ядер химических элементов от водорода до железа;

● регистрация в окрестностях Земли космических лучей очень низких энергий, измерения магнитных полей и регистрация гамма-всплесков;

● определение содержания в солнечном ветре различных ионов;

● определение изотопного состава ядер солнечных и галактических космических лучей (2—200 МэВ/нуклон) и регистрация химических элементов от лития до никеля.

Расчетный период активного существования «ISEE-3» не менее 3 лет. Согласно последним сообщениям, бортовые

системы космического аппарата функционируют нормально.

«Interavia Air Letter», 1978, № 9068, p. 8 (Швейцария);
«Spacewarn Bulletin», 1978, SPX-298, p. 1, 9—11 (КОСПАР).

Планетология

Суточные изменения облаков Венеры

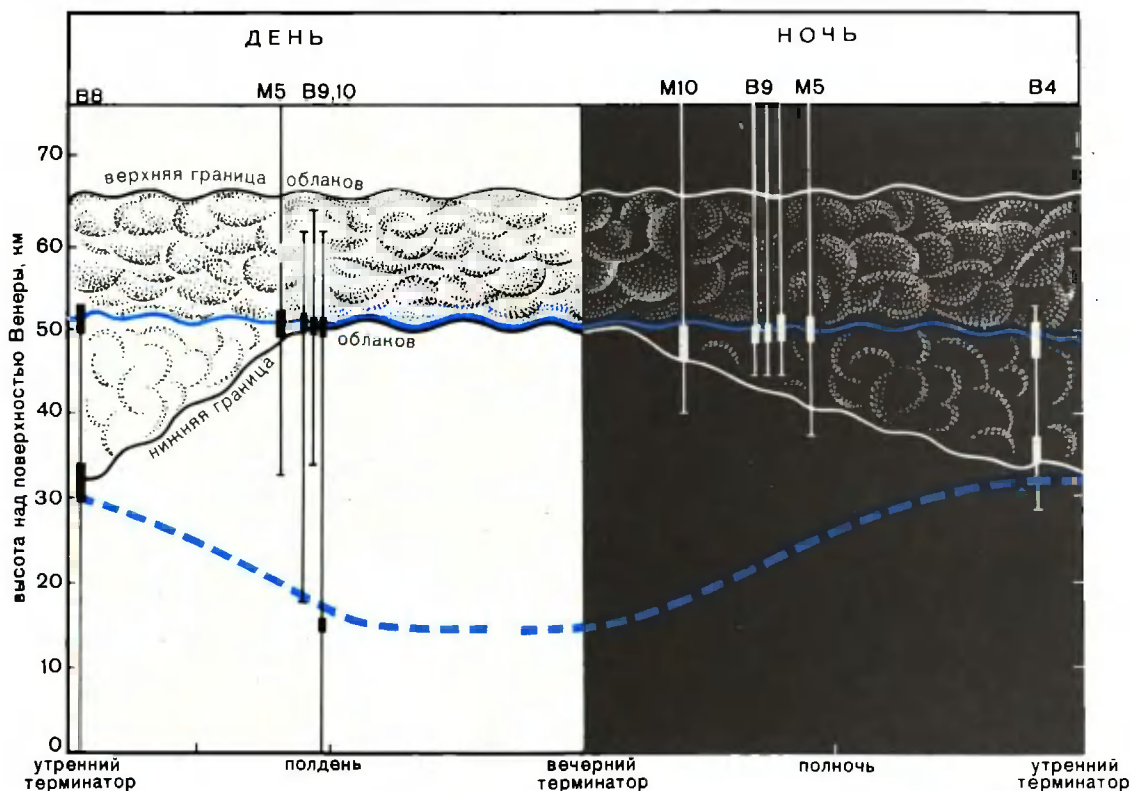
К. П. Флоренский, В. П. Волков и О. В. Николаева (Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского АН СССР), обобщив результаты измерений химического состава тропосферы Венеры и проведя термодинамический анализ равновесий газов в этой области, разработали геохимическую модель тропосферы Венеры.

Основные результаты экспериментов, проведенных станциями серии «Венера» и «Маринер», в строгой привязке к местному времени и высоте над поверхностью приведены на рисунке. Подтверждается выдвигавшееся и ранее предположение о том, что структура облачного слоя на дневной и ночной сторонах планеты различна¹. Кроме того, обнаружены значительные суточные изменения толшины облачного покрова Венеры. Верхний облачный слой, существующий круглые сутки, имеет в среднем толщину 16 км и располагается на высотах от 65—67 до 47—53 км. Он характеризуется фотохимическими процессами и содержит облака типа земной «дымки», состоящие из мелких капель концентрированной серной кислоты. Под этим слоем на рассвете существует нижний облачный слой, простирающийся до 30—36 км, который уже к полудню рассеивается. В этом слое протекают термохимические процессы.

¹ В. В. Михневич и др. — «Космические исследования», 1976, т. 14, с. 272—277.

² Подробнее о спутниках «ISEE-1 и -2» и общей программе исследований см.: — «Природа», 1978, № 5, с. 125.

³ Для наблюдателя, находящегося на Земле, это — круговая замкнутая орбита с центром в точке либрации.



Суточные изменения границ облачного покрова в приэкваториальном поясе Венеры. Тонкими вертикальными линиями отмечены высотные интервалы измерений, проведенных со станций «Венера-4, -8, -9, -10» (с орбиты) и «Маринер-5, -10» (зондирование радиолучом). Прямоугольниками обозначены скачкообразные изменения величин измеряемых параметров. Цветная линия — граница верхней и промежуточной геохимических зон; цветной пунктир — предполагаемая нижняя граница промежуточной геохимической зоны.

По данным «Венеры-9 и -10», видимость в верхнем слое вскоре после полудня — от 1 до 4 км, а ниже него — 20 км. Последняя величина по земным меркам соответствует хорошей видимости в ясный день. С наступлением венерианской ночи постепенно начинают формироваться облака нижнего слоя; к полуночи этот слой простирается до 37 км, а к рассвету — примерно до

33 км, достигая максимальной толщины в 17 км.

По мнению авторов, закономерность в изменении толщины облачного покрова есть результат изменения химического состава тропосферы в промежуточной зоне. Поступление продуктов фотохимических процессов происходит наиболее интенсивно в дневное время и приводит к исчезновению днем нижнего облачного слоя. Облака верхнего яруса (образующиеся в результате фотохимических процессов) должны состоять из достаточно окисленных веществ, а облака нижнего яруса (как продукты низкотемпературных химических превращений) — из достаточно восстановленных веществ. Следовательно, в промежуточной зоне тропосферы в течение суток неизбежно протекают окислительно-восстановительные реакции. Чем ближе к вечеру, тем ниже должно быть относительное содержание восстановленных микрокомпонентов тропосфе-

ры, таких как CO , H_2 , NH_3 , и, возможно, H_2S .

По-видимому, асимметричный характер суточных изменений толщины облаков нижнего яруса связан с меняющимся в течение суток соотношением между скоростями химических реакций и динамикой атмосферы. Используя геохимическую модель тропосферы Венеры, можно предположить, что в направлении от экватора к полюсам суточные изменения толщины облачного покрова должны становиться все менее отчетливыми.

«Icarus», 1978, v. 33, p. 537—553 (США).

Физика

Свойства Ω -гиперона

В ЦЕРНе (Женева, Швейцария) получены первые результаты исследования свойств Ω -гиперона. Эта редкая части-

ца была открыта в 1964 г., что явилось большим успехом модели классификации элементарных частиц, основанной на SU(3)-симметрии. Однако вплоть до 1978 г. на всех установках удалось наблюдать всего лишь около 160 Ω^- -гиперонов. Столь малочисленные данные приводили к большим ошибкам в определении времени жизни частицы и давали очень мало информации о каналах ее распада. Более или менее достоверно была известна только масса Ω^- -гиперона: $1672,2 \pm 0,4$ МэВ.

Существенный прогресс в изучении Ω^- -гиперона был достигнут в 1978 г. в экспериментах на протонном синхротроне ЦЕРНа. Пучок протонов, ускоренный до энергии 210 ГэВ, ударял в мишень, в результате рождался обильный поток гиперонов: на каждые $3 \cdot 10^{10}$ падающих протонов (в секунду) образовывалось около 4000 Σ^- , 400 Ξ^- и 0,1 Ω^- -гиперонов. Был получен столь интенсивный пучок Ω^- -гиперонов, что его можно было детектировать с помощью электронной аппаратуры, и кроме того, впервые эти частицы наблюдались в результате протонных столкновений. (Предыдущие эксперименты, в которых рождались Ω^- -гипероны, проводились в пузырьковых камерах с использованием мезонных пучков.) Всего в ЦЕРНе было зарегистрировано около 1700 случаев распада Ω^- -гиперона, т. е. получено десятикратное увеличение статистики.

Ω^- -гиперон может распадаться несколькими путями. В большинстве случаев ($67,0 \pm 2,2\%$) Ω^- распадается на Λ -гиперон и K^- -мезон. Угловое распределение продуктов распада Ω^- -гиперона описывается формулой

$$W(\theta) = 0,75 \sin^2 \theta (1 - \alpha \cos \theta),$$

где θ — угол вылета K^- -мезона относительно направления спина Ω^- . Отличие от нуля параметра асимметрии α означает несовпадение числа K^- -мезонов, вылетающих по и против направления спина Ω^- , что свидетельствует о нарушении четности в данном распаде.

Предыдущие измерения параметра асимметрии ($\alpha = -0,66_{-0,30}^{+0,36}$) содержали зна-

чительные ошибки и нуждались в уточнении. В новых экспериментах получено значение α , близкое к нулю: $0,06 \pm 0,14$. Таким образом, четность в этом процессе нарушается слабо, что согласуется с теоретическими предсказаниями, полученными на основе модели А. И. Вайнштейна, В. И. Захарова и М. А. Шифмана (ИТЭФ, Москва)¹.

Сейчас экспериментально измерены вероятности других главных каналов распада Ω^- -гиперона: на Ξ^0 , π^- ($24,6 \pm 1,9\%$) и Ξ^- , π^0 ($8,4 \pm 1,1\%$). Следующая отсюда величина отношения вероятностей этих распадов ($2,9 \pm 0,6$) согласуется с предсказаниями ($2,6-3,2$), сделанными на основе упоминавшейся выше модели.

Долгое время при теоретическом описании подобных отношений пользовались эмпирическим правилом отбора для изотопического спина частицы: $\Delta T = 1/2$. Согласно этому правилу, процессы с изменением T на $3/2$, $5/2$ и т. д. подавлены по сравнению с процессами, в которых изоспин меняется на $1/2$. Убедительного теоретического объяснения правило $\Delta T = 1/2$ не имело, хотя и подтверждалось многочисленными экспериментами. Однако применение его к распадам Ω^- -гиперона дает для отношения вероятностей процессов $\Omega^- \rightarrow \Xi^0, \pi^-$ и $\Omega^- \rightarrow \Xi^-, \pi^0$ величину, примерно равную 2,0, что явно противоречит данным ЦЕРНа. Это означает, что вклад процессов с $\Delta T = 3/2$ не является пренебрежимо малым. В модели московских физиков правило $\Delta T = 1/2$ возникает при учете динамики виртуальных сильных взаимодействий между кварками, так что степень нарушения этого правила зависит от сорта распадающихся частиц. Ранее А. И. Вайнштейном, В. И. Захаровым и М. А. Шифманом² было получено удовлетворительное описание нелептонных распадов других странных частиц: Λ , Σ , Ξ и K .

В экспериментах ЦЕРНа обнаружено также несколько

событий, возможно, соответствующих полуплептонному распаду Ω^- на Ξ^- -гиперон, электрон и антинейтрино. По предварительным результатам, полуплептонные процессы составляют около 1% всех распадов Ω^- .

Не было найдено ни одного примера распада $\Omega^- \rightarrow \Lambda, \pi^-$. В этом процессе странность меняется на 2 единицы, что, согласно теории, запрещено. Время жизни Ω^- , определенное по доминирующему распаду на Λ, K^- , равно $(0,82 \pm 0,06) \cdot 10^{-10}$ с.

Эксперимент в ЦЕРНе продолжается, и одна из его следующих задач — определить спин Ω^- -гиперона. SU(3)-симметрия предсказывает значение $3/2$, но в действительности спин Ω^- никогда точно не измерялся. Представляет интерес измерение параметров асимметрии в распадах Ω^- на $\Xi^- \pi^0$ и $\Xi^0 \pi^-$. Как и в случае процесса $\Omega^- \rightarrow \Lambda, K^-$, теория предсказывает сохранение четности.

«CERN Courier», 1978, v. 18, № 7/8, p. 257 (Швейцария).

Физика

Оптогальваническая спектроскопия

Д. Кинг и П. Шэнк (группа лазерной химии Национального бюро стандартов, Вашингтон, США) использовали для спектроскопических целей так называемый оптогальванический эффект¹. Суть его состоит в следующем. Через плазму газового разряда или через область ионизации (например, пламени), помещенную в постоянное электрическое поле, пропускается луч света от источника с перестраиваемой длиной волны. В момент резонанса длины

¹Этот эффект обнаружен П. Футе и Ф. Молером в 1925 г. и всесторонне исследован Ф. Пеннингом в 1928 г.

¹Препринт ТН. 2452-CERN, 1978.

²Препринт ИТЭФ-64, 1976.

Оптогальванический спектр, полученный с помощью лазерного возбуждения на промышленной натрий-неоновой лампе с полным катодом. Стрелкой показаны переходы, принадлежащие атомам натрия, остальные пики — переходы между возбужденными состояниями неона. Положительные сигналы обусловлены радиационным уменьшением населенности метастабильных состояний, поддерживающих разряд, отрицательные — оптическими переходами, которые увеличивают скорости столкновительной ионизации в плазме разряда. Нижний спектр получен при усилении, в 25 раз большем, чем верхний.

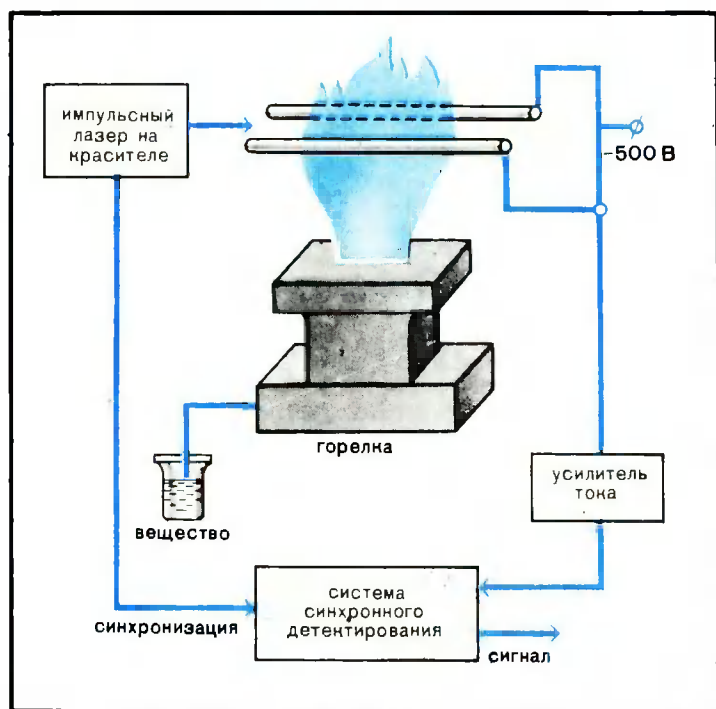
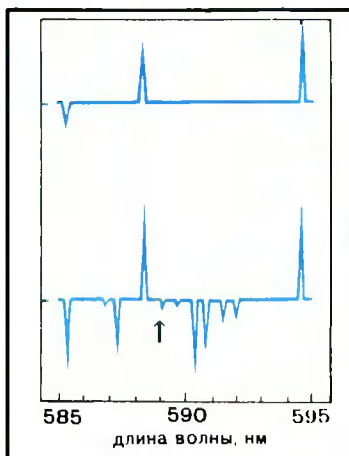


Схема оптогальванического детектирования малых концентраций вещества в пламени. Когда частота излучения лазера была настроена в резонанс с каким-либо переходом атомов металла, термическая ионизация в пламени резко увеличивалась, причем это увеличение было пропорционально концентрации атомов металла. Минимальный сигнал удалось зафиксировать при относительной концентрации атомов примеси [в данном случае магния] порядка 10^{-7} .

волны света и длины волны какого-либо перехода ионов плазмы наблюдается изменение тока через разряд или тока источника постоянного электрического поля. Если луч света (лазерный луч) модулирован по амплитуде, то в цепи источника электрического поля на частоте модуляции возникает сигнал, который легко регистрируется с помощью методов синхронного детектирования.

Оптогальванический эффект можно легко использовать и для решения обратной задачи: для синхронизации непрерывного лазера по любой линии атомного перехода, причем петля обратной связи — также чисто электрическая, поэтому оптической модуляции величины поглощения не требует.

По мнению Кинга и Шэнка, оптогальваническая спектроскопия с лазерным возбуждением — чрезвычайно эффективный аналитический метод: так как она опирается на электрические измерения и не требует проведения каких-либо оптических измерений, она свободна от многих факторов, ограничивающих чувствительность метода (отношение сигнал — шум) и его динамического диапазон.

С помощью оптогальванической спектроскопии американские исследователи определили длины волн различных атомных переходов, измерили ширину и форму линий излучения. Кроме того, с помощью этой методики удалось обнаружить исчезающе малые следы металлов в плазме пламени.

«Laser Focus», 1978, v. 14, № 3,
p. 50—57 (CША).

Физика

Фотоэлектрический эффект на дислокациях в кремнии

В. И. Никитенко, Е. Б. Якимов и Н. А. Ярыкин (Институт физики твердого тела АН СССР) обнаружили фотоэлектрический эффект на дислокациях в кремнии. Эффект состоит в создании долгоживущего пространственного разделения носителей зарядов противоположного знака в полупроводнике. Электроны и дырки возникают под воздействием света и разделяются при наложении электростатического поля. Пространственная локализация зарядов происходит в результате их захвата отдельными центрами —

ловушками. После выключения света и поля заряды освобождаются из ловушек за счет тепловых колебаний кристаллической решетки, что приводит к релаксации первоначального неоднородного распределения. Время релаксации зависит от температуры образца, вида и числа ловушек.

Было установлено, что введение в монокристалл дислокаций (путем пластической деформации образца при 650°C) увеличивало время релаксации от 10^{-10} с для недеформированных образцов до 10^4 с; плотность числа дислокаций была $\sim 10^9$ см $^{-2}$.

Возникновение дислокаций сопровождается появлением упругих микронапряжений и разрывов ковалентных связей, что приводит к появлению в запрещенной зоне полупроводника дополнительных разрешенных зон и отдельных уровней — ловушек носителей.

Исследование фотоэлектретного эффекта проводилось в вакууме при температуре 90 К. Образцы кремния толщиной 0,4 мм, легированные фосфором до концентрации порядка 10^{13} см $^{-3}$, помещались между полупрозрачными электродами. Между образцами и поверхностью электродов находились слюдяные изолирующие прокладки толщиной 20—30 мкм; к электродам прикладывалось напряжение 300 В. Время релаксации определялось путем измерения полного заряда и тока при включении и выключении поля и света.

«Письма в ЖЭТФ», 1978, т. 28, вып. 8, с. 548.

Физика

Сверхпроводящая модификация серы

В Институте физики высоких давлений АН СССР две группы исследователей получили сверхпроводящее состояние серы. Для этого потребовалось давление порядка 200—240 кбар (нагрузка ~ 10 т

при диаметре образца 0,2 мм). Сжатие образцов серы проводилось в криостате при температуре 5,7 К (в серии опытов, проведенных другой группой, — при 9,7 К). При таком давлении сопротивление образцов уменьшалось примерно в 10^3 раз (в другой серии экспериментов — в 10^{10} раз). Остаточное сопротивление при 5,7 К составило $4 \cdot 10^{-3}$ Ом и было обусловлено сопротивлением пуансонов пресса и других деталей измерительной цепи установок.

«Письма в ЖЭТФ», 1978, т. 28, вып. 6, с. 369, 390.

Молекулярная биология

Тройное перекрывание генов

В 1977 г. группа специалистов во главе с Ф. Сэнджером (Кембридж, Великобритания) при расшифровке последовательности нуклеотидов в ДНК бактериофага ϕ X174 обнаружила, что один и тот же участок ДНК может кодировать два различных белка благодаря тому, что считывание информации в этих случаях начинается с различных нуклеотидов¹.

Продолжая эти исследования, сотрудники кембриджской Лаборатории молекулярной биологии определили² последовательность нуклеотидов ДНК фага G4. В этой ДНК также найдены участки перекрывания генов. На одном из участков ген К перекрывает два других гена (кодирующих белки А и В), причем эти два гена, в свою очередь, сами имеют два общих нуклеотида. В этом и еще одном участке кодирующая способность ДНК используется во всех трех возможных вариантах считывания информации. Так, последова-

тельность нуклеотидов ТГАТГ (тимидин — гуанозин — аденозин — тимидин — гуанозин) читается в этих трех генах как ТГА — ТГ, ТГ — АТГ, Т — ГАТ — Г. В другом участке перекрывания трех генов (кодирующих белки А, С и К) последовательность ААТАГ читается как ААТ — ГАГ, АА — ТГА — и А — АТГ — АГ.

Интересно также, что белок, кодируемый геном К, практически не был изучен до определения последовательности этих нуклеотидов. Теперь этот белок выделен и исследован. В бактериях, инфицированных G4, обнаружены относительно большие количества белка К, но функция его пока неизвестна. Существует предположение, основанное на особенностях его структуры, что функционирование белка К связано с мембранами бактерий.

Новые данные о «тройной упаковке» генетической информации в вирусной ДНК свидетельствуют о том, что явление перекрывания генов встречается чаще, чем полагали до сих пор.

С. А. Остроумов,
кандидат биологических наук

Москва

Медицина

Можно ли бороться с мышечной дистрофией

К 1965 г. было известно по меньшей мере семь видов мышечной дистрофии — тяжелейшего наследственного заболевания человека, при котором поражаются различные мышцы. Эти заболевания неизбежно приводят к инвалидности, а нередко и к смерти. При мышечной дистрофии повышается активность лизосомальных гидролаз, в том числе и протеаз — ферментов, разрушающих мышечные белки. Эти ферменты находятся в лизосомах — внутриклеточных образованиях, играющих важную роль в процессах клеточного обмена. Мышечные волокна с разрушенными белками за-

¹Подробнее см. Перекрывающиеся гены. — «Природа», 1977, № 6, с. 128.

²«Nature», 1978, v. 272, № 5653, p. 510—515.

мещаются соединительной тканью.

В настоящее время известны два активных ингибитора лизосомальных протеаз — пепстатин и лейпептин. А. Страхер, Н. Макговен и М. Шефик (Нью-Йоркский университет, США) провели эксперименты на цыплятах мутантной линии, в мышечной ткани которых происходят изменения, сходные с изменениями у больных мышечной дистрофией. Удалось установить, что при введении ингибиторов дегенерация мышечных волокон развивается медленнее, чем в контрольных (не обработанных ингибиторами) культурах. Результаты этих экспериментов указывают на возможность применения пепстатина и лейпептина, а также и других ингибиторов лизосомальных протеаз в качестве терапевтического средства при миодистрофии.

«Science», 1978, v. 200, № 4337, p. 50—51 (США).

Медицина

Новый патогенный микроорганизм

В июле 1976 г. в одном из отелей г. Филадельфии (США) вспыхнула эпидемия пневмонии. Из 182 заболевших 29 умерли. Причина, вызвавшая пневмонию, оставалась неизвестной. Так как в основном все заболевшие были участниками ежегодной ассамблеи Пенсильванской секции Американского легиона, то болезнь назвали «болезнью легионеров». Странность эпидемии заключалась в том, что ареал ее распространения ограничивался лишь отелем и прилегающей к нему улицей города. Симптомы заболевания (головная боль, повышение температуры, общее недомогание, мышечные боли и болезненность в дыхательных путях) были неспецифичны и не позволяли даже судить о возможной инфекционной природе болезнетворного агента. При вскрытии трупов первых жертв была обнаружена пневмония



Электронно-микроскопический снимок бактерий, вызвавших «болезнь легионеров». Когда рост бактерий происходит вне культурной среды, они размножаются путем продольного деления (вверху). При размножении внутри клетки (в данном случае, на оболочках куриного эмбриона) эти бактерии могут принимать сферическую (коки) или палочковидную (бациллы) форму (внизу).

вирусного происхождения. Однако ни один из известных вирусов, как оказалось, не являлся причиной поражения легких умерших.

Станный характер эпидемии стал особенно зловещим в связи с наступлением другой очень похожей и столь же необъяснимой эпидемии, вновь вспыхнувшей среди участников нового собрания, проходившего в том же отеле.

И лишь полтора года спустя исследователи Центра

контроля за инфекционными заболеваниями штата Джорджия (США) выделили, наконец, бактерии, вызвавшие эпидемию. Изучение неизвестного ранее микроорганизма под электронным микроскопом показало, что это — бактериальная клетка, не имеющая ядра и обладающая сложным строением. Микроорганизм способен как к внутри-, так и внеклеточному росту. Он может передаваться через животных. Сейчас установлено, что этот микроорганизм ответствен еще за две эпидемии, вспыхнувшие в США в 1965 и 1968 г., причины которых до сих пор оставались неизвестными. Исследователи предполагают, что это — почвенный микроорганизм, так как вблизи мест возникновения инфекции проводились земляные работы. Локальный характер эпидемий также вполне объясним: в филадельфийском отеле система кондиционирования воздуха способствовала распространению микроорганизмов только внутри помещения.

«New England Journal of Medicine», 1977, v. 297, № 22, p. 1197—1213 (США); «Science», 1978, v. 199, № 4331, p. 896—897 (США).

Генетика

Гибридный примат

Зоологи Дьюкского университета (штат Северная Каролина, США) скрестили два вида лемуру, один из которых обладает 60, а другой — 44 хромосомами. Родившийся самец, которому дали кличку Кронус, оказался носителем столь разнородного генетического материала, что, вероятнее всего, должен был стать стерильным, однако ученым удалось скрестить этого гибрида с самкой лемура, имеющей стандартный набор из 60 хромосом.

Исследованием генетической характеристики их детенышей — самки Гейи и самца Монте — занимается генетик Э. Гамилтон. Он установил, что Монте обладает 57 хромосомами, из которых 27 унасле-

дованы им от Кронуса, а 30 — от матери. Генетический набор Гейи изучается.

Кронус, таким образом, стал первым известным науке гибридным приматом, полученным от родителей со столь различным числом хромосом и оказавшимся способным к продолжению рода. Исследование его организма позволит лучше понять хромосомные нарушения у человека, связанные с такими, например, тяжелыми заболеваниями, как синдром Дауна.

«The Sciences», 1978, v. 18, № 7, p. 4 (США).

Биология

Форма коралла зависит от интенсивности света

Если поместить колонию коралла в аквариум с проточной водой, подкрашенной безвредным ализарином-красным-С, животное, продолжая активный рост, забирает краситель из воды и откладывает его в скелетном веществе. Уже через два дня края известковой чашки коралла становятся ярко-красными в тех местах, где рост скелета проходит наиболее интенсивно. Освещая коралл направленным световым потоком, удается заставить его расти в избранном направлении, замедлять или даже останавливать рост, как бы «вылепливая» светом форму колонии по желанию экспериментатора. Такие опыты были поставлены мной¹ на нескольких десятках кораллов, принадлежащих 6 различным родам, в аквариумах Австралийского института морских наук в Таунсвилле и на морской биологической станции Лизард (Большой Барьерный риф) зимой 1977/78 гг., где я работал по приглашению австралийских коллег. Описанное явление хорошо объясняет часто

встречающийся в природе факт, что один и тот же вид коралла в различных световых условиях приобретает различные морфологические очертания.

Как известно, герматипные (рифостроящие) колониальные кораллы в своем мягком теле содержат одноклеточные жгутиковые водоросли — так называемые зооксантеллы. Тесный симбиоз между животной и растительной компонентами коралла ускоряет физиологические процессы в организме животного. Еще эксперименты американского зоолога и физиолога Т. Гроу показали², что при достаточно интенсивном освещении коралл длительное время может обходиться без животной пищи, продолжая расти и увеличиваясь в весе, в то время как содержание его в темноте угнетает рост, приостанавливает образование скелета, а через некоторое время зооксантеллы в массе покидают тело полипа-хозяина и коралл гибнет. Чрезвычайно сильный свет также вреден для кораллов: он подавляет фотосинтетический аппарат зооксантелл; мягкое тело самого полипа под его воздействием обесцвечивается, ткани истончаются, делаются прозрачными, а затем распадаются, обнажая скелет.

Различные виды кораллов имеют различную чувствительность к свету и расселены на разных глубинах, как бы используя толщу морской воды в качестве защитного светофильтра. Наиболее мелководные формы кораллов вынуждены концентрически разрастаться в стороны, образуя микроатоллы с мертвыми верхушками и вертикальные «щетки» и пластины, у которых зоны активного фотосинтеза располагаются по вертикальным плоскостям: они получают косой скользящий свет, способный обеспечить нормальное функционирование животного-растительного биоценоза коралла при большой интенсивности света. На глубине 5—7 м,

где свет рассеян и не создает резких теневых контрастов, кораллы образуют более изометричные полусферические и сферические колонии, равномерно освещаемые со всех сторон. Наиболее глубоководные кораллы живут в условиях относительного светового контраста, получая физиологически-активный свет только сверху; вследствие этого они образуют тонкие листовидные колонии, подставляющие падающему сверху свету максимальную поверхность. Форма таких кораллов напоминает плоские плодовые тела древесных грибов.

Б. В. Преображенский,
кандидат геолого-минералогических наук
Владивосток

Зоология

Рыба, которая дышит жемчуком

Как известно, есть немало видов рыб, способных получать кислород не только из воды, но и прямо из воздуха благодаря примитивным легким. Недавно ихтиологи Дж. Ги (Канада) и Дж. Грэм (США) установили, что два вида рыб — *Hoplochromia thoracatum* и *Brochis splendens* — обладают еще более редким типом дыхания — через жемчужок.

Оба эти вида населяют теплые мутные воды Южной Америки, в которых нередко очень мало кислорода. В лабораторных условиях, когда кислорода в воде достаточно, эти рыбы обходятся обычным жаберным дыханием, но по мере снижения содержания кислорода они все больше времени проводят на поверхности воды. Поднявшись на поверхность, рыба захватывает порцию воздуха ртом и глотает его, как пищу. Пока воздух проходит через пищеварительный канал, кислород отбирается организмом; остальные газы выбрасываются через анальное отверстие.

Всплытие на поверхность повышает опасность оказаться жертвой какого-либо хищника.

¹Автор заведует лабораторией тропических морей Института биологии моря ДВНЦ АН СССР. — Прим. ред.

² «Biological Bulletin», 1960, v. 18, p. 419—421.

Возможно, именно поэтому особи обоих этих видов чаще всего всплывают не поодиночке, а группами.

«The Journal of Experimental Biology», 1978, v. 74, p. 1 (Великобритания).



Охрана природы

Судьба средиземноморского тюленя

Большая часть тюленей, существующих на Земле, обитает в полярных или умеренных водах, лишь тюлени-монахи выбрали для жительства более теплые районы. Это вестиндский *Monachus tropicalis*, который, по-видимому, уже полностью вымер, гавайский *Monachus schauinslandi*, спасенный от подобной участи в прошлом веке и ныне насчитывающий около 1 тыс. голов, и, наконец, средиземноморский, или белобрюхий, тюлень-монах *Monachus monachus*, судьбой которого в последнее время особенно озабочена научная общественность.

Этот вид тюленей далеко не всегда был редким: Плутарх, Плиний, Гомер упоминают его как вполне обычное для их времени животное; Аристотель дает весьма точное его анатомическое описание. Среди топонимов многих областей Греции, Турции, Югославии есть такие, как Фокус, Фока, Фокида, явно восходящие к его древнегреческому наименованию *Phoca*. Нередко можно встретить его изображение на монетах. Археологические раскопки в районе Гримальди (Италия) указывают, что тюлень был важным объектом охоты еще для человека эпохи палеолита. Ареал этого вида простирался от Черного (турецкое и болгарское побережья) и Мраморного морей до о-вов Мадейра, Канарских, а, возможно, также Азорских, о-вов Зеленого Мыса и побережья Мавритании, омываемых водами Атлантического океана.

Еще несколько веков назад стада этого тюленя, насчитывавшие многие сотни

особей, встречались по всему ареалу. Ныне на проходившей в 1978 г. на о-ве Родос (Греция) I Международной конференции по средиземноморскому тюленю, созванной ЮНЕП (Программа ООН по окружающей среде) и МСОП (Международный союз охраны природы), было отмечено катастрофическое убывание его численности. Специалисты по морским млекопитающим полагают, что общая численность тюленя-монаха колеблется от 500 до 1000 голов; из них от 300 до 600 особей населяют воды, омывающие Греческий архипелаг, остальные популяции разбросаны главным образом вдоль западного побережья Малой Азии, у о-вов Кипр, Крит, Сардиния, Сицилия и вдоль северного побережья Африки в Алжире и Тунисе. За последние 30—35 лет тюлень полностью исчез у берегов Испании и Франции. По подсчетам эколога Ж. Бульва, нынешний темп сокращения его численности — около 13% в год — означает, что всего за 20—30 лет, если не будут приняты решительные меры, их останется 30—60 голов. Особенно тревожит известие, что все реже встречается молодняк. Единственная благополучная популяция — мавританская, которая после 1974 г. стала расти и насчитывает сейчас около 60 особей, в том числе немало молодых.

Среди специалистов нет единого мнения по поводу того, обычным ли для экологии этого тюленя является заселение подводных гротов и пещер или они вынуждены это делать в связи с приходом человека на пляжи и каменистые участки побережий, привычные для их отдыха и выведения потомства. По мнению некоторых ученых, численность поголовья снижается, в частности, за счет гибели молодняка в пещерах, затопляемых штормом и приливом.

Неясно влияние на экологию средиземноморского тюленя загрязненности Средиземного моря продуктами человеческой деятельности. Известно, однако, что в результате загрязнения ДДТ тихоокеан-

ского побережья США резко возросло число родов недоношенных детенышей у калифорнийского морского льва; аналогичны последствия загрязненности вод Балтики полихлорбифенолами для тамошней популяции серого тюленя.

Родосская конференция призвала принять срочные меры для спасения средиземноморского тюленя¹. Сообщается, что в Мавритании, Турции, Испании и Италии имеются планы создания прибрежных заповедников, которые включали бы участки, уже заселенные тюленями или потенциально подходящие для этого. Самым важным считается немедленное принятие широких просветительных мер, чтобы люди не тревожили это робкое животное, в особенности в период выведения потомства.

«New Scientist», 1978, v. 78, № 1109, p. 906—908 (Великобритания).

¹ Советские зоологи давно обеспокоены судьбой этого вида, внесенного в «Красную Книгу СССР». В числе мер, направленных на его спасение, предлагается реакклиматизация тюленей в крымских водах; в частности выдвинуто предложение о создании специальных заповедников в районе о-ва Змеиный и м. Тарханкут (см., например: Бычков В. А., Белькович В. М., Дулицкий А. И. Об интродукции белобрюхого тюленя и создании Тарханкутского морского заповедника. Тезисы докладов VII Всесоюзного совещания по морским млекопитающим. Симферополь, 20—23 сентября 1978 г. М., 1978, с. 55—57). — Прим. ред.



Охрана природы

Воздух городов под государственным контролем

С 1 января 1979 г. в СССР введен в действие государственный стандарт

17.2.3.01—77 «Охрана природы. Атмосфера. Правила контроля показателей качества воздуха населенных пунктов», утвержденный Государственным комитетом СССР по стандартам в 1977 г. Этот ГОСТ, являющийся первой разработкой подобного рода документов в области стандартизации охраны природы, не имеет аналогов за рубежом.

До ввода ГОСТа различные ведомства вели контроль за состоянием качества воздуха разными методами, что исключало возможность объективного сравнения результатов измерений. Цель разработки настоящего стандарта состояла в установлении общих правил контроля за загрязнением атмосферного воздуха вредными веществами. Их выполнение позволяет получать: гигиеническую оценку вредного влияния загрязненного промышленными и транспортными выбросами атмосферного воздуха на здоровье населения и на санитарно-бытовые условия его жизни; характеристику распределения поля концентрации примесей по городу; оценку зависимости величины концентрации от метеорологических условий.

Стандарт содержит также общие положения, характеризующие организационные основы службы наблюдения и контроля, принципы организации контроля, включая классификацию постов наблюдения, правила выбора мест и сроков для стационарных и подфакельных (передвижных) наблюдений, указаний — в зависимости от населенности, рельефа, метеословий — о количестве стационарных, маршрутных и подфакельных постов и т. д.

При внедрении ГОСТа предусматривается разработка автоматических газоанализаторов на окислы азота, озон, углеводороды, сернистый газ, сероводород, хлор и др., оснащение сети постов новыми модификациями контрольно-измерительных комплексов, а также разработка и внедрение правил, регламентирующих работу предприятий для предотвращения

опасного загрязнения воздуха в районах их расположения в периоды неблагоприятных метеорологических условий; методических указаний по прогнозированию загрязнения воздуха в городах; подготовка и издание инструктивно-методических указаний и руководств по контролю загрязнения атмосферы, регулярная выдача результатов анализа информации о загрязнении атмосферы в виде стандартных документов различной степени срочности и т. д.

Этот документ был разработан на основе исследований, которые ведутся в Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова и Институте прикладной геофизики Госкомитета СССР по гидрометеорологии и контролю природной среды, Институте общей и коммунальной гигиены им. А. Н. Сысина и Центральном ордена Ленина институте усовершенствования врачей Минздрава СССР, во Всесоюзном научно-исследовательском институте стандартизации Госкомитета СССР по стандартам.

Л. И. Витковская,
кандидат технических наук

Москва

Метеорология

Нисходящий атмосферный взрыв

В 1975 г. над Карибским морем произошла авиационная катастрофа, официально приписанная ошибке пилота. Однако впоследствии, после изучения всех обстоятельств, метеоролог Т. Фудзита из Чикагского университета пришел к выводу, что причиной катастрофы было неизвестное прежде явление — внезапно возникающий стремительный поток воздуха, который движется к поверхности Земли со скоростью от 80 до 100 км/ч.

Такой «нисходящий атмосферный взрыв» обычно захватывает участок атмосферы шириной в несколько километров. Это явление может происходить в любое время

суток и сезон года, но чаще — в более жаркий период. Продолжительность его близка к 15 мин; скорость горизонтального перемещения — около 30—100 км/ч. Оно может происходить как само по себе, так и сопровождаться грозой, ураганом или смерчем. Замечено, однако, что примерно половина всех смерчей сочетается с нисходящим атмосферным взрывом.

Этот факт несколько облегчил изучение явления, затрудняемое непредсказуемостью его возникновения. Был разработан специальный проект «Метеорологическое исследование нисходящих взрывов в северном Иллинойсе» («Northern Illinois Meteorological Research on Downbursts» — NIMROD), так как именно в этом районе США особенно часты смерчи (торнадо). Вскоре было доказано, что нисходящие атмосферные взрывы могут быть обнаружены с помощью радиолокационного оборудования (несколько раз это явление было зарегистрировано в 10—12 км от крупнейшего аэропорта им. О'Хара близ Чикаго, на расстоянии 10—15 мин от наблюдателей).

Известная «капризность» в поведении смерчей, как теперь выяснено, сообщается им нисходящими взрывами, воздействие которых и приводит к всевозможным «извивам» в пути продвижения этих воздушных воронкообразных вихрей. Без таких взрывов смерчи перемещались бы над поверхностью Земли в основном по прямой линии. С другой стороны, нисходящий атмосферный взрыв, если его мощность достаточно велика, может привести к ликвидации смерча.

По подсчетам Фудзиты, три четверти разрушений, причиненных смерчами передвижным домам-трейлерам, широко распространенным в США, было вызвано, по существу, нисходящим атмосферным взрывом. Аэрофотосъемка показывает, что полоса, охваченная воздействием нисходящего атмосферного взрыва, обычно бывает на 15—30 км шире, чем полоса, подвергшаяся

разрушительному действию смерча. Характерно, что в первом случае пострадавшие сооружения выглядят «сокрушенными» ударом, а во втором — разметанными во все стороны.

Ретроспективный анализ позволил установить, что нисходящий атмосферный взрыв был причиной авиакатастроф, случившихся за последнее время в районах Нью-Йорка, Денвера, Таксона и Филадельфии.

«Science News», 1978, v. 113, № 23, p. 374 (США).

Геология

60-й рейс «Гломара Челленджера»

Состоявшийся в марте — мае 1978 г., этот рейс научно-исследовательского бурового судна «Гломар Челленджер»¹ был примечательным во многих отношениях. Он проходил в год 10-летия Проекта глубоководного бурения и завершился первой в истории освоения океана попыткой бурения на рекордной глубине — более 7 км в глубочайшем на Земле Марианском желобе. Этот рейс завершил серию экспедиций, изучавших геологию дна окраинных морей северо-западной части Тихого океана. Интернациональную группу ученых, включавшую представителей Австралии, Западной Германии, СССР², Франции и Японии, возглавляли Д. Хассонг (Институт геофизики при Гавайском университете, США) и С. Уеда (Институт исследования землетрясений при Токийском университете, Япония).

Интерес геологов к окраинным морям Тихого океана не случаен: именно здесь удается наблюдать признаки активного взаимодействия



бурения в 60-м рейсе велось на рекордной глубине — более 7 км. Палуба судна чиста: все трубы использованы на сбор буровой колонны.

океанских и континентальных масс горных пород и именно здесь, как полагают многие специалисты, могут быть выявлены те закономерности геологических процессов, которые дадут ключ к разгадке многих тайн в сложных геосинклинальных областях на континентах, по всем признакам проходивших через океанскую стадию развития.

Цепочка из 10 новых скважин на дне океана начинается от западной окраины Марианского трога, пересекает сначала его, затем — Ма-

рианский хребет и заканчивается на окраине дна Тихого океана, примыкающей к Марианскому желобу. Работы в рейсе начались с бурения в этой последней точке. К сожалению, результаты первой скважины не оправдали возлагавшихся на нее надежд: проникнув сквозь 25-метровый слой современных осадков (0,9 млн лет), скважина сразу же вошла в горизонт очень крепких кремней верхнемелового возраста (65 млн лет). Несмотря на двукратную попытку, пробиться через него не удалось. Таким образом, более древний отрезок геологической истории района, «записанный» в 200-метровом слое осадков, которые, по данным геофизики, залегают под кремнями, остался не раскрытым. Тем не менее об-

¹ «Geotimes», 1978, v. 23, № 10.

² От Советского Союза в рейсе принимал участие автор этого сообщения.

наруженное здесь отсутствие осадков, которые должны были бы накапливаться в период между 65 и 0,9 млн лет, — факт весьма любопытный. Учитывая данные предшествующих рейсов, можно счи-

тать, что область, в пределах которой наблюдается перерыв в накоплении осадков, охватывает огромный участок дна Тихого океана: от плато Шатского на севере и Центрально-Тихоокеанских гор на во-

стоке он вплотную подходит к Марианскому желобу на западе. Стройная теория, объясняющая это явление, еще ожидает своих авторов.

Легкое разочарование от первой неудачи привело участ-

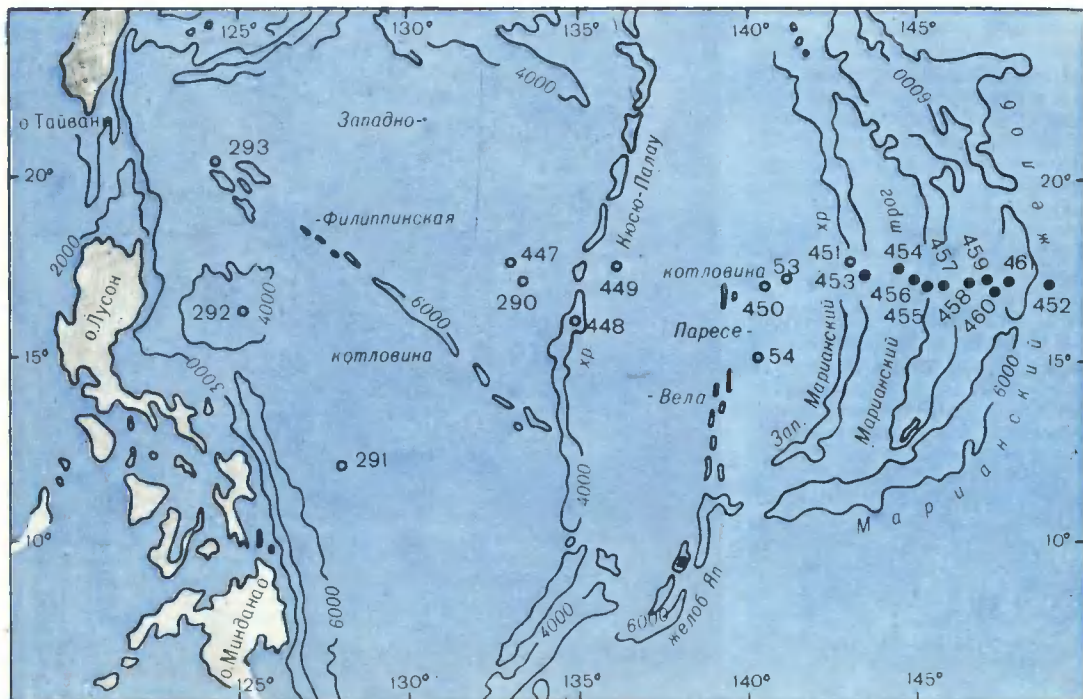


Схема расположения скважин, пробуренных научно-исследовательским судном «Гломар Челленджер» в центральной части

Филиппинского моря: [53—54] — в 6-м, [290—293] — в 31-м, [447—451] — в 59-м и [452—461] — в 60-м рейсах.

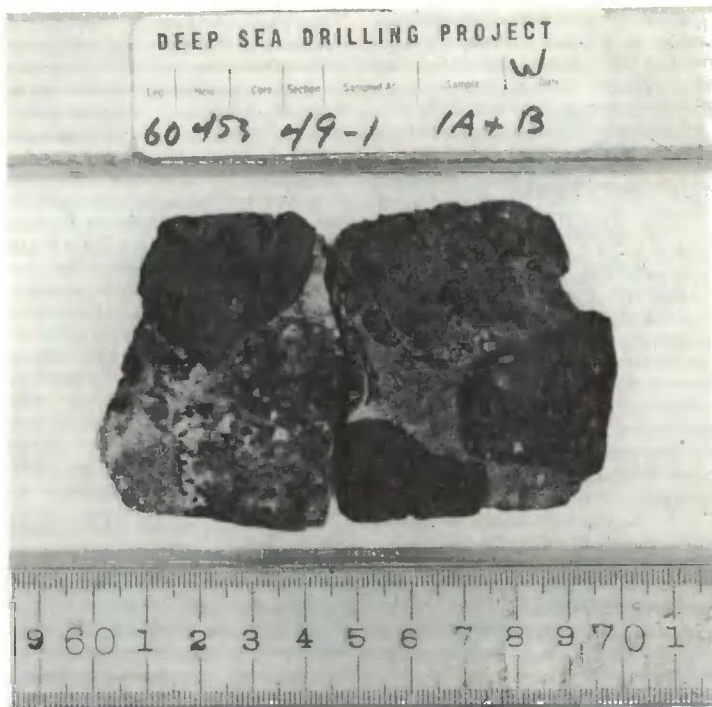
Характеристика скважин

№ скважины	452	453	454	455	456	457	458	459	460	461
Глубина океана над устьем скважины, м	5828	4693	3818,5	3468	3591	2837	3449	4120	6443,5	7034
Мощность пробуренных осадков, м	28	446	67	104	134	61	256,5	559	85,5	20,5
Глубина вскрытия пород фундамента	—	159 (брекчин)	104,5 (базальты)	—	35 (базальты)	—	209 (бониниты)	132,5 (андезитобазальты)	—	—

ников экспедиции к решению начать бурение с другого конца разреза, тем более, что возможность получить при этом непрерывный сейсмо-профиль через весь район исследований явно укрепила дух руководителей экспедиции — геофизиков.

Началось с сюрприза. В самой западной точке, в 10 км от основания Западно-Марианского хребта, под разрезом осадков, отлагавшихся в течение 5—5,6 млн лет, вместо ожидаемых базальтов скважина 453 вскрыла полимиктовые брекчии. Эти породы состояли из глыб и обломков метаморфизованных габбро и диабазов, скрепленных карбонатно-кварцевым цементом. Особенно интересно, что породы, слагающие обломки в брекчиях, оказались по целому комплексу признаков очень похожими на соответствующие типы пород из так называемых офиолитовых ассоциаций, которые давно известны на континентах. В частности, они широко развиты на территории Японии, Тайваня и Филиппин, т. е. в пределах всего западного обрамления Филиппинского моря. (Аналогичные породы на дне Филиппинского моря впервые были обнаружены экспедицией на «Дмитрии Менделееве» в 1976 г.; данные бурения, таким образом, подтвердили это открытие.)

Следующие две скважины (454 и 456), расположенные в центральной части Марианского трога, вскрыли под покровом относительно молодых плейстоценовых осадков закаленные водой потоки базальтовых лав. В первом случае они переслаивались с осадками, во втором — слагали толщу, лишенную осадочных слоев. Результаты исследования пород, полученные на судне, говорят об их родстве с типичными базальтами 2-го слоя океанической коры; даже независимо от лабораторных анализов ясно, что центральная часть трога моложе его западной окраины и что ее образование сопровождалось развитием вулканической деятельности, интенсивность которой в двух соседних районах была



Полимиктовые брекчии, вскрытые скважиной 453. Видны обломки габбро и диабазов, слагающих эти породы.

«Щетка» кристалликов арагонита (CaCO_3), выросшая в одной из газовых полостей, которые пронизывают базальты скважины 454. [Увел. в 20 раз].



различной. Кроме того, установлено, что в отдельных участках этой зоны происходила циркуляция термальных вод — в базальтах скважины 456 обнаружены несомненные признаки их воздействия.

Большой интерес представляют разрезы осадочных пород, вскрытых скважинами в Марианском трого. Во всех случаях в осадках была обнаружена примесь, а часто и целые прослои вулканических пеплов. Внимательное их изучение даст ценную информацию о закономерностях развития вулканизма в данном районе и характере магматических расплавов, поднимавшихся из недр к поверхности в процессе развития структуры трого.

Западный склон и гребень Марианского хребта, там, где расположены скважины 455 и 457, оказались покрытыми толстым слоем рыхлых вулканогенных продуктов. Пробурить этот «ползучий», пропитанный водой слой оказалось невозможным, и обе скважины интересных результатов практически не дали.

Новая полоса удач началась с бурения восточного склона Марианского хребта, который в то же время является западным бортом одноименного глубоководного желоба. В районе бурения склон имеет четкий перегиб, отделяющий его верхнюю пологую часть от крутой нижней. Скважины 458 и 459, расположенные на пологом участке, вскрыли осадки, отлагавшиеся здесь в течение 34 и 45 млн лет соответственно. Хотя скважины отстоят друг от друга всего на 65 км, они имеют ряд любопытных отличий. Наиболее существенные из них: разная толщина слоев, накопившихся за один и тот же период времени; перерывы в накоплении осадков в одном случае и отсутствие перерывов в другом; разница в соотношениях биогенного и абиогенного материала. Все это говорит о том, что геологические условия, и прежде всего характер движения земной коры, в этой и другой скважин были разными на протяжении длительного отрезка времени.

Отсюда неизбежен вывод о блоковом строении фронтальной зоны Марианской островной дуги, который подтверждается и данными по породам фундамента. В районе скважины 458 осадки отлагались на бониниты — весьма редкую разновидность вулканических лав, которые в соседнем районе отсутствуют. До 1976 г. бониниты и родственные им породы были известны только в двух районах — на Бонинских о-вах и в Новой Гвинее. В 17-м рейсе «Дмитрия Менделеева» они были обнаружены на склоне Марианского желоба к югу от о-ва Гуам. И вот теперь их закономерная приуроченность к районам восточной окраины Филиппинского моря подтверждена данными бурения.

Две последние скважины (460 и 461) были пробурены в нижней части склона, одна из них — на глубине 7034 м. Как оказалось, порядок напластования осадочных пород здесь сильно нарушен оползневидными явлениями. В результате осадки, имеющие возраст 70—65 млн лет, перемешались с более молодыми, вплоть до современных. Залегают они на несцементированных брекчиях, т. е., по существу, на каменных развалах, в составе которых были обнаружены те же габбро, диабазы и базальты. Присутствуют среди них и фрагменты пород, вскрытых скважинами в верхней части склона. Все эти факты говорят о разрушении самых разных горизонтов структуры островной дуги в ее фронтальной зоне. Следовательно, одна из существующих гипотез, предполагающая обратный процесс разрастания этих геологических структур за счет «соскабливания» осадочного чехла океанской плиты в результате ее пододвигания под дуги, по крайней мере в данном районе, не подтвердилась.

А. Я. Шараськин,
кандидат геолого-минералогических наук

Москва

Геология

Эпохи базальтового магматизма

Обильный материал, который дают глубоководное бурение и драгирование пород океанического дна, позволяет проводить сравнительное изучение составов и условий формирования базальтов в современных океанических областях с базальтами мезозойских и палеозойских складчатых поясов, а также древнейших докембрийских тектонических комплексов континентов, слагающих фундаменты платформ. Это весьма существенно для решения проблемы базальтового магматизма, интенсивно разрабатываемой в последние годы.

Интересные сопоставления характера базальтового магматизма различных периодов докембрия с палеозойскими и более поздними базальтами провел японский геолог М. Горай¹. Он установил, что в докембрии существовало три максимума интенсивного проявления базальтового магматизма — около 2500, 2000 и 1100 млн лет назад, которые разделены периодами относительного спокойствия. За последним максимумом также наступил спокойный период, прервавшийся в конце палеозоя, когда вновь возобновился базальтовый магматизм, особенно сильно проявившийся в мезозойскую эпоху.

Интересно, что, по данным многих исследователей, поздний палеозой — ранний мезозой были периодом перемещения континентов. Таким образом, интенсивный базальтовый магматизм и перемещение континентов совпадают во времени и, возможно, взаимосвязаны. Более того, некоторые авторы предпола-

¹ Gorai M. An essay on the basaltic magmatism in the light of the Earth's evolutionary history. In: Volcanoes and Tectonosphere. Tokyo, 1976.

гают, что и в докембрии тоже существовали периоды перемещения континентов, сопровождавшиеся активным проявлением базальтового магматизма. Однако Гораи склонен считать, что континентальные перемещения в столь глобальном масштабе, как они происходят с мезозоя и по настоящее время, — единственное в своем роде явление во всей истории Земли.

Докембрийские базальты различных периодов, по данным Гораи, различаются по составу. Так, породы архейских зеленокаменных поясов (слабометаморфизованных базальтов) богаты кремнеземом и бедны окисью калия, т. е. принадлежат к низкокальциевому толеитовому типу. Этим они отличаются от мезозойских и более поздних «континентальных» толеитов, но сходны с некоторыми низкощелочными толеитами кайнозойских островных дуг. Раннепротерозойские базальты близки по составу архейским и также принадлежат к насыщенному кремнеземом и бедному щелочами толеитовому типу. Позднепротерозойские базальтовые породы отличаются от архейских и раннепротерозойских значительно повышенной щелочностью (особенно за счет K_2O) и относительной бедностью кремнеземом; нередко их можно отнести к щелочным базальтоидам, правда, они менее щелочны по сравнению с типичными базальтами палеозойского и более молодого возраста.

Многие исследователи высказывали предположение, что в ранние стадии развития Земли градиент температуры в приповерхностных ее частях был более высоким. В связи с этим, считает Гораи, архейские насыщенные кремнеземом низкокальциевые толеиты генерировались на меньших глубинах; когда же к позднему протерозою этот градиент стал более низким, произошло смещение центров генерации базальтовой магмы в более глубокие части верхней мантии, чем и объясняется повышение щелочности магм толеитового состава.

Присутствие среди палеозойских и более поздних базальтов разновидностей, относящихся к различным типам базальтовых магм, Гораи объясняет глобальными изменениями геотектонических условий, которые произошли в конце палеозоя, и относит этот этап к одному из важнейших в истории Земли.

Т. В. Молчанова,
кандидат геолого-
минералогических наук
Москва

Палеонтология

Животный мир Антарктиды в эпоху триаса

Американская полярная экспедиция под руководством Дж. У. Косгриффа, организованная Уэйновским университетом (Детройт, штат Иллинойс) и Университетом штата Огайо, обнаружила ископаемые остатки ранее неизвестных животных.

Во время исследований в районе холмов Кумулус — Хиллс (около 700 км к юго-востоку от американской южнополярной станции Мак-Мердо) было найдено богатейшее скопление, которое содержало 116 отдельных остатков различных позвоночных, населявших Западную Антарктиду в эпоху раннего триаса (около 230 млн лет назад). Находка, включающая как известных, так и неизвестных палеонтологам животных, дает беспрецедентную возможность судить о природе этого малоизученного региона Земли в отдаленную эпоху.

Среди ископаемых остатков нет ни птиц, ни млекопитающих, которые в ту пору еще не существовали. Найдены четыре группы земноводных и пресмыкающихся; характерных для раннего триаса. Девять животных представлены полными или почти полными скелетами, что является редкостью, девять других — отлично сохранившимися черепами.

Четыре или пять видов попали в руки ученых впервые. Все они принадлежат к группе пресмыкающихся — *Therapsida*, — которых специалисты считают предками млекопитающих. Размеры этих животных сравнимы с размерами современных оленей.

Еще одну группу ископаемых животных образуют различные виды лабиринтодонтов, величина тела которых близка нынешним крокодилам. Их облик напоминает современных лягушек или саламандр. В незначительном числе найдены также остатки животных, принадлежавших к группе *Cotylosauria*, которая считается древнейшей среди пресмыкающихся, и *Eosuchia* — предка нынешних ящериц.

Аналогичные виды ископаемых животных ранее находили в Африке, Австралии и Индии, что служит доказательством «слитного» существования этих масс суши с Антарктидой в эпоху триаса, до разлома гигантского континента Гондваны.

Геолог Дж. У. Коллинсон (Университет штата Огайо), также участвовавший в экспедиции, указывает, что место находки, очевидно, представляло собой в триаса пойму большого ручья, постепенно заполнявшуюся осадочными породами. Ископаемая флора и фауна говорят о том, что в ту эпоху климат здесь был умеренный, временами близкий к субтропическому, но не слишком влажный. Берега ручья были покрыты довольно богатой растительностью (ныне здесь встречаются лишь лишайники). Южный полюс, который сейчас отстоит от места находки всего на 500 км, в ту эпоху был, очевидно, значительно удаленнее.

Изучение находок продолжается в лабораториях США и в Тасманийском университете (Австралия).

«Science News», 1978, v. 113, № 13, p. 197 (США).

Астрономия

В. Зонн. ГАЛАКТИКИ И КВАЗАРЫ. Пер. с польск. Ю. А. Данилова. Послесл. П. Г. Куликовского. М., «Мир», 1978, 248 с., ц. 90 к.

Автор книги, известный польский астроном Владимир Зонн (1905—1975), в течение многих лет возглавлявший астрономическую обсерваторию Варшавского университета и Польское астрономическое общество, знаком нашему читателю по его ставшей классической книге «Звездная астрономия», русский перевод которой был опубликован в 1959 г. Новая книга В. Зонна посвящена квазарам — наиболее загадочным объектам в современной картине Вселенной.

В первых главах представлены основные достижения галактической и внегалактической астрономии и радиоастрономии, при этом особое внимание уделено классификации галактик, их размерам, эволюции, массам, спектрам, яркости, устойчивости скоплений и т. д. Излагаются современные данные о квазарах: их излучении, его особенностях, загадке «красного смещения» квазаров, «возможных источниках испускаемой ими энергии, а также проблеме определения расстояния до них. В заключение говорится о месте квазаров в структуре Вселенной и их роли в космологических представлениях.

Математика

С. Страшевич, Е. Бровкин. ПОЛЬСКИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ОЛИМПИАДЫ. Предисл. А. Пелчинского и А. Шинцеля. Пер. с польск. Ю. А. Данилова. Под ред. В. М. Алексеева. М., «Мир» (серия «Задачи и олимпиады»), 1978, 338 с., ц. 1 р.

В век научно-технической революции все более

острой становится проблема раннего выявления математически одаренных школьников. Традиционным средством таких поисков являются математические олимпиады; при этом их организаторы всегда испытывают острую нужду в оригинальных математических задачах. В книге содержится около 200 задач повышенной трудности, снабженных подробными решениями. Эти задачи предлагались в 1949—1976 гг. на различных этапах математических олимпиад, проводимых ежегодно в Польской Народной Республике. Предназначая сборник преподавателям математики и ученикам старших классов, авторы отмечают, что из числа победителей первых десяти олимпиад 19 человек стали профессорами и 28 — доцентами математики и других точных наук.

Биология

Э. Брода. ЭВОЛЮЦИЯ БИОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ. Пер. с англ. Ю. М. Фролова. Под ред. А. И. Опарина. М., «Мир», 1978, 304 с., ц. 2 р. 10 к.

Первые, примитивные и несовершенные формы организации живой материи давно исчезли, но их следы сохранились в протоплазме современных живых существ. Ключом к познанию эволюции форм жизни на Земле является сравнительное изучение обмена веществ и высвобождения энергии у различных организмов.

Автор книги, профессор Венского университета Э. Брода известен как крупный специалист и в области физической химии, и в области биологии, в частности микробиологии. Этим объясняется его синтетический подход к одному из центральных вопросов эволюционной биологии — появлению и развитию биоэнергетических процессов. В книге приводятся обширные данные об энергии в биосфере, появле-

нии органических (в том числе богатых энергией) соединений, возникновении жизни. Детально рассмотрены основные акты жизнедеятельности микроорганизмов: брожение, синтез, фотосинтез и дыхание, а также взаимоотношение биоэнергетических процессов у растений и животных. Все положения автора хорошо обоснованы фактическим материалом: в книге приведены две с лишним тысячи источников.

Психология

Р. Кляцки. ПАМЯТЬ ЧЕЛОВЕКА: СТРУКТУРА И ПРОЦЕССЫ. Пер. с англ. Т. Сидоровой. Под ред. Е. Соколова. М., «Мир», 1978, 320 с., ц. 1 р. 70 к.

Память человека является одним из важнейших компонентов его познавательной деятельности. Полностью механизмы памяти еще не изучены, но накоплено много интересных данных о структуре памяти и ее основных процессах. В книге впервые систематически обобщены последние работы в этой области, известные до сих пор лишь по публикациям в периодических изданиях. Подробно охарактеризованы зрительный и слуховой регистры памяти, ее смысловые коды и процессы распознавания образов, механизмы и теории кратковременной и долговременной памяти, дан психологический анализ процессов узнавания, припоминания и забывания. Книга содержит большой экспериментальный материал, четко описанный и хорошо систематизированный. В конце книги рассмотрены способы быстрого запоминания случайных данных, а также специфическая роль памяти в шахматной игре. Книга написана ясным, живым языком.

Ботаника

ВСЕСОЮЗНОЕ БОТАНИЧЕСКОЕ ОБЩЕСТВО. Справочник. (Составители: В. А. Алексеев,

О. Ф. Микрюкова, В. М. Смирнова. Отв. ред. А. Л. Тахтаджян.) Л., «Наука», Ленингр. отд. 1978. (Акад. наук СССР. Всесоюзное ботан. общество.) 253 с., ц. 1 р. 40 к.

Справочник издается в соответствии с решением V Съезда Всесоюзного ботанического общества (ВБО), состоявшегося в 1973 г.

Он содержит очерк истории, состава, структуры, деятельности и современного состояния ВБО — одного из крупнейших научных обществ нашей страны, созданного в 1915 г. по инициативе киевских ученых С. Г. Навашина, Е. Ф. Вотчала и А. В. Фомина; Устав общества и сведения о 6800 членах общества.

Метеорология

И. Е. Воробьев ПИСЬМА, ДОШЕДШИЕ ДО АДРЕСАТА ЧЕРЕЗ 40 ЛЕТ. Записки метеоролога. Л., Гидрометеоздат, 1978, 110 с., ц. 35 к.

И. Е. Воробьев (1902—1977), метеоролог-полярник, разносторонний исследователь, горячо любивший северную природу, собрал богатейшую коллекцию растений, мог часами наблюдать птиц... О своих наблюдениях Воробьев писал родным и друзьям. Время придало частному характеру переписки иной смысл, и она составила книгу.

Книга состоит из двух частей. В первой — «На Медвежьих островах» — описывается первая советская зимовка на о. Четырехстолбовом в 1933—1934 гг., на которой автор был старшим наблюдателем. Двадцать писем с Дальнего севера подробно, изо дня в день рисуют трудовые будни исследователей, создававших станцию, которая теперь стала одной из крупнейших гидрометеорологических станций в Арктике. Вторая часть книги посвящена работе высокогорной геофизической станции на горе Алагез в Армении в 1935—1936 гг., которую возглавлял Воробьев. За строками писем вырисовывается образ их автора, который не только был беззаветно предан своему

служебному долгу, но и проявлял мужество, спасая жизнь других людей.

Геология

В. И. Вернадский. ЖИВОЕ ВЕЩЕСТВО. Сост. В. С. Неаполитанская, Н. В. Филиппова. М., «Наука», 1978, 358 с., ц. 3 р.

«Живым веществом» В. И. Вернадский (1863—1945) называл совокупность организмов, заселяющих биосферу и вступающих как единая геологическая сила планетного масштаба. Изучение взаимоотношений организмов со средой их обитания стало особенно актуальным в наше время в связи с увеличивающимся влиянием человека на окружающую природу.

Книга содержит материал нескольких рукописных работ Вернадского, написанных в начале 1920-х годов. В этих работах, составивших пять глав книги, проанализированы и обоснованы суждения о происхождении жизни, ее «вечности», «космичности», о геологической деятельности живого вещества, в том числе человека. Научные факты интерпретируются на фоне истории идей, их зарождения, эволюции; прослеживается взаимосвязь различных сторон человеческого знания.

География

Б. Е. Светличный. ГОРОД В СОВРЕМЕННОМ МИРЕ. М., «Стройиздат», 1978, 215 с., ц. 50 к.

Книга Б. Е. Светличного — это своеобразная энциклопедия проблем современного города, сгруппированных автором в тщательно продуманную последовательность. Первая глава посвящена различным формам расселения — и городского, и сельского — их эволюции, а заодно и эволюции взглядов на них. Вторая глава — городскому транспорту и вопросам, которые задает он современным и будущим градостроителям и проектировщикам. Повествуя о «социальном ансамбле» города,

автор рассматривает проблемы элементарных ячеек любого современного города — квартир и домов, проблемы жилища как такового. Коснувшись функций, сопряженных с жилищем, шире — с общественным зданием (детские сады, школы, магазины, столовые и т. д.), автор переходит как бы на следующий градостроительный этаж, где единицами рассмотрения являются уже не отдельные здания, а их сочетания, комплексы, ансамбли, и в частности ансамбли городских улиц, площадей и центров. При этом большое внимание уделяется не только функциональной, но и эстетической стороне дела, поискам образа современной урбанизации.

История науки

А. А. Локерман. ЗАГАДКИ РУССКОГО ЗОЛОТА. Отв. ред. С. Д. Шер. М., «Наука» (серия «История науки и техники»), 1978, 144 с., ц. 45 к.

Тайна месторождений золота в России имеет многовековую историю. Известно, что древнерусские князья либо добывали золотые изделия огнем и мечом, либо покупали их у греческих и генуэзских купцов. В то же время своего, природного золота в нашей стране долго не могли найти, несмотря на энергичные поиски. Как ни странно, первые русские рудознатцы открыли сначала труднодоступные коренные месторождения, и лишь значительно позднее — золотые россыпи, буквально лежавшие у них под ногами.

В книге впервые с исторической точки зрения рассматриваются загадочные причины вековых неудачных поисков отечественных месторождений золота и стимулирующая роль петровских указов, рассказывается о волне открытий золотых россыпей и вспыхнувшей золотой лихорадке. В популярной форме изложены основные физико-химические свойства золота и некоторых других элементов, прослежены геохимические процессы распределения элементов.

В КОНЦЕ НОМЕРА

«Блистательнейший химиатр и архиатр Мегаполитанский Анджело Сала»

З. Е. Гельман

Институт истории естествознания
и техники АН СССР
Москва

Итальянский врач, фармацевт и химик Анджело Сала не может быть причислен к корте тех, кого Ф. Энгельс называл титанами Возрождения.

Он относился скорее к «среднему» слою ученых. Однако деятельность его и широта познаний таковы, что он, без сомнения, может быть причислен к кругу лиц, называемых гуманистами, образовавшими то культурное поле, на котором только и были возможны «титаны», и расцветшими пути исследовательской деятельности для последующих поколений. Э. Мейер писал в «Истории химии»: «Сала... поражает нас своими богатыми для того времени химическими сведениями и здравыми суждениями как о Парацельсе, так и о старой медицинской школе. Его химические познания и связи с медицинским опытом со служили большую службу не только фармации, но и чистой химии, так как он составил себе такие точные понятия о составе некоторых химических соединений, какие до него еще вовсе не были известны...»¹.

В биографии Салы много неясного. Известно, что он родился в старинном итальянском городке Виченце, недалеко от Венеции, в 1576 г.

Отец и дед Салы были ткачами. Дед вместе со старшим сыном и двумя дочерьми переселился в Женеву и стал там кальвинистом. Его младший сын, Бернардино, отец Салы, остался в Виченце, но за связь со своими женовскими родственниками (Женева в ту пору была оплотом кальвиниз-



Анджело Сала (1576—1637).

ма) дважды предстал перед судом инквизиции. Обвинение в ереси с него сняли, и в 1607 г. с разрешения инквизиции он смог вместе с сыном покинуть Италию и поселиться в Женеве. Можно только строить догадки относительно того, где Сала получил свое первоначальное образование. Скорее всего, он учился в соседних с его родной Виченцей городах — Падуе и Венеции.

Сала принадлежал к числу врачей-ученых и обладал энциклопедическими познаниями. Он много странствовал. В течение десяти лет (с 1602 по 1612) Сала побывал во многих городах Германии, Швейцарии, Голландии, Чехии. В некоторых городах он жил по многу лет, занимаясь медицинской практикой.

С 1612 по 1617 гг. Сала работал в Гааге, где лечил больных, обучал медицине студентов, издавал книги.

К XVI в. во многих европейских городах существовали университеты. Однако постоянная нехватка средств заставляла профессоров искать поддержку влиятельных лиц. Наиболее видные ученые, в том числе и врачи, служили у коро-

лей и герцогов. Такой же была и судьба Салы.

В 1617 г. граф Ольденбургский Антон Гюнтер предложил Сале на три года стать врачом в своем графстве на севере Германии. В 1620 г. Сала с блестящими рекомендациями графа покидает Ольденбург и переезжает в Гамбург, где живет до 1625 г., занимаясь, главным образом, врачебной практикой. Среди его трудов, написанных там, наиболее значительны «Хризология» (1620) и «Природа, свойства и применение купоросного спирта» (1625).

В 1625 г. Салу пригласил к себе личным врачом герцог Мекленбургский Иоганн Альбрехт II, слышавший меценатом и большим поклонником химии. Вместе с должностью врача Сала получил неплохие условия и для научной работы. Это был наиболее плодотворный период деятельности Салы, продолжавшийся почти до самой его смерти.

Чтобы оценить значение Салы как врача и химика, нужно напомнить о состоянии химии и медицины в его время. В медицине наиболее влиятельными были два направления. Одно из них связывалось с воззрениями классика античной медицины Клавдия Галена (129—201), развившего гуморальную теорию Гипократа о гармоническом сочетании крови, слизи, желтой и черной желчи в организме человека, нарушение правильного смешения которых вызывает болезнь.

Учение Галена сыграло важную роль в систематизации знаний античных медиков. Однако суеверие и дикость некоторых его предисаний («боль в кишечнике исчезнет, если больной выпьет воду, в которой мыл ноги») поражала не одно поколение врачей.

Второе направление в медицине связывалось с име-

¹ Мейер Э. История химии от древнейших времен до настоящих дней. СПб., 1899, с. 66.



Химическая лаборатория XVII в. С картины фламандского художника Д. Тенирса Младшего.

нем Теофраста Парацельса (1493—1541), одного из родоначальников иатрохимии (лечебной химии).

Парацельс выступил против слепого подчинения авторитетам древности, выдвигая в качестве основы знания опыт, а опыт Парацельс видел прежде всего в результатах исследований в химической лаборатории. Совершающиеся в организме человека процессы он считал химическими и химию рассматривал как основную область знания врача. Центральное место в медицинской системе Парацельса занимали три начала (сера, ртуть и соль), из которых состоит организм (сера — душа, ртуть — дух, соль — тело). Так или иначе, но химия, таким образом, была призвана для исследования причин болезней и приготовления лекарств².

Борьба между сторонниками Парацельса и Галена была

долгой. Какое же место в этой борьбе занимал Сала? Ясный, казалось бы, ответ дает книга цюрихского профессора Г. Лафатера «Защита медицины Галена от клеветы Анджело Салы, практикующего химика», которая вышла в Ганновере в 1610 г., где автор обрушивается с яростной критикой на представителей «спагирического искусства» (т. е. сторонников применения фармацевтических препаратов): Парацельса, Салу и других, как он говорит, «псевдохимиков». Однако в труде соотечественника Лафатера, врача из Женевы Ж. Манже «Фармацевтико - медицинская библиотека» мы находим противоположную точку зрения: там Сала причисляется к последователям Галена.

Вряд ли можно, на наш взгляд, отнести Салу к сторонникам того или иного направления в медицине. Его позицию,

скорее всего, можно охарактеризовать как позицию ученого-практика, не принимающего на веру теории. Собственные солидные познания позволяли ему критически относиться как к учению Галена, так и Парацельса. Сала, например, считал, что химия и медицина — отдельные науки, хотя химия может быть полезной медицине при изготовлении лекарств. В то же время он не только придавал важное значение растительным веществам как лечебным средствам, но и начал химический анализ этих веществ.

Все вещества, которыми занимается химия, Сала подразделял на растительные, животные и минеральные. Каждое вещество, по мысли Салы, состоит из трех элементарных субстанций: горючей, текучей и жароустойчивой. Этим субстанциям соответствуют три элемента (основных начала): сера, ртуть и соль. В данном случае Сала следует Парацельсу, но делает значительный шаг вперед в понимании процесса горения: «Жирность или горючую субстанцию вещей и все, что в них горит, называют

²О Галене и Парацельсе см.: Политыко С. Д. «Кто сам себе быть может господином...» — «Природа», 1978, № 3.

сульфуром, или серой³. Согласно Сале, в природе существует только один сульфур, который можно подразделить по господствующим в нем субстанциям. Причем виды сульфуров находятся в прямом соответствии с подразделением веществ вообще. Так, Сала различает сульфур минеральный, образующий при горении белый дым, сульфур растительный и сульфур животный, которые горят с образованием черного с копотью дыма⁴; при этом в любом сульфуре непременно должно присутствовать вещество, которое он называл «огонь растворюющим».

Гораздо позже Салы Г. Шталь (1659—1734), основоположник флогистонной теории, заключил из своих опытов, что составной частью серы (как и угля) является «горючее начало», флогистон, удаляющийся из них при горении или окислении. Однако в отличие от Шталь Сала считал, что огонь «несет нечто материальное» и при горении не происходит «потерь вещества». Таким образом, в трудах Салы мы видим первую критику флогистонной теории. Неудивительно, что Р. Капобус относил «эклетику» Салу к той группе иатрохимиков, которая освободилась от оков учений Парацельса и

Галена и в своих воззрениях перешагнула даже и флогистонную теорию⁵.

Точки зрения Парацельса на три основных начала веществ Сала придерживался не всегда. Так, в трактате «Сахарология» (1637) он утверждал, что сахар состоит из воды, масла, соли и земли. Отметим также, что «Сахарология» была первым обширным трудом, полностью посвященным проблеме получения сахара из тростника. Считается, что именно в этой книге Сала впервые приоткрыл завесу над тайной приготовления рафинада из сахара-сырца — он описал использование в этом процессе известковой воды и белка.

Другая область химии, в которой Сала оставил свой след, касалась растворителей, растворов и химических преобразований в растворах. В трактате «О составе купоросов» (1609) Сала описывает получение медного купороса из меди, «серного спирта» и воды. При разложении «искусственного» медного купороса Сала находит те же компоненты и то же их соотношение, что использовалось для его синтеза.

Сала не соглашался с мнением Парацельса о превращаемости воды. Он писал в «Гидрологии» (1633) о существовании «только одной воды в целом мире». Если вода, взятая из разных мест, кажется неодинаковой, то причиной тому «случайные примеси». Абсолютно чистой воды нет нигде, и всегда можно отделить «зем-

Химическая лаборатория XVI в. С картины фламандского художника Я. Страдана.

«Колдовская кухня» XVII в. Гротескная картина голландского художника П.-Я. Брейгеля Младшего.

ную часть». Сала считал фантазией превращение воды в «земную каменную субстанцию». Его тонкая наблюдательность становится особенно очевидной, если вспомнить, что многие ученые XVI—XVIII вв. и среди них такие, как Р. Бойль, И. Ньютон и А. Маргграф, еще твердо верили в превращаемость воды. Только количественные анализы, проведенные А. Лавуазье в 1770 г., положили конец этому заблуждению.

Сала не был свободен от суеверий своей эпохи. Он был уверен, что небесные светила играют большую роль в здоровье человека. Эпидемии чумы связывал с ядом, который будто бы распространяет Марс. А иногда он говорил о лекарствах, полученных им якобы «благодаря волшебству или дьявольскому искусству».

Первое собрание основных трудов Салы вышло во Франкфурте в 1647 г. — через 10 лет после его кончины — под заглавием «Все существующие медико-химические труды вичентинца Анджело Салы, блистательнейшего химика и архитра Мегалополитанского», а еще через три года собрание работ Салы вышло в Риме.

Жизнь Салы — это типичный пример судьбы не гения, но ученого кропотливого и, бесспорно, талантливого.

³ Salae A. *Hydrolaologia*. Rostock, 1633, S. 56. Под сульфуром и меркурием алхимики понимали, однако, не чистую серу или ртуть. По замечанию историка науки Ф. Даннемана, обыкновенная сера и сульфур алхимиков относились друг к другу приблизительно так же, как каменный уголь и углерод.

⁴ Salae A. *Chrysologia*. Hamburgi, 1622, p. 12.

⁵ Capobus R. Angelus Sala. *Leibartz des Herzogs Johann Albrecht II von Mecklenburgs-Gustrow. Seine wissenschaftliche Bedeutung als Chemiker im XVII Jahrhundert*. B., 1933, S. 29.

Художник П. Г. АБЕЛИН
Художественные редакторы:
Л. М. БОЯРСКАЯ, Д. И. СКЛЯР
Корректоры:
Т. М. АФОНИНА, Т. Д. МИРЛИС
Адрес редакции
117049 Москва, Б-49,
Мароховский пер., 26.
Тел. 237-50-30, 237-22-97.

Сдано в набор 28.XII—1978 г.
Подписано к печати 12/II—1979 г.
Т-01441.
Формат бумаги 70×100 1/16.
Офсет
Усл.-печ. л. 10,4 Уч.-изд. л. 14,1.
Бум. л. 4
Тираж 85 000 экз. Зак. 3101.

Чеховский полиграфический комбинат Союзполиграфпрома Государственного комитета СССР по делам издательства, полиграфии и книжной торговли. г. Чехов, Московской области.



Цена 50 коп.
Индекс 70707

