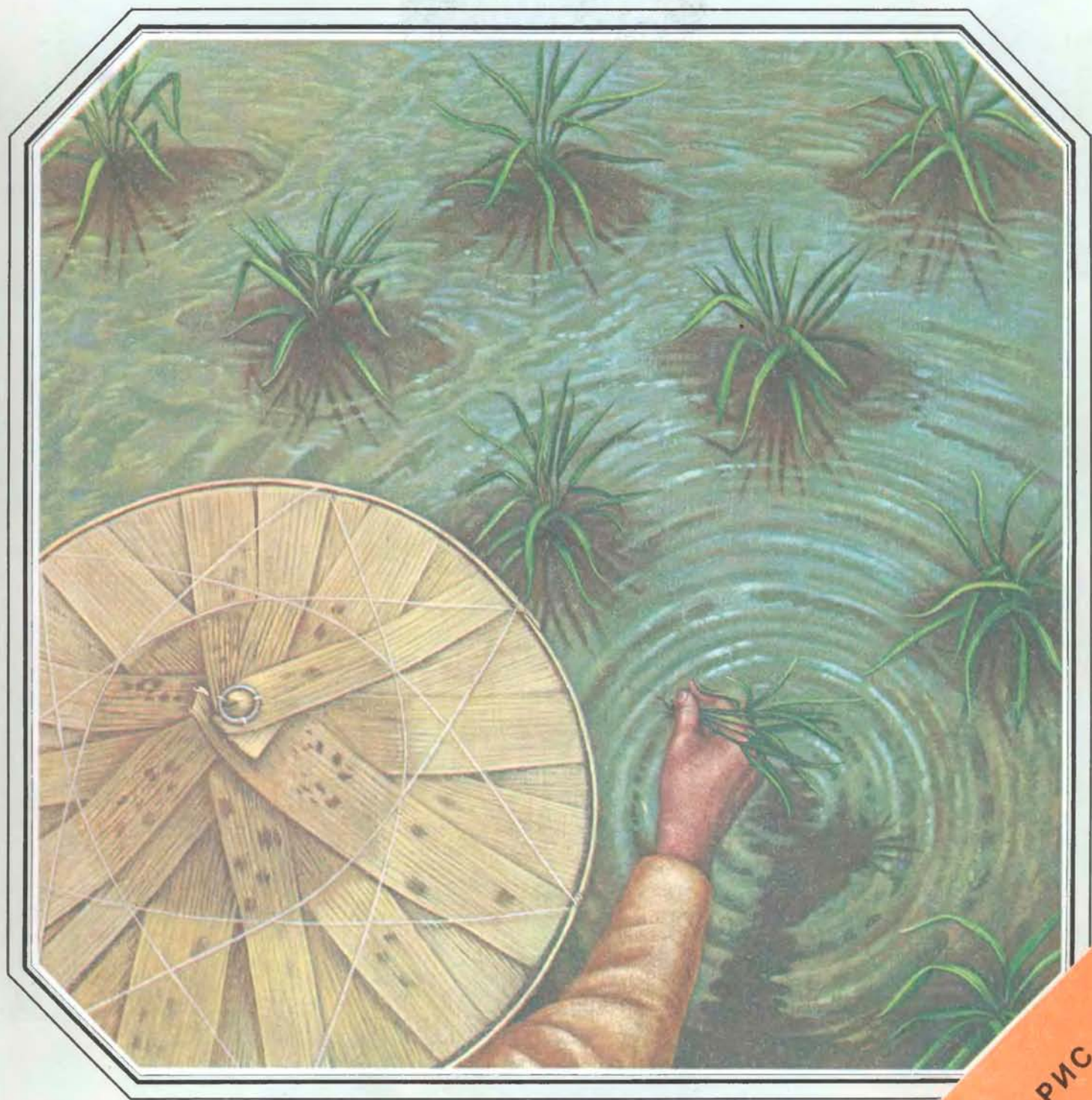


В МИРЕ НАУКИ

SCIENTIFIC
AMERICAN

Издание на русском языке



Март **3** 1984

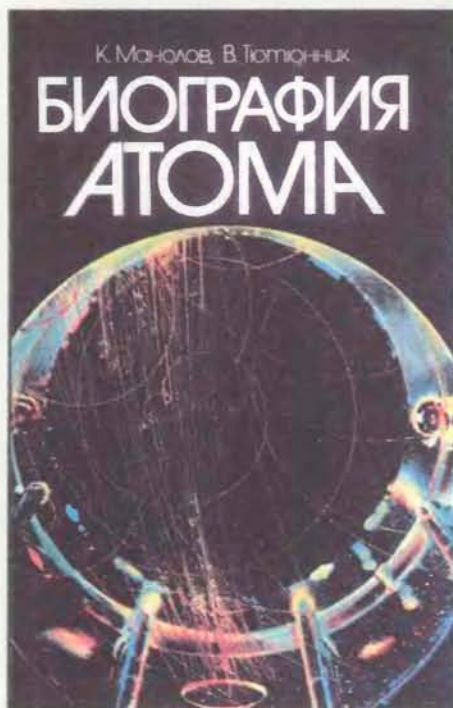
РИС

Издательство МИР предлагает:

Манолов К., Тютюнник В.

БИОГРАФИЯ АТОМА

Перевод с болгарского



В книге в «романизованной» форме рассказана история открытия строения атома, первых опытов по овладению атомной энергией. Большое внимание уделено биографиям ученых, работавших в этой области. Чита-

тель как бы побывает в лабораториях выдающихся ученых-атомщиков и сможет проследить за их творческим процессом, ведущим к открытиям.

Для широкого круга читателей.

1984, 15 л. Цена 1 р. 10 коп.



В МИРЕ НАУКИ

Scientific American · Издание на русском языке

ИЛЛЮСТРИРОВАННЫЙ ЖУРНАЛ

ПЕРЕВОД С АНГЛИЙСКОГО · ВЫХОДИТ 12 РАЗ В ГОД · ИЗДАЕТСЯ С 1983 ГОДА

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР» МОСКВА

№ 3 · МАРТ 1984

В номере:

СТАТЬИ

- 4 **Рис** *М. С. Сваминатан*
 Это травянистое растение наряду с пшеницей и кукурузой является одной из трех основных сельскохозяйственных культур, обеспечивающих людей пищей. Благодаря генетическим исследованиям селекционеры сумели значительно повысить его урожайность
 (Scientific American, January 1984, Vol. 250, No. 1)
- 16 **Извержение Эль-Чичона и его воздействие на атмосферу Земли** *Майкл Р. Рампино, Стивен Селф*
 Сравнительно небольшое извержение вулкана Эль-Чичон в Мексике, произошедшее в 1982 г., привело к выбросу в стратосферу множества мелких капель серной кислоты, образовавших туманную пелену. Плотность этого вулканического облака оказалась самой высокой со времени извержения Кракатау в 1883 г.
 (Scientific American, January 1984, Vol. 250, No. 1)
- 28 **Столкновения атомных ядер при высоких энергиях** *Уильям К. Мак-Харрис, Джон О. Расмуссен*
 В настоящее время физики научились бомбардировать мишени тяжелыми ядрами, летящими почти со скоростью света. Среди осколков, рождающихся в столкновениях ядер, — аномалоны, таинственные объекты, которые вновь сталкиваются с ядрами гораздо раньше, чем следовало бы ожидать
 (Scientific American, January 1984, Vol. 250, No. 1)
- 38 **Кольская сверхглубокая скважина** *Е. А. Козловский*
 Забой этой самой глубокой в мире скважины достиг 12 км. Опыт ее бурения с применением оригинальной технологии дал уникальные результаты в исследовании земной коры
- 50 **Однополые ящерицы** *Чарлз Дж. Коул*
 Популяции ящериц-бегунов на юго-западе США, в Мексике и Южной Америке состоят только из самок. В отличие от других позвоночных они размножаются путем партеногенеза, т.е. без оплодотворения
 (Scientific American, January 1984, Vol. 250, No. 1)
- 58 **Регуляция биосинтеза рибосом** *Масаясу Номура*
 Клеточные органеллы, на которых происходит синтез белка, построены из трех разных РНК и пятидесяти двух белков. Каким образом регулируется сборка рибосом в соответствии с нуждами клетки?
 (Scientific American, 1984, Vol. 250, No. 1)
- 72 **Упаковка шаров** *Н. Дж. А. Слоэн*
 Как плотнее всего уложить в пространстве одинаковые шары? В решении этой задачи достигнуты большие успехи, особенно для 24-мерного пространства. Полученные результаты могут найти применение в области передачи цифровых сигналов
 (Scientific American, January 1984, Vol. 250, No. 1)
- 84 **Изобретение воздушного шара и рождение современной химии** *Артур Ф. Скотт*
 Первые полеты человека на воздушном шаре, которые состоялись 200 лет назад во Франции, стали возможны благодаря фундаментальным исследованиям свойств газов, выполненным выдающимися химиками того времени
 (Scientific American, January 1984, Vol. 250, No. 1)

РУБРИКИ

- 3 Об авторах
 15 50 и 100 лет назад
 57, 100, 108 Наука и общество
 70 Книги
 94 Наука вокруг нас
 102 Занимательный компьютер
 111 Библиография

SCIENTIFIC AMERICAN

BOARD OF EDITORS

Gerard Piel
PUBLISHER

Dennis Flanagan
EDITOR

Brian P. Hayes
ASSOCIATE EDITOR

Philip Morrison
BOOK EDITOR

John M. Benditt

Peter G. Brown

Michael Feirtag

Robert Kunzlg

Diana Lutz

Jonathan B. Piel

John Purcell

James T. Rogers

Armand Schwab, Jr.

Joseph Wisnovsky

Samuel L. Howard
ART DIRECTOR

Richard Sasso
PRODUCTION MANAGER

George S. Conn
GENERAL MANAGER

© 1983 by Scientific American, Inc.

Товарный знак *Scientific American*, его текст и шрифтовое оформление являются исключительной собственностью Scientific American, Inc. и использованы здесь в соответствии с лицензионным договором

В МИРЕ НАУКИ

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР
С. П. Капица

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА
Л. В. Шепелева

НАУЧНЫЕ РЕДАКТОРЫ
З. Е. Кожанова О. К. Кудрявов
Т. А. Румянцева А. М. Смотров
А. Ю. Краснопевцев

ЛИТЕРАТУРНЫЕ РЕДАКТОРЫ
Л. И. Леонова
М. М. Попова

ХУДОЖЕСТВЕННЫЙ РЕДАКТОР
С. А. Стулов

ЗАВЕДУЮЩАЯ РЕДАКЦИЕЙ
И. В. Лунёва

ТЕХНИЧЕСКИЙ РЕДАКТОР
Л. П. Чуркина

КОРРЕКТОР
Р. Л. Вибке

ОФОРМЛЕНИЕ ОБЛОЖКИ,
ТИПОГРАФИКА РУССКОГО ИЗДАНИЯ,
МАКЕТ СМЕННЫХ ПОЛОС:
М. Г. Жуков

ТИТУЛЬНАЯ НАДПИСЬ,
ШРИФТОВЫЕ РАБОТЫ:
В. В. Ефимов

АДРЕС РЕДАКЦИИ
129820, Москва, ГСП
1-й Рижский пер., 2

ТЕЛЕФОН РЕДАКЦИИ
286.2588

© Перевод
на русский язык и оформление,
«Мир», 1984

На обложке



РИС

На первой странице обложки изображено, как вручную сажают рис на затопленном водой поле (см. статью М. С. Сваминатана «Рис» на с. 4). Отличительная особенность растений риса — развитая аэренхима, или воздухоносная ткань, по которой воздух поступает от листьев к корням. Благодаря этому приспособлению рис способен расти на залитой водой почве. Некоторые разновидности риса произрастают в воде глубиной до 5 м; стебли у них удлиняются очень быстро — на 25 см в день. Возделываемые в Азии многочисленные сорта риса относятся к виду *Oryza sativa*. Рис — основная зерновая культура для более чем 2 млрд. человек. Рисовые поля занимают на земном шаре 145 млн. га, однако даже такая огромная площадь не смогла бы обеспечить потребностей человечества в рисе, если бы в последние годы урожаи не были существенно увеличены благодаря успехам селекционеров, сумевших вывести высокоурожайные сорта, устойчивые к возбудителям заболеваний и насекомым-вредителям.

Иллюстрации

ОБЛОЖКА: Teresa Fasolino

СТР.	АВТОР/ИСТОЧНИК	СТР.	АВТОР/ИСТОЧНИК	СТР.	АВТОР/ИСТОЧНИК
4	Jurgen Schmitt, The Image Bank		Michael Matson, National Oceanic and Atmospheric Administration, and Todd Pink	67, 68	Ian Worpole
6	Patricia J. Wynne			72—76	Gabor Kiss
7, 8	Andrew Tomko			77, 78	N. J. A. Sloane, Bell Laboratories, and Gabor Kiss
9	Charles Moore, Black Star (<i>вверху</i>); Andrew Holbrooke, Black Star (<i>внизу</i>)	24	Todd Pink	79	John Horton Conway, University of Cambridge, N. J. A. Sloane, Bell Laboratories, and Gabor Kiss
10	Andrew Tomko	29, 30	Lawrence Berkeley Laboratory		
11	Patricia J. Wynne	31—33	Walken Graphics		
12, 13	Andrew Tomko	34	Lawrence Berkeley Laboratory		
17	René Canul, Comisión Federal de Electricidad (<i>вверху</i>); Brian R. Wolff (<i>внизу</i>)	35, 36	Walken Graphics	80	N. J. A. Sloane, Bell Laboratories, and Gabor Kiss
18	Brian R. Wolff (<i>вверху</i>) Todd Pink (<i>внизу</i>)	39	А. А. Чумичев	81	John Leech, University of Stirling, and Gabor Kiss
19	Todd Pink	40—44	С. А. Стулов	85—87	The Granger Collection Colonel Richard Gimbel, Aeronautics History Collection, U. S. Air Force Academy Library
20	Michael Matson, National Oceanic and Atmospheric Administration (<i>вверху</i>); Arlin J. Krueger, Goddard Space Flight Center (<i>внизу</i>)	45	А. А. Чумичев		
21	Todd Pink	46	С. А. Стулов		
22	Alan Robock, University of Maryland,	47	А. А. Чумичев		
		48	С. А. Стулов		
		49	А. А. Чумичев		
		51—55	Patricia J. Wynne		
		59—65	Ian Worpole		
		66	Michael Beer, Johns Hopkins University, Theo Koller, Swiss Federal Institute of Technology, and Masayasu Nomura, University of Wisconsin at Madison	89—92	The Granger Collection
				95	Jearl Walker (<i>вверху и внизу</i>), David A. Katz (<i>в середине</i>)
				96—99	Michael Goodman

Об авторах

М. S. Swaminathan (М. С. СВАМИНАТАН «Рис») родился на юге Индии в г. Кумбаконам; учился в Сельскохозяйственном колледже в г. Коимбатур, который окончил со степенью бакалавра. Генетикой начал заниматься в Индийском сельскохозяйственном исследовательском институте (ИСИИ), затем работал в Нидерландах, а также в Кембриджском университете, где в 1952 г. получил степень доктора философии. Вел научную работу в Висконсинском университете. В 1954 г. вернулся в Индию в ИСИИ. В 1972 г. был назначен генеральным директором Индийского совета по сельскохозяйственным исследованиям, этот пост он занимал вплоть до 1979 г., когда стал заместителем министра сельского хозяйства Индии. С 1982 г. Свамнатан — генеральный директор Международного научно-исследовательского института риса на Филиппинах.

Michael R. Rampino, Stephen Self (МАЙКЛ Р. РАМПИНО, СТИВЕН СЕЛФ «Извержение Эль-Чичона и его воздействие на атмосферу Земли») — геологи, сотрудничающие в изучении вулканических извержений и их воздействия на мировой климат. Рампино получил степень бакалавра в Колледже Хантера, над докторской диссертацией в области геологических наук работал в Колумбийском университете. С 1978 по 1980 г. принимал участие в исследованиях по программе Национальной академии наук США, проводимых в Годдардовском институте космических исследований НАСА. В 1980 г., продолжая работу в Годдардовском институте, стал научным сотрудником геологического факультета Колумбийского университета. В Годдардовском институте занимается разработкой модели глобального климата и прогнозированием воздействия эксплозивных вулканических извержений на атмосферу. Селф родился в Англии; степень бакалавра получил в Лидском университете. Изучение геологии продолжал в Имперском колледже науки и техники, где получил степень доктора философии в области геологии. В настоящее время работает на геологическом факультете Техасского университета в Арлингтоне.

Wm. C. McHarris, John O. Rasmussen (УИЛЬЯМ К. МАК-ХАРРИС, ДЖОН О. РАСМУССЕН «Столкновение атомных ядер при высоких энергиях») — физики-ядерщики. Мак-Харрис окончил Оберлин-колледж и затем Калифорнийский университет в Беркли. Ученая степень доктора философии в области ядерной физики была присуждена ему в Беркли в 1965 г. После это-

го стал сотрудником Мичиганского университета, где в настоящее время он профессор химии и физики. Расмуссен получил степень бакалавра в Калифорнийском технологическом институте, а доктора философии в области химии — в Беркли. В 1952 г. стал сотрудником Калифорнийского университета в Беркли и работает там до сих пор. Он был также приглашенным профессором в Нобелевском институте физики в Стокгольме и старшим научным сотрудником Национального научного фонда в Институте Нильса Бора в Копенгагене.

ЕВГЕНИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ КОЗЛОВСКИЙ («Кольская сверхглубокая скважина») — ученый в области минерально-сырьевых ресурсов, доктор наук, профессор. Многие годы Е. А. Козловский возглавлял геологоразведочные организации на Дальнем Востоке СССР. Является первооткрывателем ряда оловорудных месторождений. За разведку крупного рудного района удостоен звания лауреата Ленинской премии. С 1965 г. работал начальником технического управления Министерства геологии РСФСР, затем директором Всесоюзного научно-исследовательского института экономики минерального сырья и геологоразведочных работ. С 1975 г. министр геологии СССР. Возглавляет ряд комиссий по природным ресурсам СССР и Межведомственный совет СССР по проблеме «Изучение недр Земли и сверхглубокое бурение». Под его руководством осуществляется Программа сверхглубокого бурения на территории Советского Союза. Он — главный редактор готовящихся к изданию монографии о Кольской сверхглубокой скважине и первой в мире «Горной энциклопедии». В настоящее время — председатель оргкомитета по подготовке и проведению XXVII сессии Международного геологического конгресса, которая состоится в Москве в августе 1984 г.

Charles J. Cole (ЧАРЛЗ ДЖ. КОУЛ «Однополые ящерицы») — сотрудник отдела герпетологии Американского музея естественной истории в Нью-Йорке. Степень бакалавра получил в Уэслианском университете, магистра — в Канзасском университете, степень доктора философии — в Аризонском университете, после чего занял должность хранителя музея. В экспериментах, описанных в данной статье, принимал участие и его сын — Джеффри А. Коул, студент Университета шт. Луизиана в Батон-Руж.

Masayasu Nomura (МАСАЯСУ НОМУРА «Регуляция биосинтеза рибосом»)

пишет о себе: «Получив среднее образование в Японии после второй мировой войны, я занялся микробиологией и химией ферментативных процессов в Токийском университете, намереваясь работать в промышленности. Однако очень скоро понял, что меня больше увлекают сами фундаментальные исследования, чем их применение на практике. В 1957 г. после защиты докторской диссертации приехал в США, где три года вел самостоятельную научную работу в лабораториях различных университетов. В 1960 г. я вернулся в Японию и проработал три года ассистентом в Институте исследования белков при Университете г. Осака. В конце концов я решил окончательно переехать в Соединенные Штаты. Там я вначале был сотрудником факультета генетики Висконсинского университета в Мадисоне, а в 1970 г. перешел в Институт по изучению ферментов при Висконсинском университете».

N. J. A. Sloane (Н. ДЖ. А. СЛОЭН «Упаковка шаров») — сотрудник фирмы Bell Laboratories. Родился в Уэльсе, учился в Австралии и США. Степень бакалавра получил в Мельбурнском университете, а степень магистра и доктора философии в области электротехники — в Корнеллском университете. В 1967 г. Слоэн стал ассистентом кафедры электротехники в Корнеллском университете; через два года перешел в фирму Bell Laboratories. Научная работа Слоэна связана с теорией кодирования, теорией связи и комбинаторной математикой. Увлекается альпинизмом.

Arthur F. Scott (АРТУР Ф. СКОТТ «Изобретение воздушного шара и рождение современной химии») — был профессором химии в Колледже Рида. В 1919 г. окончил Колледж Колби со степенью бакалавра. Степень доктора философии в области химии получил в Гарвардском университете в 1924 г. В Колледж Рида пришел в 1923 г., а тремя годами позже перешел в Институт Райса. В 1937 г. вернулся в Колледж Рида, где впоследствии возглавил отделение химии. На этой должности находился до 1965 г. Во время второй мировой войны исполнял обязанности президента колледжа. Его первые научные изыскания были связаны с определением атомных масс химических элементов. В 50-х годах он заинтересовался химией радиоактивных элементов, принимал участие в организации первой радиохимической лаборатории в Портленде. В последние годы жизни интересы Скотта сосредоточились на истории химии. После его смерти в 1982 г. осталась рукопись, которая легла в основу данной статьи. Она была подготовлена к публикации учеником Скотта Джоэлем Кэйзером, сотрудником Калифорнийского университета в Дейвисе.



Рис

Это травянистое растение наряду с пшеницей и кукурузой является одной из трех основных сельскохозяйственных культур, обеспечивающих людей пищей.

Благодаря генетическим исследованиям селекционеры сумели значительно повысить его урожайность

М. С. СВАМИНАТАН

СРЕДИ основных зерновых культур рис выделяется тем, что он выращивается исключительно для питания людей. И в самом деле, для 1,6 млрд. человек рис составляет половину рациона питания, а еще для 400 млн. — не менее четверти. Естественно, что под рис отводятся огромные посевные площади — около 145 млн. га, т.е. 11% всей пахотной земли. В условном году, который закончился 31 июля 1982 г., был собран урожай риса в 410,9 млн. т. Однако он мог быть гораздо ниже и немало людей голодали бы, если бы не ряд выдающихся достижений селекционеров, благодаря которым появились высокоурожайные сорта, устойчивые к болезням и насекомым-вредителям.

Рис — однолетнее травянистое растение, он принадлежит к тому же семейству, что и ячмень, овес, рожь и пшеница, и во многом на них похож. Рис относится к роду *Oryza*, эволюционные корни которого уходят в столь глубокую древность, что достоверно проследить их, вероятно, никогда не удастся. Мой коллега Т. Чэнг из Международного научно-исследовательского института риса на Филиппинах (МНИИР), предполагает, что родиной риса был древний суперконтинент Гондвана. Когда Гондвана разделилась и образовались Африка, Антарктида, Австралия, Океания, Южная Америка, Южная и Юго-Восточная Азия, виды рода *Oryza* расселились по географически разделенным территориям.

Возделываются два вида риса, оба они включают множество сортов. В Азии произрастает *O. sativa*, а в Западной Африке — *O. glaberrima*. К роду *Oryza* принадлежат также 20 диких видов, которые распространены в Азии, Африке, Австралии, Центральной и Южной Америке. Археологические

данные свидетельствуют о том, что *O. sativa* начали выращивать в Азии более 7000 лет назад; *O. glaberrima* в Африке стали культивировать несколько позже.

Рис растет в самых разнообразных условиях, в этом отношении в царстве растений ему трудно найти соперника. Его родина — теплые влажные тропики, где вследствие муссонных дождей и наводнений по крайней мере часть года почва покрыта водой. В результате распространения человеком и естественного расселения область произрастания риса расширилась и ныне охватывает территорию от берегов реки Амур (53° с.ш.) на границе между СССР и КНР до центральных районов Аргентины (40° ю.ш.). Рис возделывают в холодных горных районах Непала и Индии и в знойных пустынях Пакистана, Ирана и Египта. В некоторых засушливых районах Азии, Африки и Латинской Америки растет так называемый суходольный рис, а в Бангладеш, Бирме, Восточной Индии, Таиланде и Вьетнаме существуют особые водные сорта, которые разрастаются во время наводнений, когда слой воды достигает 3 м. Рис хорошо адаптируется к различным условиям и в районах с неблагоприятными (засоленными, солонцеватыми или кислыми сульфатными) почвами чувствует себя лучше, чем другие зерновые культуры. Учитывая эти особенности, Продовольственная и сельскохозяйственная организация ООН в своем докладе «Ресурсы Земли для населения в будущем» предсказала, что в грядущие десятилетия в ряде стран рисосеяние будет расширяться.

Методы выращивания риса варьируют весьма широко: в США хозяйство высоко механизировано, а в Юго-Восточной Азии используется в основном ручной труд. Средний урожай риса

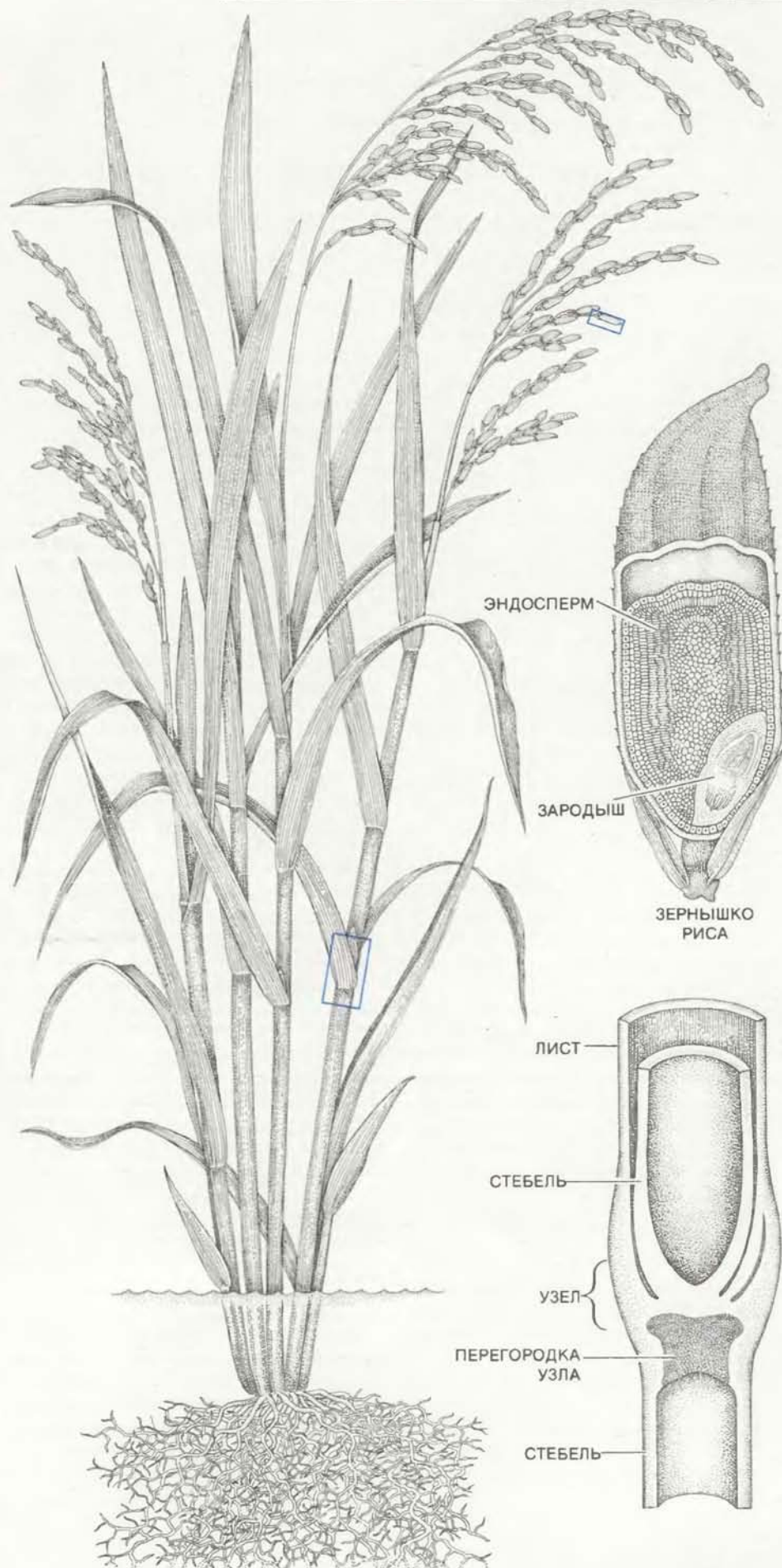
также варьирует: от менее 1 т с гектара в некоторых странах Африки до более чем 6 т с гектара в Австралии, Японии, КНДР, Южной Корее и в США. В тропической Азии сбор прежде не превышал 1—1,5 т с гектара. Однако с 1960 по 1980 г. средний урожай в этом регионе возрос на 40%, а производство риса — на 60%. В Индонезии и на Филиппинах в течение этих 20 лет производство риса и производительность труда в рисоводстве увеличились больше, чем за все предшествующие 7000 лет. Сейчас Индонезия практически полностью обеспечивает свои потребности в рисе, а Филиппины, страна, которая еще несколько лет назад в большом количестве ввозила рис, теперь экспортирует порой более 100 000 т риса в год.

В чем причина таких разительных перемен? Во-первых, были созданы высокоурожайные сорта риса. Во-вторых, наметилась тенденция к научно обоснованной обработке почвы. В-третьих, весьма успешно шла борьба с заболеваниями и вредителями растений. Во многих странах Юго-Восточной Азии правительства приняли меры для улучшения ирригации, провели земельные реформы, обеспечили базу для применения удобрений, а также стали предоставлять кредиты на льготных условиях и гарантировали твердые цены. В результате этих мер в большинстве стран темпы роста в производстве риса достигли 5% в год.

Азиатский рис

За тысячи лет земледелия окультуренный азиатский вид риса *O. sativa* в соответствии с различными географическими условиями разделился на три подвида: индийский, японский (называемый также китайским) и яванский. Более детальная классификация исходит из условий среды обитания. В основном учитываются особенности почвы и обводненности местности, к которым приспособлена та или иная разновидность. Так, различают суходольный рис, произрастающий без полива в низинах и на возвышенностях, рис,

ТЕРРАСИРОВАНИЕ ПОД РИС в горных районах Азии значительно расширяет посевные площади. Здесь приведена фотография таких террас, находящихся на Филиппинах. В чеках, покрытых слоем воды 5—10 см, видны растения риса на разных стадиях развития. Рис прекрасно произрастает в воде благодаря особой системе переноса воздуха, которая доставляет кислород от побегов к корням.



РАСТЕНИЕ РИСА, срезы побега с листом и зерна. Рис относится к роду *Oryza*, данное растение принадлежит к виду *O. sativa* (азиатский рис). К этому же виду относятся 120 тыс. сортов. Культивируется также вид *O. glaberrima*.

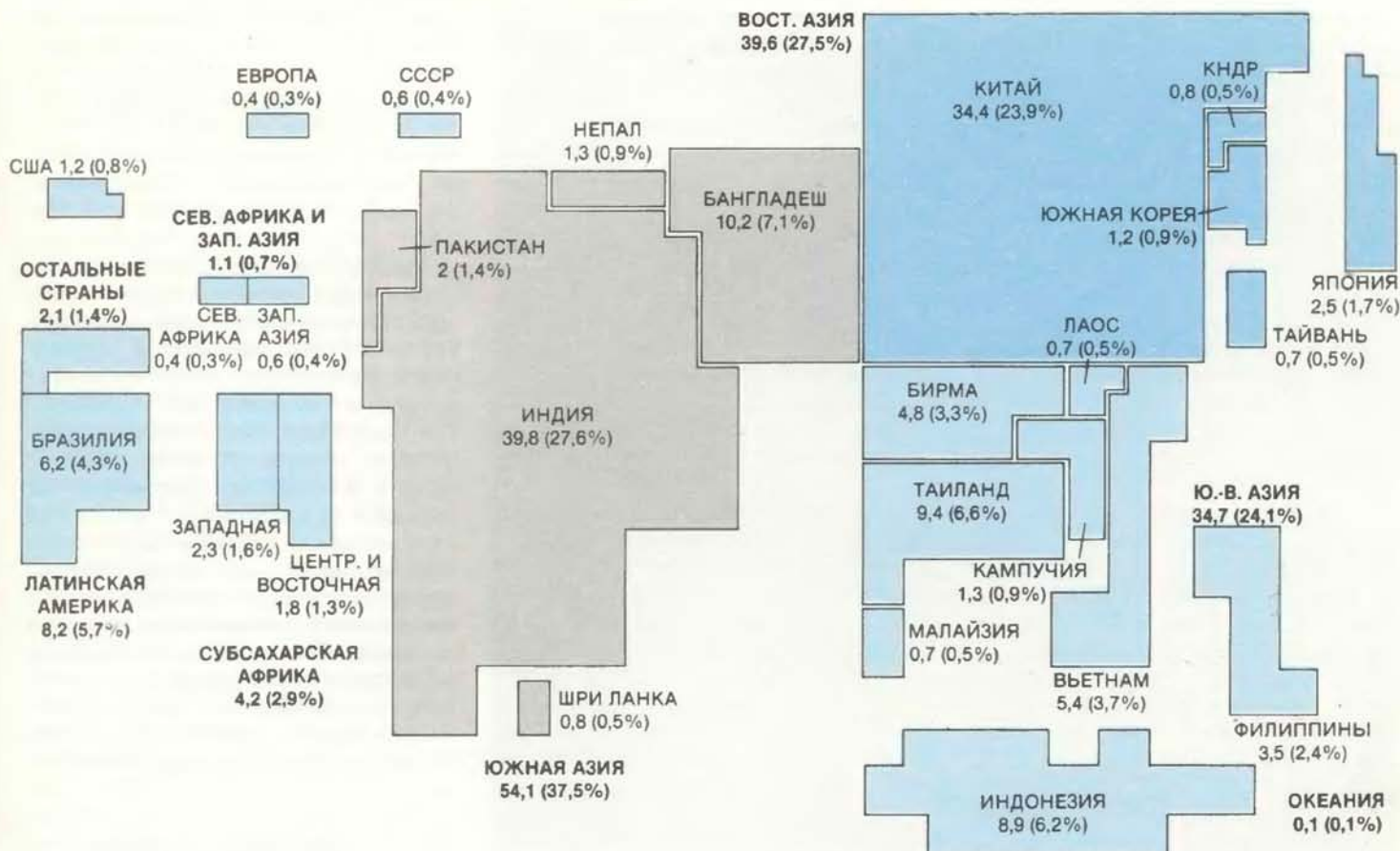
требующий орошения, и водный (или затопляемый) рис, растущий на постоянно затопленных полях. Исходно индийские сорта риса были локализованы во влажных азиатских тропиках и субтропиках, японские сорта возделывались в субтропических районах умеренной зоны, а яванские «предпочитали» экваториальную Индонезию.

Помимо разницы в адаптации к климатическим условиям три расы риса отличаются друг от друга по свойствам зерна: содержанию амилозы (амилоза — это производное крахмала), длине зерна, температуре, при которой крупа разваривается, и, наконец, по аромату и прочим вкусовым качествам. Последние определяются в основном свойствами крахмала, на который в полированном рисе приходится до 90% веса. В разных странах, однако, рис ценится по разным критериям. Жители Таиланда, например, любят зерна длинные, тонкие и прозрачные (стекловидные), из которых получается воздушное нежное блюдо. В Японии предпочитают сорта риса с короткими и толстыми зернами, которые в вареном виде более или менее твердые, так что их удобно есть с помощью палочек. В некоторых районах Пакистана и на северо-западе Индии дороже всего стоят сорта «басмати», у которых длинные, тонкие и душистые зерна.

Что касается распространения *O. sativa*, то наибольшее разнообразие сортов наблюдается в полосе, тянущейся от района индийских штатов Ассам и Мегхалая до горных хребтов Юго-Восточной Азии и юго-западного Китая. Скороспелые разновидности, которые созревают раньше, чем наступает период засухи, вероятно, возникли 10—15 тыс. лет назад у южных и северных склонов Гималаев. Затем по периферии ареалов диких однолетних предков, в основном в южных районах Гималаев и в меньшей степени на юге и юго-западе Китая, стали появляться первые однолетние формы *O. sativa*. Все ранние культивены были индийскими.

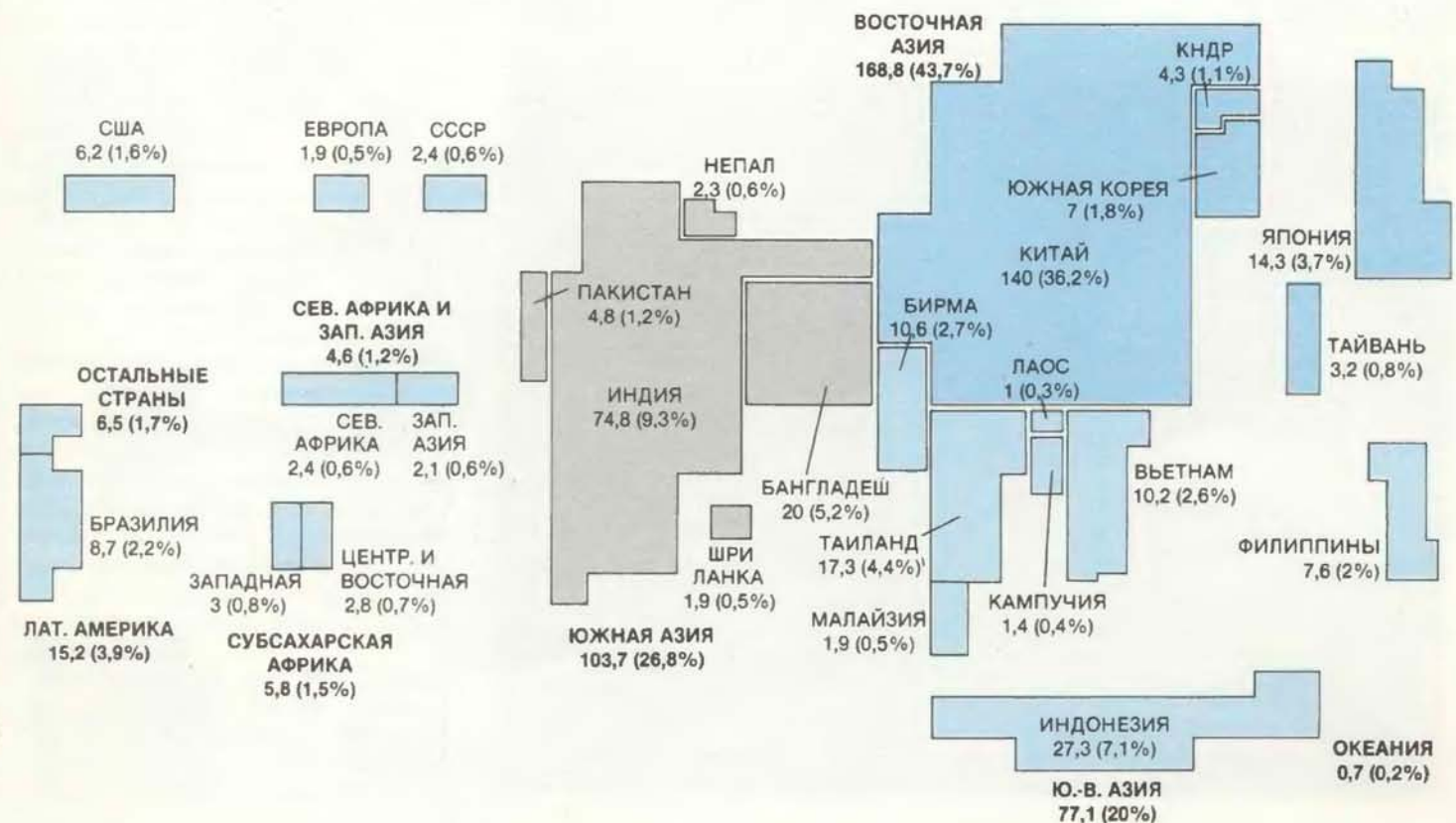
Культурные разновидности, созревая раньше своих диких предков, были лучше приспособлены к сухому изменчивому климату и давали больше семян. Вследствие этого они продвинулись на север дальше, чем многолетние формы. Усиление засушливости в области северного края Гималаев и прилегающих горных хребтов вынудило древних поселенцев в Китае мигрировать восточнее и южнее — в более влажные районы. Сопровождая людей, расселялись и растения, ускоряя тем самым процесс смены культур и становление экогенетического разнообразия.

На территории, которая ныне принадлежит КНР, вдоль притока Брахмапутры реки Сянчун от исходной тро-



ПЛОЩАДЬ РИСОВЫХ ПОЛЕЙ в странах мира. На этой схеме пространство, отведенное каждой стране, пропорциональ-

но площади (в млн. га) ее рисовых полей; указано также отношение (в %) к мировой посевной площади риса.



ПРОИЗВОДСТВО РИСА в странах мира. Цифры вне скобок — сбор риса (млн. т). В скобках указана доля каждой

страны в мировом производстве риса. Приведенные данные относятся к необрунному рису.

пической индийской расы риса произошла и сформировалась раса умеренной зоны. Обычно ее называют японской вслед за японцами, которые ввели это название в 1928 г. Однако Чэнг считает, что японский рис на самом деле следует называть китайским (keng), поскольку японцы вывезли эту разновидность из Китая. С восточного побережья южной Азии на острова Индонезии попали сорта с крупными зернами, которые со временем несколько изменились и ныне составляют самостоятельную расу — яванский рис.

Древнейшие из культурных сортов риса, оба индийские, обнаружены в восточном Китае и северной Индии. Им уже по 7000 лет. На севере Таиланда в Нон-Нок-Тха были раскопаны зерна растения, которое, вероятно, представляло собой дикий рис; они датируются 4000 г до н.э. Китайскому рису 5300 лет. Древность рисоводства широко известна в Азии, и поэтому крестьян, выращивающих рис, иногда называют «крестьянами 50 веков».

Следующая волна миграции азиатских культурных разновидностей (в ос-

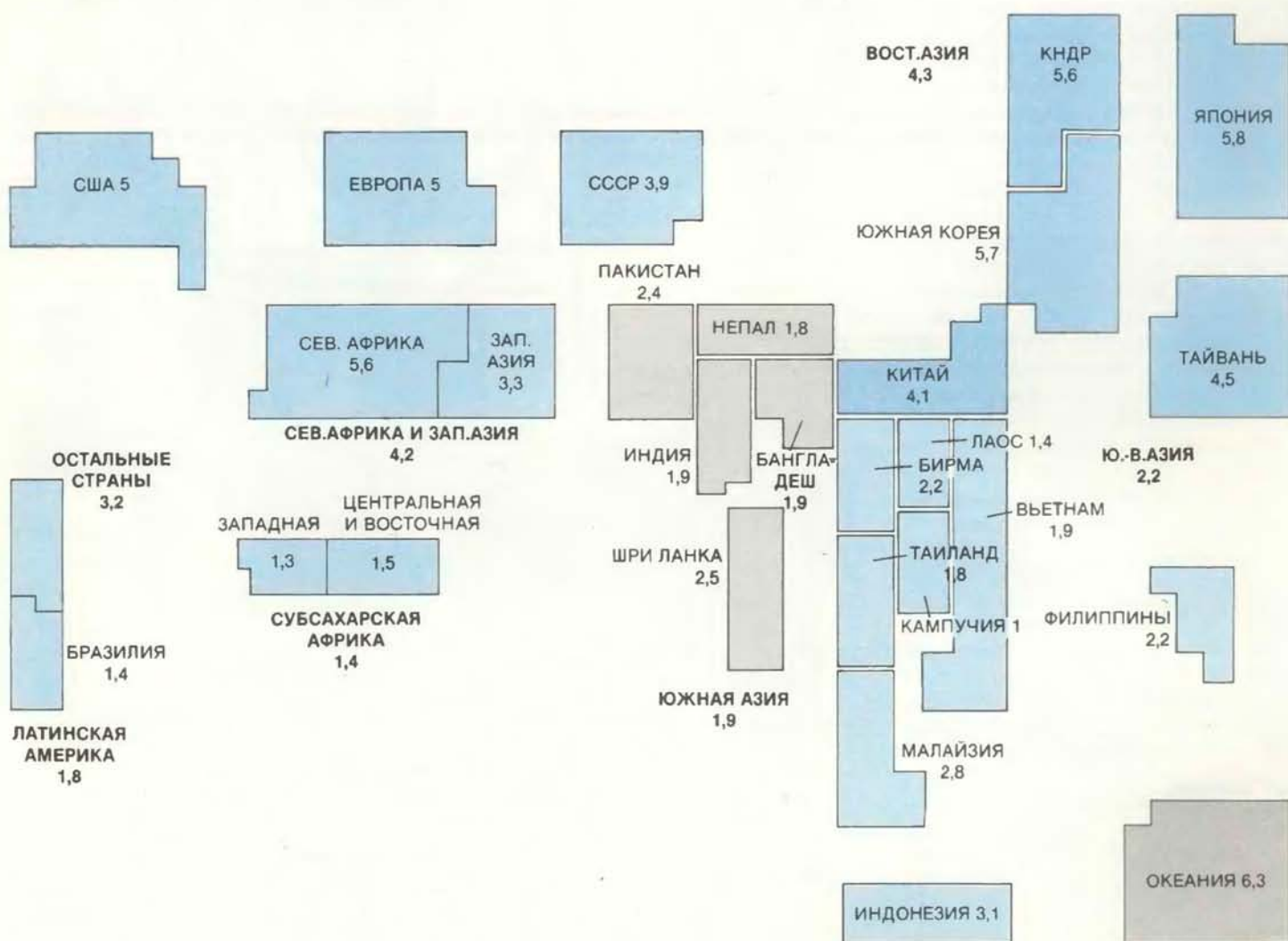
новном индийских) из Индии на Ближний Восток, в северную Африку и затем в Европу началась, вероятно, примерно 1000 лет до н.э. Рис из Индии расселился также на Мадагаскар и в восточную Африку. Многие яванские сорта были завезены на Мадагаскар из Индонезии. В западной Африке появились культивары из Европы и непосредственно из южной Азии. Большинство культурных разновидностей, растущих в Южной Америке, были завезены из европейских стран. В США рис попал из южной и восточной Азии, а также с Мадагаскара.

Я не упоминал о рисе, культивируемом в Африке (*O. glaberrima*), поскольку он никогда не имел такого экономического значения, как сорта азиатской группы (*O. sativa*). Недавно Р. Портерес из Института агрономических исследований (Париж) высказал предположение, что африканский культиген *O. glaberrima* происходит из дельты реки Нигер. Первичный центр разнообразия *O. glaberrima* находится в районе, охватывающем территорию от болот в верхнем течении Нигера почти

до самого побережья Гвинейского залива. По-видимому, рис в бассейне реки Нигер стали возделывать еще в 1500 г. до н.э., а в Гвинее на 400 лет позже. В западной Африке *O. glaberrima* является доминирующей культурой, он произрастает на затопляемых участках бассейнов рек Нигер и Сокото.

Африканский культиген и его однолетняя дикая раса *O. barthii* менее разнообразны, чем их азиатские родственники. Портерес различает у *O. glaberrima* два подвида — *vulgaris* и *humilis*, но другие исследователи полагают, что *O. barthii* и *O. glaberrima* следует считать единой группой, которую можно разделить на два экотипа — водный и суходольный.

Африканские водные культивары уступают азиатским, так как у них, видимо, генетически ограничена способность давать длинные побеги в таких условиях. Если судить по истории «одомашнивания» риса и по внутривидовому разнообразию, т.е. количеству разновидностей, можно думать, что *O. sativa* в Азии начал дифференциро-



УРОЖАЙ РИСА в разных странах (тонн с гектара). Эта и две предыдущие схемы составлены по результатам исследования А.Палакпак из Международного научно-исследова-

тельского института риса, которая провела анализ данных министерства сельского хозяйства США и Продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН.

ваться задолго до *O. glaberrima* в западной Африке.

Сохранение генофонда

В результате естественного и искусственного отбора в различных условиях путем гибридизации, расщепления и рекомбинации признаков, а также мутационного процесса произошла экогенетическая дифференциация риса. Образовавшееся таким образом множество разновидностей содержит огромный пул наследственных задатков. Все их необходимо собрать, классифицировать и сохранить, что создаст базу для селекции, которая ведется сейчас и, конечно, продолжится в будущем. С этой целью МНИИР организовал центр, который должен служить банком генетического материала риса. Полный генофонд *Oryza* складывается из трех источников. Во-первых, это дикие виды, естественные гибриды между культурными и родственными им дикими разновидностями, а также древние культивары. Вторая группа включает в себя коммерческие сорта, выродившиеся и малочисленные разновидности, а также разновидности, отличающиеся узкоспецифическими свойствами. Третий источник — разновидности, сформировавшиеся вследствие непреднамеренной либо целенаправленной деятельности человека.

Число культиваров риса оценивается в 120 тыс. Начиная с 1930 г. в Азии во всех основных рисосеющих странах велись сборы коллекций местных сортов. Эти коллекции весьма различны по размеру: если в Лаосе всего несколько сот сортов, то в КНР их 40 тыс., в Индии собрано около 25 тыс. сортов, в США более 7 тыс.

Для большинства национальных коллекций сортов риса характерен ряд общих черт. Обычно хорошо представлены основные коммерческие сорта, а малочисленных разновидностей и древних культиваров мало. В коллекциях много экземпляров-дубликатов, особенно тех неместных сортов, которые приобрели международную известность. Диких разновидностей риса собрано немного. К сожалению, холодильников для хранения семян не хватает, поэтому приходится выращивать образцы и обновлять коллекции почти ежегодно, а это приводит к появлению «метисов», потерям, путанице, наконец, к постоянной чрезмерной нагрузке персонала.

Банк генофонда риса был создан в 1961 г. Благодаря хорошо организованному взаимодействию с различными национальными центрами к 1970 г. его коллекция насчитывала 12 тыс. поступлений. С самого начала были установлены холодильники, что позволило производить обмен семенами с другими странами.

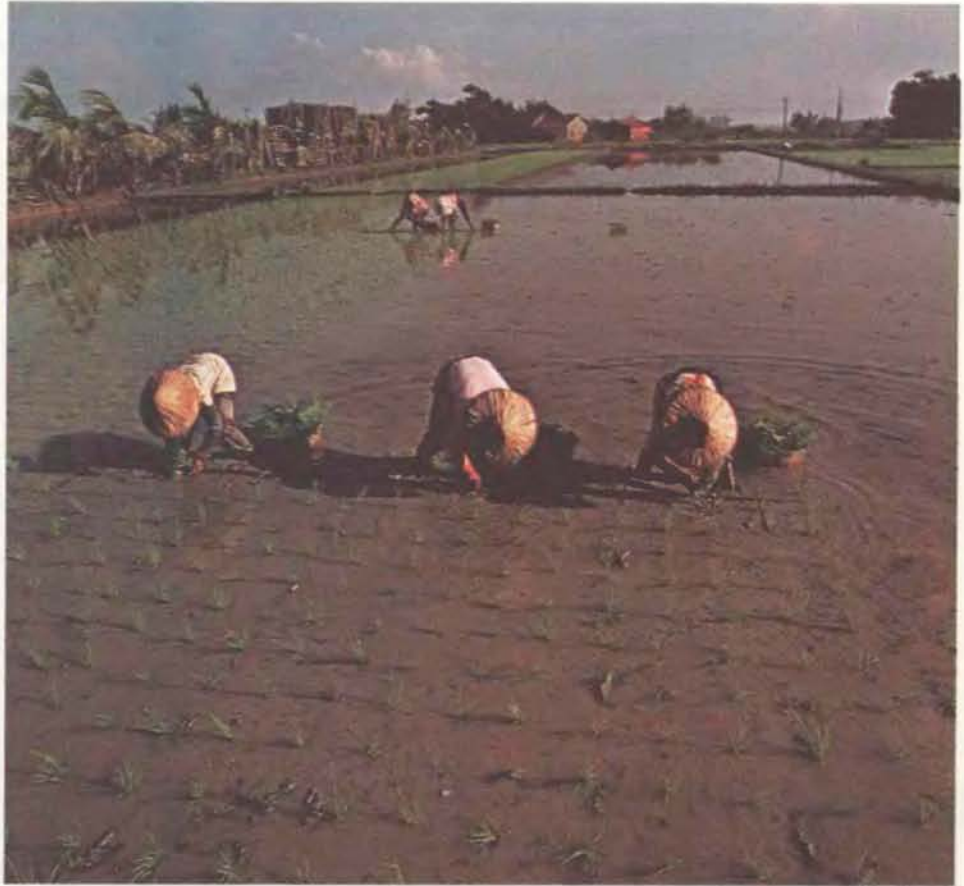


РИС САЖАЮТ вручную. Ручной труд на рисовых полях все еще широко распространен в Азии, в том числе на Тайване, где сделан этот снимок. В некоторых местах семена сеют с самолетов.



РИС УБИРАЮТ вручную вблизи г. Чианграй на севере Таиланда. В Калифорнии рис убирают с помощью специальных комбайнов: такой комбайн обычно снабжен гусеницами, иначе он не сможет работать на вязкой почве рисовых чеков.

С 1971 г. банк стал основным хранилищем для известных в мире сортов риса. В 1983 г. коллекция включала 63 тыс. азиатских и 2575 африканских культиваров, 1100 диких разновидностей и 680 образцов, предназначенных для генетических исследований. Поддерживаются также тысячи полученных путем селекции линий с одним или более нужными признаками.

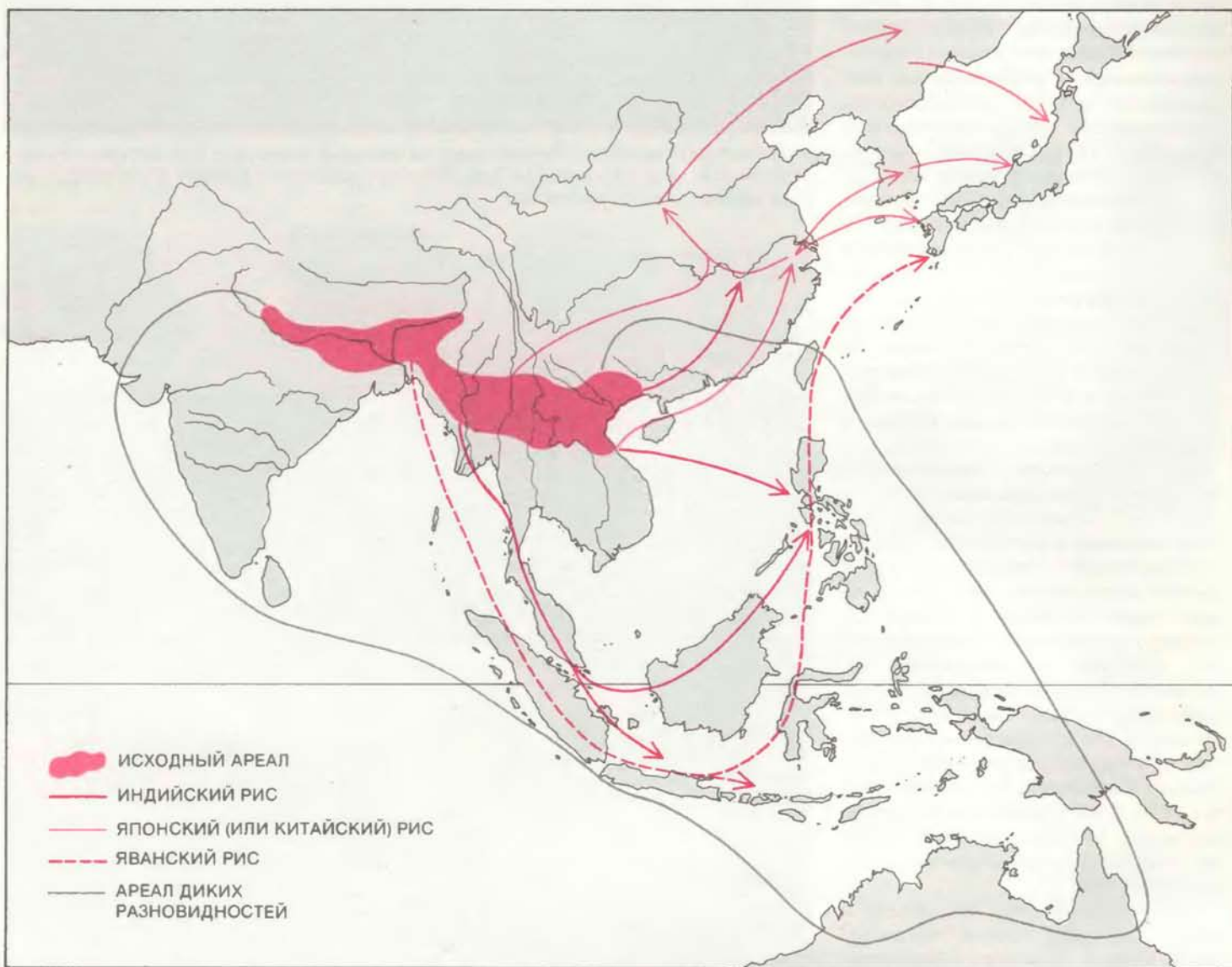
Эта коллекция — итог тысячелетнего естественного и искусственного отбора. Ценность ее огромна. Чтобы застраховаться от случайностей, МНИИР разместил дублирующий набор семян в США в Национальной лаборатории по хранению семян (Форт-Коллинс, шт. Колорадо). При участии рисоводов многих стран и Международного совета по генетическим ресурсам растений разработана 5-летняя программа по сбору и сохранению оставшихся 30—40 тыс. сортов. Эта программа предпола-

гает сотрудничество ученых, крестьян, а также студентов и военных, которые помогут исследовать отдаленные районы. Она должна быть выполнена к 1987 г., и тогда рис станет первой из основных продовольственных культур, полная коллекция которой достанется нашим потомкам, первым растением, для которого будет сохранено достигнутое в природе генетическое разнообразие.

Вот пример из недавнего прошлого, который показывает важность международного сотрудничества. Два года назад МНИИР получил через Oxfam (благотворительную организацию, основанную в Великобритании) из Народной Республики Кампучии запрос на поставку набора традиционных сортов риса, которые ранее выращивались в этой стране, так как многие сорта были утеряны во время войны. С 1973 г. в коллекции института имелось 800

сортов риса из Кампучии. В 1981 и 1982 гг. семена 140 сортов были переданы в распоряжение министерства сельского хозяйства НРК и успешно размножены на месте. Если бы коллекции не существовало, многие кампучийские сорта были бы утрачены навсегда.

Другой пример: если бы индийские ученые и МНИИР не позаботились о поддержании уникальной генетической изменчивости риса, растущего в северо-восточных Гималаях и в шт. Керала на юге Индии, вряд ли удалось бы достичь успеха в борьбе с коричневой цикадкой — опаснейшим насекомым-вредителем. Она особенно угрожала высокоурожайным сортам риса, поскольку отличается способностью быстро вырабатывать резистентность к пестицидам и справляться с наследственной устойчивостью риса, которая у этого растения определяется моноген-



ИРРАДИАЦИЯ АЗИАТСКОГО РИСА *O. sativa* из его исходного ареала, где он рос как дикая трава. Индийский, японский (или китайский) и яванский рис — вот три основные географические расы *O. sativa*. Индийский рис первоначально выращивали во влажных районах азиатских тропиков и суб-

тропиков, японский был выведен в субтропических районах умеренной зоны, а яванский — в экваториальной Индонезии. Полагают, что в Азии рис стали выращивать примерно 7 тыс. лет назад. Карта составлена на основании работ Т. Чанга из МНИИР.

но. Гималайские и керальские разновидности риса имели гены, обеспечивавшие устойчивость не только к коричневой цикадке, но и к некоторым другим вредителям.

Почему рис легко приспосабливается?

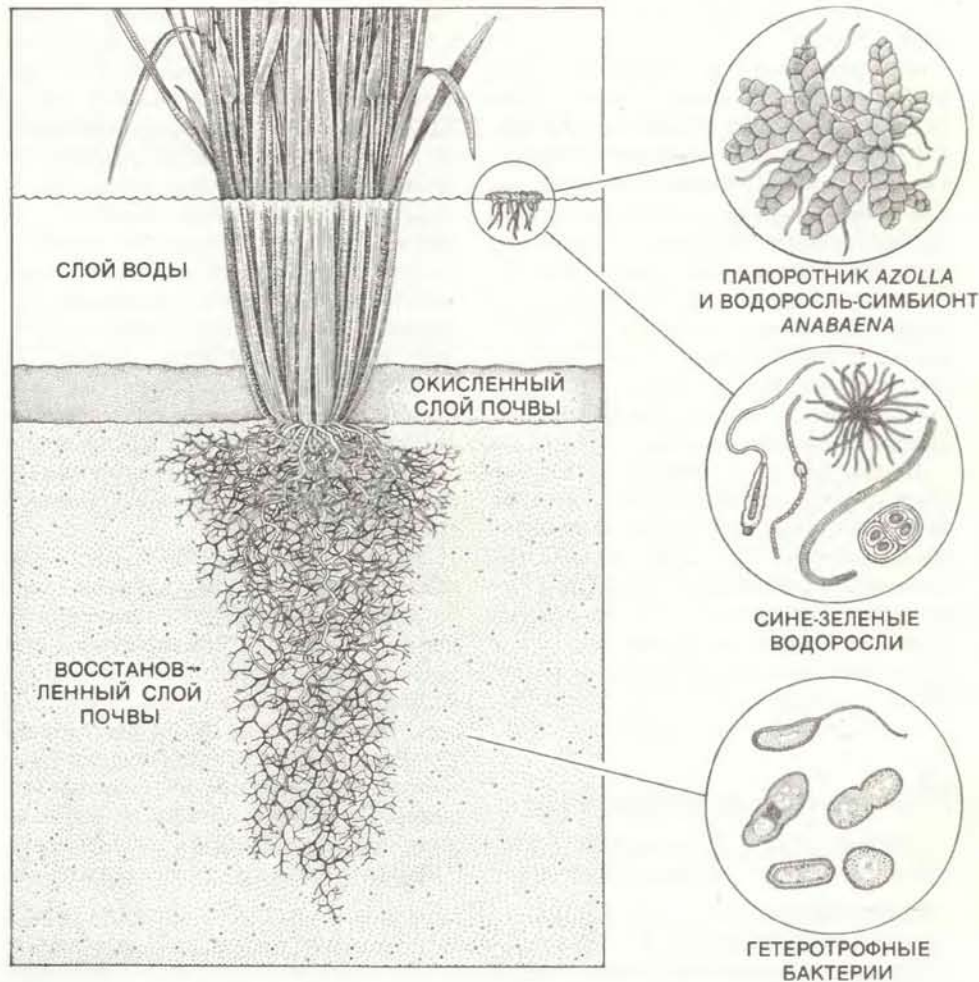
Рис легко адаптируется к разнообразным условиям благодаря эффективной системе доставки воздуха от побегов к корням*. Эта система позволяет рису расти на переувлажненных, заболоченных и затопленных почвах. Воздух проникает в растение через устьица на пластинке и влагалище листа и движется к узлам в нижней части стебля растения. По мере движения воздуха от побега к корню кислород поступает в ткани растения, где и используется для дыхания. Из корней воздух диффундирует в окружающую почву. Для того чтобы система могла работать, хотя бы часть побега должна находиться на воздухе.

Так как корни постоянно снабжаются воздухом, в их тканях может осуществляться аэробное окисление углеводов, так что они обеспечены достаточным количеством энергии, даже если находятся в воде, т.е. в условиях дефицита кислорода. У риса эффективность переноса кислорода от побегов к корням в 10 раз выше, чем у ячменя, и в 4 раза выше, чем у кукурузы.

В большинстве стран мира рис выращивают при затоплении, т.е. на почве, которая покрыта слоем воды 5—10 см. Но рис дает хорошие урожаи и на сухих почвах возвышенностей, где его иногда выращивают подобно кукурузе или пшенице, и в районах, которые сильно заливаются при наводнениях. Поэтому рис можно возделывать в смешанных и сложных севооборотах вместе с пшеницей, кукурузой и соевыми бобами.

Водный рис можно выращивать в воде глубиной от 1,5 до 5 м. Он хорошо переносит внезапное повышение уровня воды, так как быстро вырастает, достигая порой 6 м в длину. Обычно стебли риса растут со скоростью 2—10 см в сутки, но в глубокой воде могут прибавлять до 25 см в сутки. Сотрудники МНИИР вместе с учеными из Таиланда, Бангладеш и Индии попытались приспособить лучшие сорта риса к условиям районов, затопляемых водой слоем до 1 м. С этой целью они добились того, что гены, ответственные за быстрое удлинение стебля, включились в геномы растений высокоурожайных полукарликовых сортов. Полученные сорта риса на мелководье низкорослы, но если местность зали-

* Основную роль при этом играет специфическая воздухоносная ткань (аэренхима). — Прим. ред.



ФИКСАЦИЯ АЗОТА микроорганизмами в почве и воде дает возможность получать урожай около 2 т риса с гектара, не применяя минеральных удобрений. Среди организмов-азотфиксаторов — различные бактерии, свободноживущие сине-зеленые водоросли, а также сине-зеленая водоросль *Anabaena azolla*, связанная симбиотическими отношениями с водяным папоротником *Azolla*.

вает сильно, стебли растений быстро удлиняются.

Фиксация азота

Атмосферный воздух почти на 80% состоит из азота, но этот азот не может быть использован растением риса непосредственно. Необходима его биологическая фиксация: особые микроорганизмы превращают газообразный азот N_2 в ион аммония NH_4^+ , который и усваивается растениями. На затопленных рисовых полях для почвы характерен специфический набор микроорганизмов, которые осуществляют превращение азота и серы, биологическую фиксацию азота и быстрое разрушение пестицидов. Наибольший интерес представляет фиксация азота. Условия в почве затопленных рисовых чеков благоприятны для ряда азотфиксирующих организмов — прежде всего речь идет о бактериях и свободноживущих сине-зеленых водорослях; кроме того, ощутимый вклад в фиксацию азота дает симбиоз сине-зеленых водорослей и водяного папоротника азоллы.

Симбиоз азоллы и сине-зеленой водоросли *Anabaena azolla* наиболее выжижен и эффективен именно на затоп-

ленных почвах. Благодаря этому «дзуту» фиксируется до 3 кг атмосферного азота на 1 га в день. Азот, утилизированный в результате совместной жизнедеятельности папоротника и водоросли, по мере отмирания и гниения азоллы переходит в почву и становится доступным для растений риса. Будучи высокоэффективным фиксатором азота, азолла с давних пор служила «зеленым удобрением» на рисовых полях в Китае и Вьетнаме (во Вьетнаме существует даже храм, посвященный азолле). МНИИР ведет большую просветительскую работу, пропагандируя во всей южной и Юго-Восточной Азии использование азоллы в качестве источника азота для риса.

На рисовых полях со щелочными или нейтральными почвами свободноживущие азотфиксирующие сине-зеленые водоросли заводятся спонтанно; они произрастают там во множестве, и биомасса их может быть довольно велика. Предпринимаются попытки как-то контролировать рост сине-зеленых водорослей с целью улучшения роста риса; в этом направлении есть два взаимосвязанных пути: создавать культурные разновидности водорослей и пла-

номерно, под контролем, заселять ими рисовые поля.

Фиксация азота бактериями — третий источник биогенного азота. В почве рисовых чеков представлены как аэробные, так и анаэробные азотфиксирующие виды. Корни и нижние части побегов изнутри и снаружи населены бактериями, которые питаются отмершими тканями растения и теми органическими веществами, которые выделяются живыми тканями. На 1 г сухого веса корня приходится 10^{10} клеток бактерий-азотфиксаторов. По-видимому, они в значительной степени обеспечивают рис азотом.

Чтобы дать 1 т урожая, растениям риса необходимо около 20 кг азота на гектар. Без дополнительных минеральных удобрений благодаря только биологической фиксации азота урожай риса может достигать 1—2 т зерна с гектара. Вот одна из причин, отчего в Азии крестьяне всегда собирали 1—2 т риса с гектара, не пользуясь никакими искусственными удобрениями.

Повышение урожайности

Урожай риса в большинстве стран Азии еще 20 лет назад держались на

том же уровне, что и в старину. Только в Японии урожайность этой культуры постепенно повышалась: от 1,3 т с гектара в 900 г. н.э. до 2,5 т в конце XIX в., когда после реставрации Мейдзи страна переживала экономический подъем и помимо всего прочего произошла модернизация сельского хозяйства. В XX в. благодаря успешной селекции и совершенствованию агротехники урожайность существенно увеличилась. В наши дни урожаи в Японии, КНДР, Южной Корее, Австралии и США (а именно в Калифорнии) достигли в среднем 6 т с гектара. В последние 15 лет урожайность постепенно повысилась почти повсеместно, хотя кое-где все еще собирают только 2 т с гектара.

Этими достижениями рисоводство обязано селекционерам, которые сумели вывести высокоурожайные сорта индийского риса. Традиционные индийские сорта имели длинный стебель и легко полегали от ветра, дождя или под тяжестью зерен. Большинство современных сортов полугарликовые. Они выведены из полугарликовых мутантов, таких, как китайский сорт «диджео-ву-джен». В начале 50-х годов на Тайване — впервые за пределами ма-

терикового Китая — был получен полугарликовый сорт индийского риса, который назвали «тайчунг натив 1». Он оказался устойчив к полеганию, отзывчив на удобрения и практически не реагировал на изменение длительности дня, связанное со сменой географической широты района обитания.

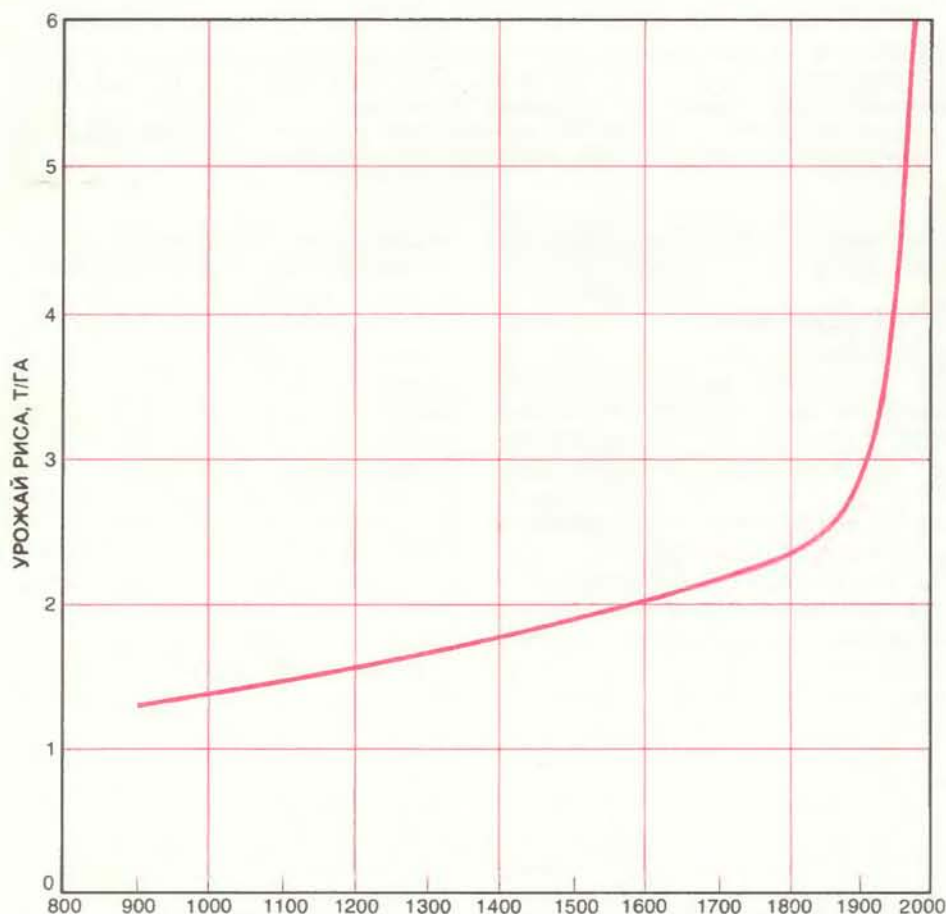
Когда в 1960 г. на средства Фордовского и Рокфеллеровского фондов при участии правительства Филиппин был основан Международный научно-исследовательский институт риса, на повестке дня в первую очередь стояла программа радикального повышения урожайности путем скрещивания лучших сортов из разных стран. Выдающимся достижением стал полугарликовый гибрид IR8. В 1966 г. его распространили на Филиппинах, и новый сорт, установив рекорд урожайности, вскоре прославился и заслужил название «чудесный рис». Вслед за ним появились другие высокоурожайные полугарликовые сорта IR5, IR20, IR22, IR24. Они отличались более коротким периодом роста и лучше отвечали на хороший уход.

Выращивая такие высокоурожайные скороспелые сорта и притом применяя на полях плотную посадку, пользуясь ирригационными сооружениями и большим количеством удобрений, крестьяне стали получать по два и более урожая в год. Производство риса возросло, но обострились и трудности, связанные с болезнями риса и его вредителями. Поэтому в МНИИР был взят курс на получение новых сортов, которые были бы устойчивы к возбудителям заболеваний и насекомым-вредителям, малоизменчивы и при этом сохраняли бы высокую урожайность.

Сорт IR36, который выращивают сейчас на площади более 10 млн. га, явился результатом этой работы. Он устойчив к четырем основным заболеваниям риса и к четырем основным вредителям, включая биотипы 1 и 2 коричневой цикадки. Он не требователен к условиям окружающей среды и хорошо растет даже на бедной почве, дает зерно высокого качества и созревает достаточно быстро — за 110 дней, что позволяет собирать на орошаемых полях три урожая в год. IR36 — потомок 13 различных сортов из 6 стран. Среди его предков IR8, «тайчунг натив 1» и дикий индийский вид *O. nivara*.

Насекомые и болезни

Получение новых сортов риса, устойчивых к вредителям, осложняется тем, что насекомые и патогенные микроорганизмы в свою очередь адаптируются к устойчивым сортам. Например, сейчас существуют три различных биотипа коричневой цикадки; они не только непосредственно по-



УРОЖАИ РИСА в Японии медленно увеличивались с 900 г. н.э. до конца XIX в. в основном благодаря постепенному распространению ирригации. В XX в. урожаи риса растут очень быстро, особенно в последнее время в связи с выведением новых сортов с высокими показателями, а также благодаря применению минеральных удобрений и совершенствованию агротехники.

вреждают растения риса, но также переносят серьезные вирусные инфекции. А когда сорт IR8 только начинали выращивать, среди вредителей риса был известен лишь один биотип коричневой цикадки. Видимо, по мере возникновения и распространения новых сортов риса среди насекомых шел отбор на приспособленные к ним биотипы. Так, в некоторых районах Индонезии и Филиппин появился биотип 3 коричневой цикадки. К счастью, сорт IR56 оказался к нему устойчив и его стали выращивать в этих районах.

В такой ситуации принципиально важно постоянно разрабатывать новые сорта, чтобы, так сказать, находиться все время хотя бы на шаг впереди вредителей. С этой целью участники многопрофильной программы прикладных генетических исследований МНИИР систематически проверяют коллекции риса во всем мире, выявляя новые аспекты реакции растений на воздействие вредителей.

Для того чтобы объединить многие позитивные признаки в одном сорте, по специальной схеме гибридизации скрещивают сорта, которые обладают нужной устойчивостью. Каждый год в институте проводится более 4000 скрещиваний. Образцы, подающие наибольшие надежды, выращивают и проверяют в 300 с лишним различных местах в соответствии с международной программой испытания сортов риса. По этой программе работают около 800 исследователей в 70 странах. С помощью такой сети сотрудничества удалось получить немало удачных сортов.

Проблемы, связанные с вредителями и болезнями риса, исследуются постоянно. Удалось идентифицировать новый штамм вируса карликовости риса, который в экспериментах обозначали RGSV2. Он обнаружен, например, на Филиппинах. RGSV2 представляет большую угрозу для рисовых полей. В настоящее время пытаются найти источники устойчивости к этому штамму.

Бесконечная война с вредителями привела исследователей к пониманию того, что целью сельского хозяйства является не уничтожение насекомых, а контроль над ними. Чтобы «управлять» насекомыми, сводя потери урожая к минимуму, необходим комплексный подход, который включал бы как генетические, агрономические и биологические методы контроля, так и благоразумное применение безопасных, но эффективных химических пестицидов.

Что впереди?

Согласно оценкам Продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН, чтобы успевать за ростом населения, необходимо обеспечить увеличение урожайности риса ежегодно на



СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ. Валовой объем производства риса (серая кривая) и производство на душу населения (цветная кривая) в странах Юго-Восточной Азии. Хотя валовое производство постоянно увеличивается, производство на душу населения с 1969 г. изменилось незначительно из-за прироста населения.

3% вплоть до конца XX в. Это вполне реально, поскольку современные достижения агротехники пока не нашли должного распространения в рисосеющих странах. Было бы интересно оценить, какие же урожаи можно получать, если максимально использовать все возможности сельскохозяйственной технологии. В Японии на экспериментальных станциях получают 9,3 — 10,2 т риса с гектара. Но и это не кажется высоким результатом по сравнению с рекордным урожаем, которого добился в 1960 г. один японский фермер: он получил 13,2 т риса с 1 га.

При научной разработке планов производства риса в той или иной стране важно знать, каков ее теоретический возможный потенциал в этом отношении. Поскольку зеленые растения превращают солнечную энергию в химическую, полезно оценить максимальный урожай риса при различных уровнях солнечной радиации. Один из плодотворных подходов здесь — определять эффективность использования энергии растениями риса, как это делается, например, для кремниевых солнечных батарей.

Большая часть крахмала в рисовом зерне образуется на последней стадии роста растения. Этот этап называют периодом налива зерна. Считается, что эффективность использования энергии

в период налива зерна составляет 3% во влажное время года (именно в это время выращивают большую часть риса) и 2,5% в сухой сезон, когда рис растет при орошении. На большей части территории тропической Азии обычен такой уровень солнечной радиации, что в период налива зерна во влажное время года в течение дня на 1 см² поверхности приходится 300 кал. В сухой сезон, когда облачных дней меньше, земля получает в среднем 550 кал на 1 см² в день, и при эффективности использования энергии 2,5% можно получить 12,5 т риса с 1 га.

Стоит также сравнить максимальный урожай риса в умеренной зоне и в тропиках. Продолжительность периода налива зерна у риса определяется в основном температурой. В тропиках этот период длится 25 дней, а в умеренной зоне — 35 дней. Если усредненная солнечная радиация в дневное время суток для обеих зон одна и та же, то суммарная солнечная энергия, утилизированная растениями риса, пропорциональна продолжительности периода налива зерна. В таком случае, т.е. при условии одинаковой солнечной радиации, потенциальный урожай риса в умеренной зоне будет на 40% выше, чем в тропиках. Однако в тропиках при достаточном увлажнении за год можно снимать два и более урожая.

В тех развивающихся странах, которые расположены в зоне тропиков, на 30% рисовых полей имеются ирригационные сооружения и на этих полях выращивается 50% всего риса. Площадь орошаемых рисовых полей в будущем значительно возрастет, поскольку большинство развивающихся стран постоянно расширяет ирригационную сеть и отводит под орошение все больше земель. Ирригация позволит повысить не только производительность, но и интенсивность земледелия: в течение года на одной и той же площади можно получить сперва при орошении один повышенный урожай риса, затем без орошения — урожай зерновых бобовых или иных культур, а затем еще один урожай риса.

На неорошаемых землях низменностей и возвышенностей урожай риса невелик и нестабилен, так как осадки выпадают нерегулярно и распределяются неравномерно. В таких переменчивых погодных условиях выращивание риса становится рискованным предприятием, поэтому в этих районах крестьяне не вкладывают средства в удобрения, пестициды и т.п. С неорошаемых участков на возвышенностях в среднем собирают 0,5—1,5 т риса с гектара, а на низменностях около 2 т. За последние два десятилетия урожаи на неорошаемых рисовых полях несколько возросли, особенно на возвышенностях. В настоящее время в МНИИР и в других организациях много внимания уделяют проблеме повышения и стабилизации урожая риса на неорошаемых землях.

Генная инженерия

Современные успехи биотехнологии открывают новые перспективы для повышения урожая риса. Здесь следует упомянуть, во-первых, метод культуры тканей, позволяющий получать гаплоидные растения, т.е. такие, в клетках которых вместо двух наборов генов содержится только один. Поскольку в гаплоидном организме каждый ген представлен лишь одним аллелем и, стало быть, «соревнование» аллелей и гетерозиготность исключены, создается возможность стабилизировать нужные признаки. Более того, этот метод сокращает время, необходимое для получения нового сорта: если при работе традиционными методами скрещивания обычно требуется 10 поколений, то с гаплоидными растениями риса достаточно трех. Таким путем китайские ученые создали ряд новых сортов риса, пшеницы и кукурузы.

Подавляющее большинство исследований гаплоидного риса выполнено в Японии, КНР и США на японских разновидностях. Эксперименты с индийским рисом пока что были безуспешными, в основном из-за того, что его

сорта не дают достаточного количества каллюсов (на стадии каллюса клетки растения недифференцированы, а для получения культуры необходимы именно недифференцированные ткани). Однако работы с индийским рисом продолжаются.

Перспективен также метод модификации растений путем индукции мутаций в культуре ткани, полученной из отдельных соматических или пыльцевых клеток растения. Из такого мутировавшего материала выращивают затем целое растение. По сравнению с методами, которые предполагают индукцию мутаций в семенах или целых растениях (облучением либо химическими мутагенами), новый метод позволяет отбирать нужный признак на клеточном уровне. Этот подход уже дал многообещающие результаты: таким путем удалось повысить устойчивость риса к засоленности почвы.

Среди множества вопросов, которые могла бы решить генная инженерия, наиболее привлекательная цель — ввести в геном риса гены фиксации азота. Однако генетическая система, ответственная за фиксацию азота, довольно сложна — она включает по меньшей мере 17 генов, и пока неизвестно, возможно ли вообще манипулировать таким большим числом генов одновременно.

Китайские селекционеры добились значительного повышения урожая кукурузы, выращивая гибриды. Теперь очередь за рисом. В КНР уже выращивают гибридный рис. Метод гибридов не следует путать со скрещиванием, которое состоит в комбинировании различных сортов с целью получить новую устойчивую линию. При работе по методу гибридов интерес сосредоточен только на первом поколении (F_1). Жизненная сила у гибридов первого поколения обычно больше, чем у обоих родителей. Недостаток в том, что каждый год необходимо вновь приобретать запас семян F_1 . Этот метод трудно применить к самоопыляющимся растениям, в том числе к рису. Однако недавно были открыты растения риса с мужской стерильностью, которая обусловлена взаимодействием генетического фактора цитоплазмы и генов ядра. Цитоплазматическая мужская стерильность передается только по материнской линии. Система скрещивания, основанная на этом явлении, позволяет получать гибридные сорта и у самоопыляющихся растений, в том числе у риса. Затраты на получение семян гибридного риса достаточно высоки, поэтому следует добиться такой урожайности гибридов, чтобы они окупались. Пока еще рано говорить об окончательном успехе. Время покажет, насколько выгодной окажется новая система скрещивания в КНР и стоит ли ее применять в других странах.

Издательство МИР предлагает:

Э. Корниш-Боден

ОСНОВЫ МАТЕМАТИКИ ДЛЯ БИОХИМИКОВ

Перевод с английского

Очень кратко, но вместе с тем ясно и доступно изложены основные понятия и символы математики, свойства экспоненциальной и логарифмической функций, основы дифференциального и интегрального исчисления, частные производные. Математический материал иллюстрируется конкретными примерами из области биохимии, каждая глава заканчивается задачами для самостоятельного решения.

Для биохимиков, химиков и биологов, использующих математический аппарат в своих исследованиях.

1984, 7 л. Цена 60 к.

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ В МЕТЕОРОЛОГИИ, ОКЕАНОГРАФИИ И ГИДРОЛОГИИ

Перевод с английского

Излагаются проблемы, относящиеся к организации и проведению наблюдений, обработке данных и интерпретации результатов дистанционного зондирования Земли из космоса. Значительное внимание уделено применению современных средств вычислительной техники для этих целей. Приводимый справочный материал дает возможность использовать книгу как руководство при решении практических задач.

Для инженеров, аспирантов и студентов старших курсов соответствующих специальностей вузов.

1984, 41 л. Цена 4 р. 40 к.



50 и 100 лет назад

SCIENTIFIC
AMERICAN

ЯНВАРЬ 1934 г. В последние годы Франция, наученная опытом мировой войны, создала протяженную систему пограничных фортификационных сооружений. Часть из них представляет собой обычные укрепленные узлы, а другая — внушительные подземные сооружения. На самых важных участках оборонительной системы, построенной с большим размахом и, как считается, по неприступности не знающей себе равных в прошлом, сооружены укрепленные казематы. Они соединены между собой подземными галереями, способными противостоять бомбежке. При необходимости металлические колонны, в которых размещены электрические лифты, могут поднимать казематы на поверхность. Эта система позволит в экстренных случаях концентрировать войска в нужном месте. План создания «линии Мажино», названной по имени военного министра, генерала М. Андре Мажино, ответственного за строительство всего комплекса укреплений, появился в 1925 г., когда было решено построить неприступный оборонительный рубеж протяженностью 200 км.

9 октября американские обсерватории получили от центрального бюро астрономических телеграмм Гарвардского университета телеграмму: «Бельгия и Польша сообщают, что интенсивный метеорный дождь продолжается». По всему небесному своду, где его не закрывали облака, в Европе велись пристальные наблюдения, но, прежде чем новость долетела до нашего континента, явление прекратилось. Великолепное зрелище было видно во всех странах Европы, от России до Испании. Сотрудник Пулковской обсерватории Герасимович сообщает, что поток достигал 100 метеоров в минуту. По данным же Витковского из Познани, максимальное число падающих метеоров в секунду было равно 10, причем яркость некоторых метеоров достигала нулевой звездной величины — яркости Веги или Арктура. Это самое впечатляющее метеорное явление со времени метеорного дождя Леонид (из созвездия Льва) в 1866 г. Метеорные потоки подобного рода всегда связаны с кометами, и в данном случае небесное тело, которое вызвало описываемое явление, было сразу отождествлено с периодической кометой, открытой Джакобини в 1900 г. и независимо от него при последующем возвращении Зиннером.

Недавно Чарлз К. Кейс, сотрудник фирмы Eastman Kodak Company, разработал процесс, с помощью которого газетные тексты могут быть сохранены для потомков на невоспламеняющихся фотопленках. Для этой цели используется специальная камера, фотографирующая более восьми полных газетных страниц на фотопленку в виде ленты размером $1\frac{3}{4} \times 12$ дюймов; при этом месячная подшивка газет объемом из 50 страниц «умещается» на одной катушке диаметром менее 4 дюймов. Текст с такой пленки можно считывать с помощью несложного аппарата, который увеличивает изображение до половины естественного размера газетной страницы. Новый процесс, позволяющий получать уменьшенные копии печатных текстов, может найти широкое применение в публичных библиотеках, где хранится огромное число газет.

SCIENTIFIC AMERICAN

ЯНВАРЬ 1884 г. Позволит ли электричество передавать большие количества энергии более эффективно, чем другие средства? Ответ на этот вопрос дал профессор Осборн Рейнольдс в своих Канторовских лекциях. Опираясь на экспериментальные данные М. Депре, мы можем сказать, что при передаче электрического тока, по мощности эквивалентного 5 л.с., по телеграфной проволоке диаметром $1/6$ дюйма на расстояние примерно 10 миль, потери энергии составят 29%. Это доказано практически. По сравнению с передачей энергии с помощью приводного троса эффективность этого способа ниже, что показали опыты г-д Хемов, которые, передавая энергию посредством приводного троса диаметром $3/4$ дюйма, достигли мощности 500 л.с. Для передачи такой энергии методом Депре потребовалось бы 100 телеграфных проволок; сложенные вместе, они образовали бы трос диаметром 1,4 дюйма, и весил бы он в 4 раза больше, чем тот, что использовался в опытах г-д Хемов. При передаче энергии посредством привода потери на одну милю составляют всего лишь 1,4%, в то время как при использовании электрического тока потери на таком же расстоянии достигают 6%. Таким образом, учитывая значительные энергетические потери в электролинии и большой вес проводников, можно утверждать, что передача энергии через привод более эффективна. Но исчерпывается ли этим проблема? Проводя опы-

ты с ременной передачей, г-да Хемы установили, что суммарные потери энергии в месте ее приложения и в месте съема составляют $2\frac{1}{2}\%$, в то время как в эксперименте Депре только в электрической машине потери достигали 30%, и это весьма мало для такого типа машин. Но здесь не учтены потери энергии при ее подводе к электромашине и при отводе от нее. На основании сказанного можно сделать вывод, что при использовании электрического тока вряд ли более 15—20% работы, произведенной паровым двигателем, дойдет до какой-либо механической установки, находящейся на другом конце линии передачи. В то же время можно быть уверенным, что 90% энергии не будет потеряно при передаче ее приводным тросом.

На заседании Французской академии наук М. Фердинанд де Лессепс сделал интересное сообщение относительно приливных волн, вызванных землетрясением. 27 августа 1883 г. около 4 часов пополудни уровень моря у побережья Колона, на Панамском перешейке со стороны Атлантического океана, начал колебаться. Это явление было отчетливо зафиксировано мариографом компании Inter-Oceanic Canal. Максимальный уровень воды не превышал обычной нормы во время приливов, но повторялся с интервалом 1,5 ч вместо 12 ч, как это было раньше. По кривой, построенной мариографом, видно, что за время от 3 ч 30 мин пополудни до 1 ч 30 мин следующих суток вода поднималась восемь раз на 0,3—0,4 м. Движение воды началось с ее убывания, как будто в море образовалась впадина; за время с 1 ч 30 мин до 11 ч 00 мин вечера 28 августа движение воды постепенно прекратилось. Лессепс объясняет это явление вулканическим извержением в Зондском проливе недалеко от острова Ява, которое началось 25 августа и было наиболее интенсивным в ночь с 26 на 27 августа.

Д-р Карлос Финлей из Гаваны считает, что желтая лихорадка может передаваться от одного человека к другому через комаров. Ему удалось рассмотреть под микроскопом характерные «споры» и нити на жале комара, только что укусившего больного желтой лихорадкой. Он считает, что с укусом этого насекомого в организм здорового человека могут попадать болезнетворные микробы. Финлей отмечает, что в 1797 г. в Филадельфии во время эпидемии желтой лихорадки было необычно много комаров. По его словам, температурные условия, при которых возникает и распространяется лихорадка, весьма благоприятны и для комаров.

Извержение Эль-Чичона и его воздействие на атмосферу Земли

Сравнительно небольшое извержение вулкана Эль-Чичон в Мексике, происшедшее в 1982 г., привело к выбросу в стратосферу множества мелких капель серной кислоты, образовавших туманную пелену. Плотность этого вулканического облака оказалась самой высокой со времени извержения Кракатау в 1883 г.

МАЙКЛ Р. РАМПИНО, СТИВЕН СЕЛФ

ИЗВЕРЖЕНИЕ вулкана Эль-Чичон в Мексике в конце марта — начале апреля 1982 г. не было особенно мощным, но привело к выбросу в стратосферу необычно большого количества вулканического вещества. Пепел и вулканические газы были выброшены на высоту более 25 км. Наблюдения со спутников, выполненные сразу же после извержения, показали, что это вещество быстро распространяется на запад; за считанные недели «вуаль» из тонкого вулканического материала протянулась вокруг всего земного шара. Меньше чем через год стратосферное облако покрыло все Северное полушарие и значительную часть Южного.

Уже давно известно, что вулканические облака в стратосфере могут влиять на климат Земли, прежде всего благодаря снижению средней температуры во всем мире или в одном из полушарий. До последнего времени считалось, что объем тонкого пепла и пыли, выброшенных при эксплозивном (взрывном) извержении, служит хорошей мерой плотности образующегося при этом облака и, таким образом, мерой его воздействия на климат. Например, с помощью так называемого индекса пылевой завесы, предложенного в 1970 г. английским климатологом Х. Лэмом, можно разделить все облака, возникшие при исторических извержениях, на основании оценок количества выброшенного пепла и данных об оптическом состоянии атмосферы, а также о понижении поверхностных температур в последующие годы. Однако за прошедшее десятилетие выяснилось, что большая часть пыли выпадает из стратосферы в течение нескольких месяцев и долгоживущие вулканические облака состоят не из пыли, а из аэрозоля, образованного мел-

кими капельками серной кислоты. Поэтому количество богатых серой газов, высвобождающихся при эксплозивном вулканическом извержении, служит лучшим показателем его воздействия на атмосферу, чем объем выброшенного пепла.

Извержение Эль-Чичона впервые показало, что сравнительно небольшое, но богатое серой вулканическое извержение действительно может вызвать образование плотного, обширного стратосферного облака. Хотя объем пепла, выброшенного Эль-Чичоном, сравним с объемом извержения вулкана Сент-Хеленс в мае 1980 г., возникшее стратосферное облако было на этот раз в среднем примерно в 100 раз плотнее. Это самое плотное облако из наблюдавшихся в Северном полушарии со времени извержения вулкана Кракатау в Индонезии в 1883 г. Облако, образовавшееся при извержении вулкана Сент-Хеленс, состояло вначале из тонкого пепла, который быстро собрался в более крупные частицы и выпал из атмосферы, тогда как Эль-Чичон поднял ввысь густой туман из капелек серной кислоты, которые будут находиться в атмосфере еще в течение нескольких лет.

Размер такого облака может быть связан с геологическими характеристиками вулкана, например с общим химическим составом извергающегося материала и типом самого извержения. Эль-Чичон испустил достаточно серных газов, чтобы образовалось значительное количество серной кислоты, а извержение его было достаточно мощным, чтобы выбросить газы в стратосферу. Частично это можно объяснить тем, что из данного вулкана извергается материал среднего состава, т.е. с умеренным содержанием кремнезема. Вулканы, извергающие материал с низ-

ким содержанием кремнезема, характеризуются, как правило, высокой концентрацией серы; обычно такие вулканы извергаются менее эксплозивно, чем вулканы, из которых выбрасывается материал с высоким содержанием кремнезема. Однако Эль-Чичон имел значительно более высокое содержание серы, чем вулканы такого же общего химического состава. Для этой аномалии геологи еще не нашли однозначного объяснения. Сера могла поступить либо из осадочных толщ, подстилающих вулкан, либо из залежей сульфидов на поверхности одной литосферной плиты, погружающейся под другую и испытывающей плавление.

АЭРОЗОЛЬ серной кислоты образуется при фотохимической реакции между серными газами, выделяющимися из вулкана, и парами воды, содержащимися в стратосфере. Этот аэрозоль вызывает снижение средней температуры на земном шаре, потому что капельки жидкости частично поглощают излучение Солнца, а частично рассеивают его, отражая обратно в космическое пространство. Однако реакции синтеза серной кислоты носят сложный характер и их механизм полностью не изучен. Кроме того, не совсем ясно, как климатическое воздействие вулканических аэрозолей зависит от таких параметров, как скорость образования серной кислоты, скорость роста капелек аэрозоля и скорость распространения облака. В какой-то степени это связано с тем, что данных о вулканических облаках в стратосфере недостаточно.

Атмосферный эффект извержения Эль-Чичона документирован лучше, чем воздействие какого-либо другого вулкана, создавшего большое стратосферное облако. Таким образом, это из-



ПРИ ИЗВЕРЖЕНИИ ЭЛЬ-ЧИЧОНА в 1982 г. были снесены верхние 200 м старого вулканического конуса. Вулкан, расположенный в отдаленном районе южной Мексики, не подавал признаков жизни примерно 600 лет. На одной из немногих фотографий Эль-Чичона до извержения 1982 г. (вверху) показаны кромка старого кратера, лавовый купол и

боковой купол (слева внизу). Кратер, оставшийся после извержения 1982 г. (внизу), лежит внутри старого кратера. В течение дождливого сезона в кратере собралась вода и образовалось горячее кислотное озеро; температура воды около 50°C , а значение $p\text{H}$ ниже 1.

извержение служит как бы природным экспериментом, в котором проверяются как приборы, так и теоретические модели, описывающие химизм и климатическое воздействие вулканических аэрозолей в стратосфере. Хотя анализ множества данных, собранных во время и после извержения, еще не закончен, уже сейчас ясно, что некоторые результаты вызовут особый интерес. На-

пример, один из анализов температурных данных дает основание считать, что максимальное воздействие облака аэрозоля на температуры в Северном полушарии приходится на первые два месяца после извержения, т.е. на гораздо более раннее время, чем предсказывалось в большинстве моделей.

Эль-Чичон расположен на $17,33^{\circ}$ с.ш., $93,2^{\circ}$ з.д. в штате Чьяпас на юге

Мексики. Под этим районом сходятся три плиты земной коры: Североамериканская, Карибская и плита Кокос. Вулканическая деятельность в этом районе обусловлена субдукцией (поддвижением) плиты Кокос под Североамериканскую плиту. Однако Эль-Чичон и некоторые связанные с ним вулканические центры находятся в области между крупными вулканически-



НА ПРИСУТВИЕ СЕРЫ в вулканических отложениях у кромки кратера указывает их желтый цвет. Анализ вулканического пепла Эль-Чичона дает аномально высокое содержание сульфатов: до 2 вес. %. Сера присутствует в нескольких формах, в том числе в виде кристаллов ангидрита (CaSO_4) — минерала, редко встречающегося в вулканических породах. Желтая корка, покрывающая эти отложения, — элементарная сера, которая высвобождается, вероятно, при разложении ангидрита. Оценки массы серных газов, выброшенных при этом извержении в атмосферу, достигают до 20 млн. тонн.

ми поясами: Трансмексиканским на севере и Гватемальским на юге. Такое изолированное положение может быть связано с расколом плиты Кокос в результате субдукции океанического хребта Теуантепек у юго-западного побережья Мексики.

Первое географическое описание Эль-Чичона выполнено в 1928 г. Высота вулкана составляла всего 1260 м над уровнем моря. Его подводные каналы были перекрыты куполами или заткну-

ты пробками затвердевшей лавы. Хотя в кратере годами дымились фумаролы, вулкан давно уже не подавал признаков жизни. Недавние датировки углеродным методом (по ^{14}C) показали, что последнее извержение, размер которого был, возможно, в 10 раз больше, чем в 1982 г., произошло в период между 1350 и 1400 гг. н.э.

Извержению 1982 г. предшествовал месяц повышенной сейсмической активности, которая регистрировалась



ТЕКТОНИЧЕСКАЯ КАРТА южной Мексики показывает связь Эль-Чичона с Мексиканским и Гватемальским вулканическими поясами и с местными тектоническими элементами. Вблизи этого района встречаются три крупные плиты земной коры. Карибская плита скользит мимо Североамериканской по серии разломов, проходящих на территории Гватемалы; плита Кокос поддвигается под Североамериканскую и Карибскую плиты у Центральноамериканского желоба, располагающегося вдоль побережья Мексики. Вулканизм вызывается поддвижением (субдукцией) плиты Кокос, но имеет особенности, которые показывают, что тектонические зависимости не столь просты. Среди этих особенностей — большое смещение между Трансамексиканским и Гватемальским вулканическими поясами. Обособленное положение Эль-Чичона может быть результатом раскола погружающейся плиты в районе, где происходит субдукция хребта Теуантепек — неактивной зоны разломов, на продолжении которой и располагается вулкан.

сеть сейсмографов, установленных в этом районе в 1980 г. для слежения за возможным усилением сейсмичности в связи с заполнением водохранилищ. С самого начала было отмечено, что очаги землетрясений располагаются на небольшой глубине (меньше 5 км), а перед извержением глубина очагов еще уменьшилась и стала менее 2 км. Причинами землетрясений были, вероятно, подъем магмы к поверхности или взаимодействие магмы с грунтовыми водами.

Последовательность различных стадий извержения определена по отложениям материала, выброшенного вулканом, и по тому, как эти данные согласуются с рассказами очевидцев. Картирование отложений выполнили вскоре после извержения Х. Сигурдссон и С. Кэри из Университета шт. Род-Айленд и Х. Эспиндола из Мексиканского национального автономного университета в Мехико. Три крупнейших извержения 28 марта, 3 апреля и 4 апреля характеризуются различной зернистостью пепловых отложений. Эти три извержения относились к плинианскому типу (по имени Плиния Младшего, описавшего извержение Везувия в 79 г. н.э.). Для плинианских извержений характерно возникновение исполинских колонн, состоящих из газов, вулканической пыли, пепла и пемзы и вздымающихся на высоту в десятки километров под мощным воздействием конвекционных потоков в атмосфере. Большая часть вулканических отложений связана именно с такими извержениями; они же выбрасывают на огромную высоту газы и пыль, из которых образуются стратосферные облака. Однако эруптивная колонна второго извержения Эль-Чичона обрушилась прежде, чем успела рассеяться, породив прижимающиеся к земле пирокластические потоки — лавины, состоящие из горячих газов, пепла и пемзы. Отложения пирокластических потоков сильно отличаются от других вулканических выбросов.

ПЕРВОЕ плинианское извержение Эль-Чичона началось 28 марта в 23 ч 32 мин и продолжалось пять или шесть часов. Второе, начавшееся 3 апреля в 19 ч 35 мин, отличалось от предыдущего тем, что была выброшена большая масса горных пород, сформировавшихся при прежних извержениях вулкана. Присутствие таких пород в пепловом слое, относящемся к этому извержению, указывает на то, что магма, поднимаясь к поверхности, «терлась» о стенки подводного канала и постепенно расширяла его. Именно расширение жерла и соответствующее понижение скорости выброса материала привели, вероятно, к обрушению эруптивной колонны.

Плинианские извержения возникают

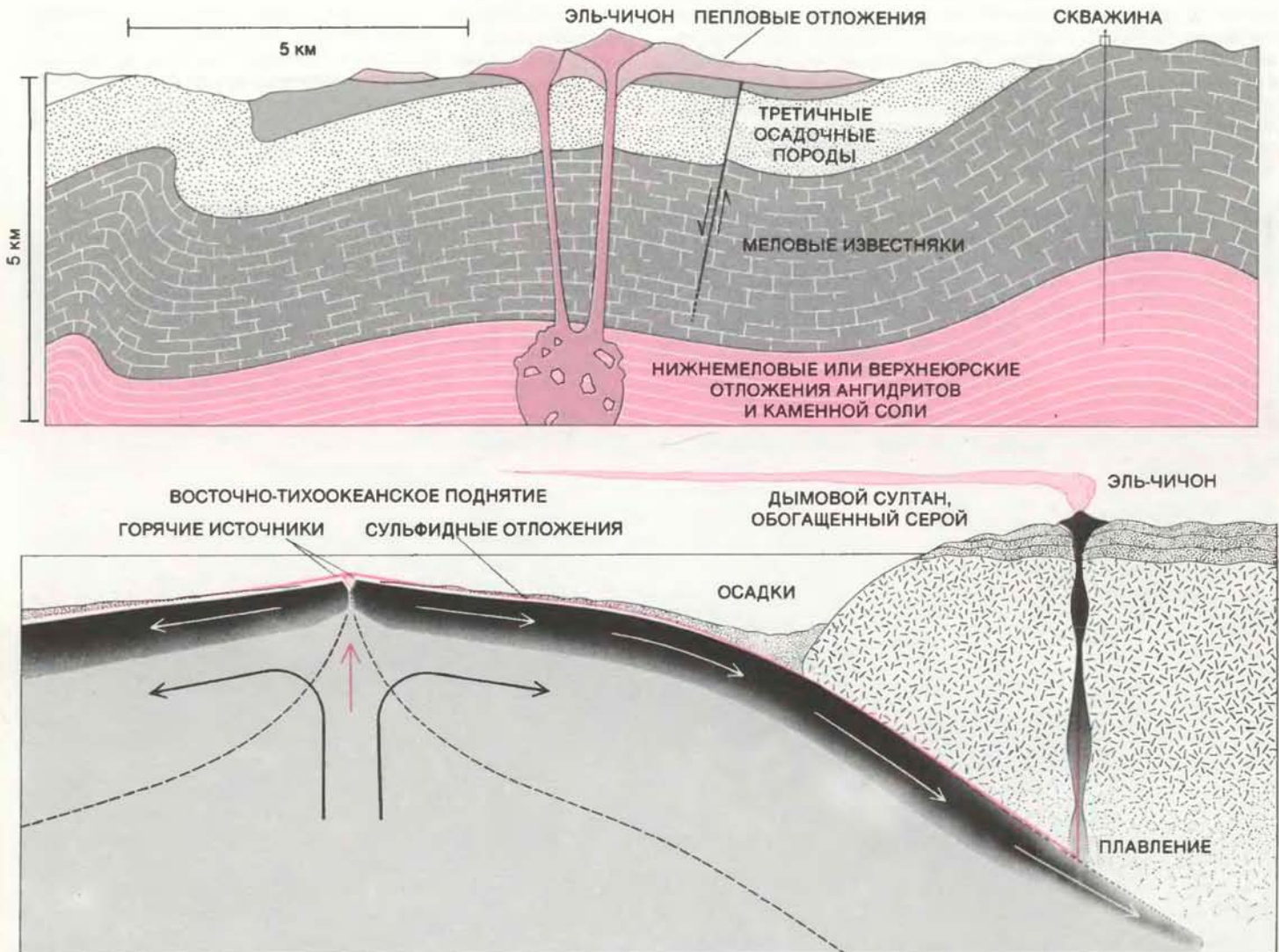
в том случае, если скорость истечения материала велика, а жерло сравнительно узкое (менее 200 м в диаметре). Нижняя часть колонны существует благодаря кинетической энергии материала, «выстреливаемого» из подводящего канала вулкана, а верхняя часть питается энергией конвекционных потоков, создаваемых в атмосфере этим горячим материалом. Если скорость выброса уменьшается, верхняя часть колонны может стать плотнее окружающего воздуха, и тогда колонна обрушивается. В этом случае ее еще горячий материал выпадает вокруг жерла и разлетается во все стороны мощными волнами, подобными ударным волнам при взрыве. Энергия такого стремительного движения — это кинетическая энергия падения, а текучесть со-

здается горячими газами и нагретым воздухом. Удаляясь от жерла, пирокластический материал разбивается на более плотные, относительно медленные пирокластические потоки и на более легкие и быстрые пирокластические «шквалы». Эта ударная волна пирокластического материала («палаящая туча») распространяется во все стороны от вулкана, опережая потоки, которые в основном движутся по руслам, определяемым рельефом местности.

Палаящие тучи, порожденные Эль-Чичоном, уничтожили густой лес, покрывавший его склоны и соседние холмы в радиусе 8 или 9 км от кратера. Большинство деревьев внутри этой зоны было повалено и обуглено; со стороны вулкана они почернели или были ободраны горячим песком. Температу-

ра палаящей тучи была достаточной, чтобы воспламенить сухое дерево и досчатые строения, но живые деревья не загорелись. Несмотря на разрушительный характер, этот шквал оставил после себя только тонкий слой пепла, постепенно увеличивающейся мощности по направлению к жерлу. Пирокластические потоки прошли сразу же после палаящих туч, двигаясь по узким долинам водотоков на склонах вулкана. Эти потоки отложили значительные радиальные скопления пепла и пемзы с глыбами плотной вулканической породы (диаметром до 1 м) и обуглившимися бревнами.

Третье плинианское извержение началось 4 апреля в 5 ч 22 мин утра. В результате этого извержения, как и после второго пароксизма, отложились мас-



СЕРА, выброшенная Эль-Чичоном, могла иметь различные источники. По этому поводу имеются два предположения. Глубокая скважина, пробуренная около вулкана, прошла осадочные отложения ангидрита и каменной соли, образовавшиеся при испарении в мелководном море около 100 млн. лет назад (вверху). Возможно, магма ассимилировала большое количество серы, проходя через эти слои на своем пути к поверхности. Геологический разрез основан на работе Р. Тиллинга и У. Даффилда из Геологической службы США. Возможно также, что сера находилась в породе, при

плавлении которой образовалась магма (внизу). На некоторых участках срединно-океанических рифтов (где формируется новая океаническая кора) найдены жерла, через которые изливаются обогащенные серой растворы. Осадок, выпадающий из этих растворов, покрывает новую кору «плащом» сульфидных отложений. Плита, несущая такие отложения, при субдукции и плавлении производит, возможно, богатую серой магму. Сера в магматических выбросах Эль-Чичона имела, по-видимому, оба этих источника.



КАРТА ТЕМПЕРАТУР верхней части вулканического облака на 29 марта 1982 г., через день после первого крупного извержения Эль-Чичона (по данным, полученным с помощью специального радиометра, установленного на борту спутника NOAA-7). Перед извержением температура поверхности моря, которая может служить основой долгосрочного прогноза погоды, рассчитывалась по показаниям этого радиометра. Однако, когда под прибором проходило вулкани-

ческое облако, он фиксировал главным образом излучение от поверхности облака. Возрастание температуры изображено сменой цветов от зеленого к желтому и затем к красному. Центр облака холоднее, чем его периферия, потому что он занимает более высокое положение. Высота определяется путем сопоставления данных по инфракрасному излучению с температурными профилями, построенными по данным шаров-радиозондов.



ГАЗООБРАЗНЫЙ ДИОКСИД СЕРЫ, выброшенный Эль-Чичоном в атмосферу, ясно виден на изображении, которое построено по данным спектрометра, установленного на борту спутника Nimbus-7 для картирования общего содержания озона. Изображение получено 5 апреля, через день после последнего крупного извержения. Облако вулканического диоксида серы показано черной полосой, протягивающейся от Гаити через полуостров Юкатан в Тихий океан. В пределах изображенной площади содержащийся в облаке

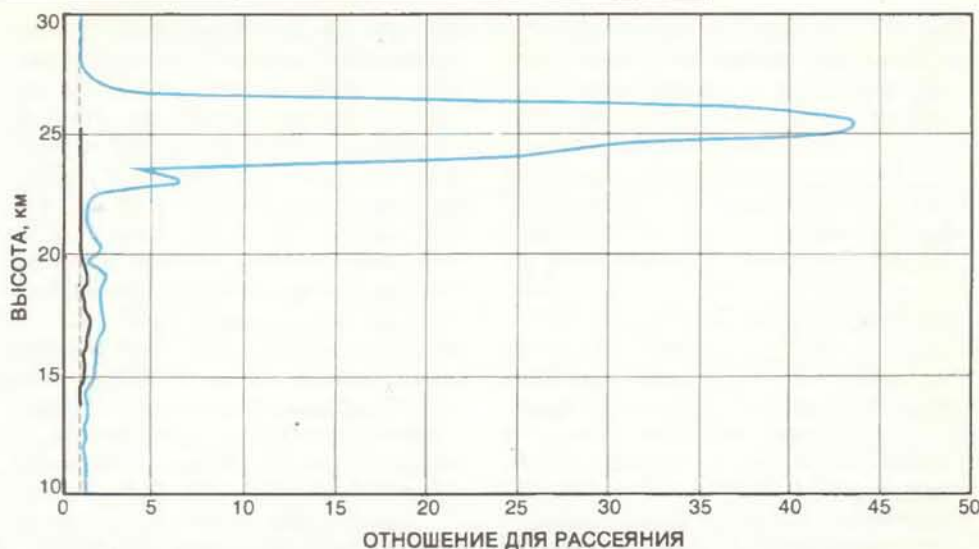
диоксид серы приводит к завышенным оценкам содержания озона. Цвета в верхней половине изображения соответствуют различным уровням содержания озона: возрастание его концентрации показано переходом от голубого к коричневому и зеленому. Волнообразная картина распределения озона (максимум располагается над территорией США) типична для верхнетропосферной циркуляции над Канадой и северной частью США.

сы пепла и пемзы с большим количеством древних вулканических пород. Однако на этот раз эруптивная колонна, по-видимому, не обрушилась, а рассеялась в атмосфере. Вблизи вулкана отложения третьего извержения покрыты слоем тонкозернистого пепла. Вероятно, этот слой образовался, когда горячий материал пирокластических потоков соприкоснулся с весенними паводковыми водами, что привело к взрывам водяного пара.

Объем пепла и пемзы, выброшенных вулканом Эль-Чичон, не особенно велик: от 0,5 до 0,6 км³. Для сравнения отметим, что при извержении гватемальского вулкана Санта-Мария в 1902 г. было выброшено 10 км³ твердого материала, при извержении Кракатау в 1883 г. — 20 км³, а при извержении индонезийского вулкана Тамбора в 1815 г. — более 175 км³.

ВУЛКАНИЧЕСКИЙ пепел, извергнутый Эль-Чичоном, по химическому составу относится к андезитовому типу, характерному для вулканов зон субдукции. (Магма Эль-Чичона обогащена калием; такие магмы принято называть трахиандезитовыми.) Химический состав магм меняется от бедных кремнеземом и обогащенных железом базальтов через андезиты, имеющие средний состав, к богатым кремнеземом и бедным железом дацитам и риолитам. Сера сильнее растворяется в магмах, обогащенных железом, и поэтому базальты, как правило, отличаются более высоким содержанием серы, чем риолиты. Однако, для того чтобы образовалось значительное количество стратосферного аэрозоля, извержение должно быть взрывным и выбросить серные газы высоко в атмосферу, а бедные кремнеземом магмы извергаются обычно менее взрывно, чем магмы, богатые кремнеземом. Извержение материала среднего состава вполне может привести к появлению в стратосфере больших масс серных газов. Имеющиеся данные позволяют сделать вывод, что вулканическое воздействие на атмосферу и химический состав вулканического материала в общих чертах коррелируются. Например, вулкан Агунг на о. Бали, породивший при извержении 1963 г. большое стратосферное облако, характеризуется андезитовым составом материала. Извержение Кракатау, с которого и началось детальное изучение вулканического воздействия на атмосферу, было очень крупным выбросом материала дацитового состава.

Пепел, отложившийся после извержения Эль-Чичона, имеет аномально высокое содержание серы среди всех подобных образований. Й. Вареканп из Уэслианского университета и Дж. Лур из Калифорнийского университета в Беркли — одни из первых, кто собрал



ПРОФИЛИ РАССЕЯНИЯ света в атмосфере показывают, что возникшее при извержении Эль-Чичона стратосферное облако было гораздо плотнее, чем при извержении вулкана Сент-Хеленс в 1980 г., когда было выброшено примерно такое же количество пепла, но он не был обогащен серой. Профили построены по данным, полученным с помощью лидара Исследовательского центра НАСА в Лангли (шт. Виргиния) 18 июля 1980 г. (черная линия) и 1 июля 1982 г. (цветная линия). Количество материала в атмосфере определяется по данным о доле энергии лазерного импульса, рассеянного обратно. Степень рассеяния зависит от плотности атмосферы, а также от количества пыли или аэрозоля, содержащихся в воздухе. На профилях показаны отношения потока излучения для данной высоты к количеству содержащихся в атмосфере молекул при нормальном рассеянии. Значение этого отношения, равное 45 (отмечено для высоты 25 км), — максимальное среди когда-либо зарегистрированных в исследовательском центре Лангли.

образцы и выполнил анализ химического состава пепловых отложений, — обнаружили удивительно высокое содержание сульфатов: до 2 вес.%. Под микроскопом можно было видеть свободные кристаллы ангидрита (сульфата кальция, CaSO₄) — минерала, редко встречающегося в вулканических породах. Когда пепел был отмыт, оказалось, что сера адсорбировалась на поверхности пепловых частиц; другими словами, часть серных газов, выделившихся в процессе извержения, была удалена из вулканической тучи вместе с пеплом.

Аномально высокую концентрацию серы в вулканическом пепле можно объяснить присутствием под вулканом минеральных образований, богатых серой. Глубокая скважина, пробуренная около вулкана в ходе геологоразведочных нефтяных работ, прошла через мощные слои осадочного ангидрита и залежи каменной соли, образовавшиеся при испарении в мелководных морях примерно 100 млн. лет назад. Некоторые исследователи высказали предположение, что магма, поднимаясь по жерлу вулкана, могла ассимилировать большое количество серы из этого осадочного материала. Вопрос о происхождении серы нельзя, однако, считать решенным. У. Роуз-младший из Мичиганского технического университета считает, что сера могла подняться с больших глубин вместе с магмой. Большое количество серы в свежем магматическом расплаве связано, по-

видимому, с каким-то необычным ее источником в теле плиты, испытывающей субдукцию. На некоторых участках срединно-океанических рифтов, в которых формируется новый материал плиты, располагаются гидротермальные жерла, которые испускают горячие, обогащенные серой растворы. В таких местах новая кора покрывается «плащом» сульфидных отложений. Когда эта кора испытывает субдукцию и плавление, по-видимому, может образоваться магма, чрезвычайно богатая серой.

Изучение изотопного состава серы в кристаллическом ангидрите и других содержащих серу продуктах извержения Эль-Чичона поможет, вероятно, определить ее происхождение. Сера, накапливающаяся при осаждении в море, должна быть обогащена более тяжелым из двух ее изотопов по сравнению с серой в магме. Первые выполненные анализы позволяют предположить, что выброшенная Эль-Чичоном сера имела смешанное происхождение, но какой из возможных ее источников дал больший вклад, пока не установлено.

ДОПУСТИМ, что магма обогащена серой. Тогда как определить, сколько серы высвобождается из расплава при извержении и какова доля серы, выделившейся в виде серных газов? Дж. Девайн из Университета шт. Род-Айленд и Сигурдссон разработали метод измерения содержания



КАРТЫ МИРА, показывающие положение вулканического облака в первые три недели после извержения, построены путем комбинирования данных стационарных спутников GOES-East и GOES-West и спутника NOAA-7, движущегося по полярной орбите. Размеры облака определялись путем анализа полученных с этих спутников изображений. Незадолго до извержения стратосферная циркуляция начала сме-

щаться к своей летней схеме, и ветер в стратосфере стал дуть с востока. Время, за которое облако обогнуло земной шар, соответствует скорости ветра около 20 м/с (т.е. около 70 км/ч). Однако облако не выходило за пределы узкой широтной полосы — в соответствии с особенностями стратосферной циркуляции. Там, где край облака был виден нечетко, его граница показана пунктирной линией.

серы в магме перед извержением по составу включений в кристаллах. Кристаллы, образовавшиеся в магме перед самым извержением, иногда захватывают небольшие количества расплава, из которого они растут. Захваченная магма может не кристаллизоваться, а застывать в виде стеклянных бусинок. Состав стекла отражает дозруптивное содержание летучих компонентов, таких, как богатые серой газы. Девайн и Сигурдссон определили методом электронно-зондового микроанализа содержание серы во включениях расплава, найденных в пепловом материале для нескольких участков вулканического извержения, а затем — содержание серы в образцах вулканического стекла, образовавшегося на разных фазах извержения. Разность между полученными значениями представляет собой меру степени дегазации в ходе извержения. Общее количество высвободившихся серных газов можно оценить с учетом этой величины, а также по данным о мощности пепловых отложений и их площади, что дает полный объем выброшенного магматического материала.

Девайн и Сигурдссон обнаружили хорошую корреляцию между своими оценками количества серных газов, выброшенных вулканами, и снижением средней температуры в масштабе полушария; это снижение температуры — один из показателей размера аэрозольного облака вулканического происхождения. Однако выведенная Девайном и Сигурдссоном по включениям в кристаллах оценка содержания серы, выделившейся в виде газов, оказалась гораздо ниже, чем непосредственно измеренное ее количество в стратосфере после извержения. В случае Эль-Чичона часть серы в составе магмы присутствовала в какой-то иной форме, которую нельзя обнаружить при газовом анализе включений в кристаллах. Возможно, это были мелкие кристаллы ангидрита, подобные тем, которые были обнаружены на поверхности пепловых частиц, обособившиеся перед извержением. В ходе извержения значительная часть этой серы должна была выделиться в виде серных газов.

Анализ вулканических продуктов показывают, что сера выделялась в виде диоксида (SO_2) и в меньшей степени в виде сероводорода (H_2S), который быстро окисляется до диоксида серы. В стратосфере SO_2 реагирует с гидроксильными радикалами (OH^-), образуясь при фотодиссоциации паров воды, давая такие промежуточные соединения, как газообразная сульфогруппа (HSO_3), которая в конце концов конденсируется в капельки серной кислоты (H_2SO_4) и воды. Механизм образования этих капелек точно не известен. Газообразная серная кислота

может конденсироваться на мельчайших затравочных частицах вулканической пыли или даже на ионах или небольших скоплениях молекул. Сульфогруппы HSO_3 и молекулы воды могут также объединяться в простые скопления, т.е. такие же капельки; возможно, то же происходит с молекулами газообразной серной кислоты и воды. Эти фотохимические реакции идут медленно: для полного превращения выделившихся серных газов в аэрозоль необходимо недели и месяцы. Новые капельки продолжают появляться по мере того, как другие увеличиваются в размере и выпадают из стратосферы. В течение какого-то времени облако пополняется за счет собственного запаса газов.

Распространение облака определяется характером циркуляции в стратосфере. Стратосферой называют область между нижней атмосферой (тропосферой) и верхней атмосферой (мезосферой), где не происходит сильного изменения температуры воздуха с высотой. Благодаря малому температурному градиенту в стратосфере слабо выражено вертикальное перемешивание и вулканические газы остаются в основном на той же высоте, на которую они выбрасываются при извержении. В результате образуются слоистые облака. Для стратосферы характерны специфические сезонные явления; в конце весны и в течение лета стратосферные ветры дуют в районе субтропиков Северного полушария (на тех широтах, где находится Эль-Чичон) в западном направлении. Эти ветры способны перенести вулканические аэрозоли вокруг всего земного шара, но для их распространения на север и на юг требуется продолжительное время. Это явление, как полагают, играет важную роль в замедлении воздействия вулканических извержений на климат Земли.

ВСЕ ТРИ плиннианских извержения Эль-Чичона, по-видимому, выбросили в основание субтропической стратосферы богатые серой вулканические газы и пепел. Данные космических наблюдений показывают, что в результате извержения 28 марта облако образовалось на высоте около 20 км, после извержения 3 апреля появилось другое облако на несколько меньшей высоте, а после извержения 4 апреля возникло массивное облако, центр которого располагался на высоте 26 км. Можно было наблюдать, что эти стратосферные облака распространяются на запад, тогда как туча пепла, образовавшаяся в верхней тропосфере, начала расти в восточном направлении и вскоре рассеялась.

За движением стратосферных облаков следили с помощью наземных лазерных дальномерных систем и разных приборов, установленных на спутни-

ках. Целью дальномерных измерений было наблюдение именно за атмосферными аэрозолями, но некоторые космические инструменты были предназначены для измерения длин волн поглощения и испускания отдельных газообразных составляющих воздуха. Удивительно, что положение облака по этим данным установить не удалось.

Использованные лазерные системы называют «лидарами» (lidar — от английских слов "light detection and ranging", световая локация и определение расстояния). Они измеряют долю энергии лазерного импульса, рассеянную обратно в атмосферу; содержание аэрозоля можно определить по величине этого сигнала относительно нормальных значений, характерных для данной высоты. По мере того как аэрозольное облако Эль-Чичона распространялось вокруг земного шара, высокие значения рассеяния последовательно отмечались наземными лидарными станциями, расположенными в США, Японии и Европе.

Самые резкие изменения были отмечены сразу же после извержения обсерваторией Мауна-Лоа на Гавайях. Гавайи располагаются непосредственно на пути ветров от Эль-Чичона, и, когда над обсерваторией появилось стратосферное облако, его плотность еще не уменьшилась сколько-нибудь существенно. Величина сигнала, зарегистрированного лидаром, была наивысшей за время его работы с 1973 г. Это облако было в 140 раз плотнее, чем облако, возникшее при извержении вулкана Сент-Хеленс.

Первоначально облако было достаточно плотным, чтобы его можно было обнаружить по доле солнечной радиации в видимой части спектра, отраженной им в космическое пространство. Движение облака вокруг Земли с востока на запад прослеживалось по изображениям, полученным с помощью многих спутников, в том числе американских NOAA-6, NOAA-7, GOES-East, GOES-West, японского GMS и западноевропейского Meteosat. «Язык» аэрозоля наивысшей плотности, ось которого располагалась около 20° с.ш., 9 апреля достиг Гавайев, 16 апреля — Японии, 20 апреля — Красного моря, а к 26 апреля обогнул весь земной шар. Движение облака под действием восточного стратосферного ветра происходило со скоростью около 20 м/с, или примерно 70 км/час. Делая свой первый виток вокруг Земли, облако распространилось вширь и заняло 25° -градусный пояс примерно от 5° до 30° с.ш.

КОГДА аэрозольное облако начало рассеиваться, его стало все труднее и труднее отличать от нормальных облаков, паров воды, отблесков солнеч-

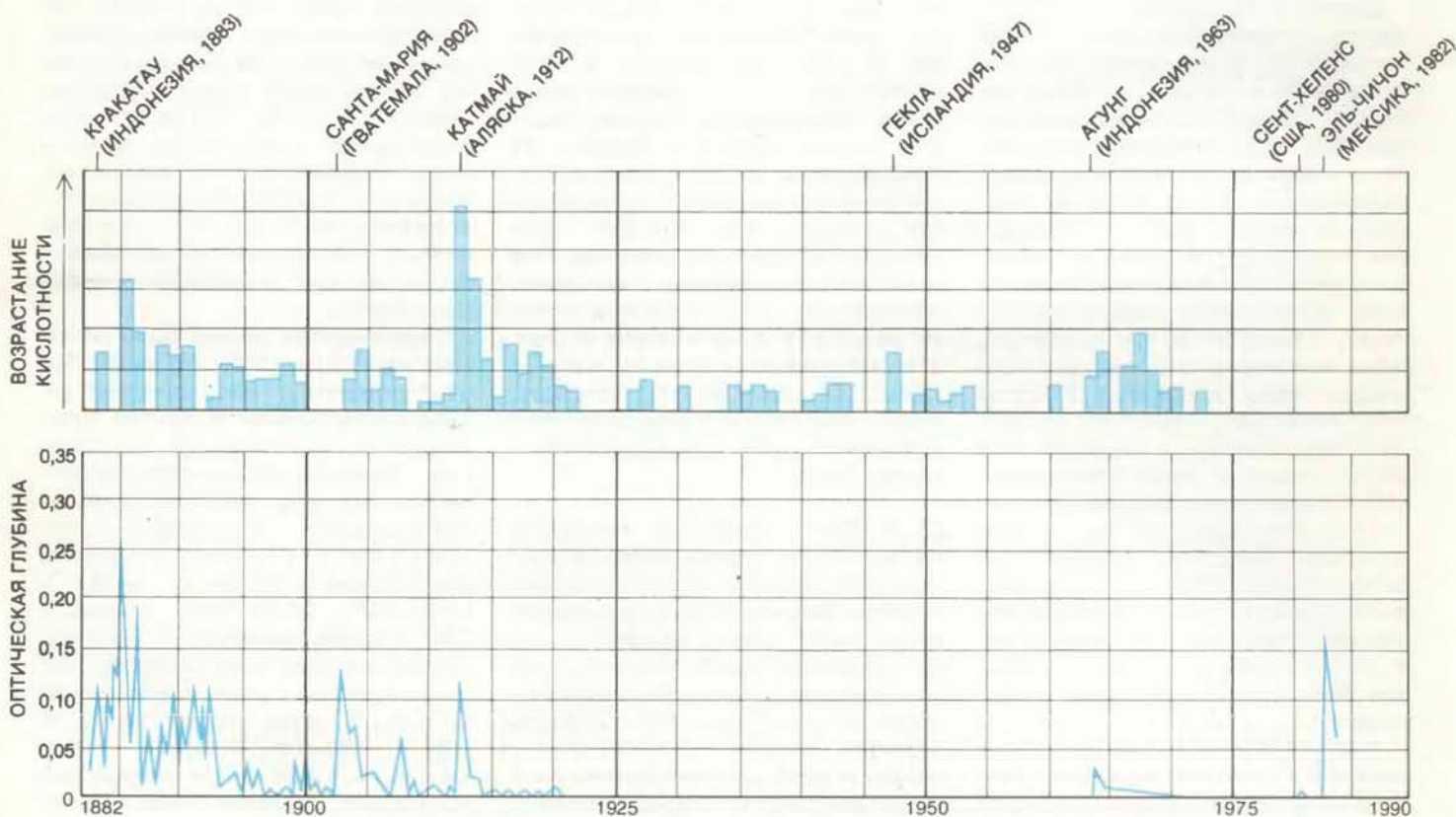
ных лучей от океанских волн и других источников отраженного света. Однако оказалось, что приборы, не предназначенные для обнаружения аэрозоля, могут проследивать это облако значительно дольше. Например, инфракрасный радиометр на борту спутника Solar Mesosphere Explorer, который обычно измеряет излучение паров воды в стратосфере при длине волны 6,3 мкм, смог зафиксировать инфракрасное излучение вулканического аэрозоля. Одной из наиболее интересных особенностей карт, составленных по измерениям с этого спутника, было то, что основная часть облака больше шести месяцев после извержения оставалась южнее 30° с.ш. Такой замкнутый характер стратосферной циркуляции был неожиданностью; особенно интересно в связи с этим отметить, что один из анализов температурных данных позволяет предположить, что максимальное воздействие на температуры Северного полушария Эль-Чичон оказывал тогда, когда большая часть

аэрозоля находилась еще в пределах широт, составляющих одну треть пути от экватора к полюсу.

Большинство измерений стратосферного облака, выполненных со спутников, можно было принять только в качестве некоторых показателей количества разных веществ в стратосфере, включая пыль, пары воды и аэрозоль серной кислоты. Но вскоре после извержения выяснилось, что количество газообразного диоксида серы в вулканическом облаке можно установить по показаниям спектрометра, установленного на спутнике Nimbus-7 и предназначенного для картирования содержания озона в атмосфере. С помощью этого спектрометра обычно определяют уровень поглощения озона в ультрафиолетовой области спектра путем сравнения интенсивности ультрафиолетового излучения, отражаемого стратосферой, с величиной, выведенной из теоретической модели поглощения, рассеяния и пропускания ультрафиолетовых лучей в атмосфере.

Газообразный диоксид серы снижает отражательную способность стратосферы в ультрафиолетовой области спектра, в результате чего повышается кажущийся уровень озона, но вклад SO_2 можно отделить от влияния озона и других газов, если исследовать отражательную способность при различных длинах волн. SO_2 поглощает УФ-излучение при двух длинах волн около 0,3 мкм, другие газы в этой области не поглощают. На основе спектральных данных и оценок размера облака Эль-Чичона А. Крюгер из Годдардовского центра космических полетов НАСА оценивает количество газообразного диоксида серы, выброшенного вулканом в стратосферу, в 3,3 млн. тонн. Эти данные указывают также на то, что к июлю 1982 г., т.е. спустя примерно три месяца после извержения, весь SO_2 превратился в серную кислоту.

Такая оценка начального количества газообразного диоксида серы ниже содержания аэрозоля серной кислоты в стратосфере, полученного другими



ПИКИ КИСЛОТНОСТИ льда в ледниковом покрове Гренландии коррелируются с периодами, когда атмосфера, по имеющимся сведениям, была менее прозрачной, чем обычно. Кислотность годовых слоев льда в керне, взятом из этого ледникового покрова в начале 70-х годов (вверху), может служить хорошей мерой количества аэрозоля серной кислоты в стратосфере в то время. График оптической глубины стратосферы Северного полушария (внизу) составлен по сообщениям обсерваторий об интенсивности солнечного и звездного свечения. Большинство пиков совпадает с извержениями соответствующего времени; некоторые из этих извержений отмечены на рисунке. В период между 1920 и

1960 гг. было сравнительно мало крупных эксплозивных извержений, которые вызвали бы появление стратосферных облаков. При интерпретации графика необходимо учитывать, на какой широте происходило извержение. Например, расположенные в высоких широтах вулканы Катмай (извергавшийся в 1912 г.) и Гекла (1947 г.) могли оказать сильное воздействие на кислотность гренландского льда. Кислотность ледяных кернов измерялась К. Хаммером из Копенгагенского университета. График оптической глубины стратосферы на период до 1970 г. составлен О. Туном и Дж. Поллаком из Эймского исследовательского центра НАСА.

учеными. Поэтому возникает вопрос о том, не была ли сера выброшена в стратосферу в виде каких-то других газов. Одна из возможностей состоит в том, что часть сероводорода, выделенного вулканом, до попадания в стратосферу еще не окислилась.

Пробы, взятые из стратосферного облака с помощью самолетов и воздушных шаров-зондов, позволили ближе взглянуть на его состав и динамику его роста и рассеяния. Пробы аэрозоля были взяты в ходе полетов по программе Джонсоновского космического центра, выполняемых с целью сбора космической пыли, а также специалистами из Эймского исследовательского центра. Д. Маккей и И. Маккиннон из Джонсоновского центра обнаружили, что в мае и в начале июня 1982 г. в облаке еще содержалось значительное количество пепла. Примерно на 85% пепел состоял из угловатых обломков вулканического стекла. Стекланные осколки были покрыты капельками серной кислоты, а на некоторых осколках находились мелкие содержащие серу кристаллы (вероятно, ангидрит или другой сульфатный минерал), сублимированные на частицах пепла во время извержения или после него.

В МАЕ пепловые частицы имели средний диаметр 3—6 мкм. К июлю более крупные частицы выпали из стратосферы, и средний диаметр уменьшился до 1—2 мкм. Изучение взятых проб показало также, что агрегаты пепла и аэрозолей серной кислоты имеют достаточно низкую плотность и для выпадения из стратосферы должны были достичь гораздо больших размеров. Были найдены частицы диаметром до 80 мкм с плотностью всего лишь 0,1 г/см³.

Самые важные сведения о динамике изменения содержания аэрозоля в стратосферном облаке были собраны с помощью приборов, установленных на воздушных шарах-зондах. Д. Гофман и Дж. Розен из Университета шт. Вайоминг проводят такое исследование стратосферы начиная с 1971 г.; они использовали радиозонды с фотоэлектрическими счетчиками частиц, способными обнаруживать ядра конденсации (частицы, на которых происходит конденсация паров) очень малого диаметра — вплоть до 0,02 мкм — и отличать капельки жидкости от твердых частиц путем нагревания. На графиках распределения капелек аэрозоля в облаке по их размеру, составленных Гофманом и Розеном по данным, полученным в мае 1982 г., видны два пика: один — около 0,04 мкм, соответствующий только что образовавшимся капелькам, а другой — около 1,4 мкм, что отвечает капелькам, уже выросшим за счет накопления паров серной кислоты. Данные последующих запу-

сков воздушных шаров в августе и октябре 1982 г. показывают, что число очень маленьких капелек уменьшается; по-видимому, образование новых ядер конденсации к этому времени остановилось. Однако число крупных капелек даже в октябре снизилось мало; растущие капли, очевидно, все еще продолжали замещать те капли, которые выпадали из стратосферы.

Измерения средней плотности и размера капелек, выполненные с помощью воздушных шаров-зондов, и данные о размерах облака были использованы для оценки общей массы аэрозолей в стратосфере. Согласно этой оценке, через месяц после извержения в стратосфере находилось, возможно, до 20 млн. тонн аэрозоля серной кислоты. К апрелю 1983 г., т.е. спустя год после извержения, масса аэрозоля стала меньше 8 млн. тонн.

Содержащиеся в стратосфере аэрозоли влияют на мировой «бюджет» излучения и поглощения тепловой энергии главным образом благодаря тому, что они поглощают и отражают солнечную энергию, хотя поглощается и инфракрасное излучение из нижних слоев атмосферы. В результате поглощения и рассеяния света в атмосфере возникают различные оптические явления и происходит снижение поверхностных температур. Поглощение инфракрасной составляющей солнечной радиации сказывается главным образом в повышении стратосферных температур.

После извержения Эль-Чичона температура экваториальной стратосферы повысилась приблизительно на 4° С; отмеченные тогда значения были наивысшими с 1958 г., когда началась непрерывная регистрация стратосферной температуры. Вскоре после извержения стали поступать сообщения об атмосферных оптических явлениях, подобных тем, которые последовали за извержением Кракатау в 1883 г. и вулкана Агунг в 1963 г.; некоторые такие явления наблюдались еще и в прошлом году. Например, Эйдин и Марджори Майнел из Университета шт. Аризона сообщили о необыкновенно ярких и продолжительных солнечных восходах и закатах в Тусоне, начавшихся в апреле 1983 г. Длинные «перья» аэрозоля были видны в верхней атмосфере 7 мая, когда основная часть облака проходила, как казалось местным жителям, к северо-западу от города. В течение некоторого времени небо над Аризоной было бледно-голубого цвета, а не ярко-синего, каким оно обычно бывает над юго-западными районами США.

Р АССВЕТЫ, свидетельствующие о присутствии стратосферных аэрозолей, начинаются, как правило, с появления высоко над горизонтом лавандово-пурпурного зарева, посте-

пенно становящегося желтым и оранжевым. После заката наблюдается ярко-красная вечерняя заря, возникающая в результате отражения солнечных лучей от аэрозольного облака. Выше над горизонтом заря делается темно-багровой. Расслоенные облака проявляются иногда горизонтальными полосками света. Некоторые наблюдатели сообщали также о кольцах Бишопа — еще одном оптическом эффекте, характерном для вулканических аэрозолей. Такие кольца, названные по имени преподобного С. Бишопа, впервые описавшего эти явления после извержения Кракатау, представляют собой гало вокруг солнца с обратным порядком цветов (красный цвет снаружи).

Самым важным эффектом воздействия аэрозольного облака Эль-Чичона на климат земного шара будет, вероятно, снижение средних температур. Вулканические аэрозоли, как правило, вызывают падение температуры на долю градуса Цельсия. Хотя столь малое, казалось бы, изменение на деле оказывается существенным для климата, отличить его от естественных флуктуаций нелегко. Особенно трудно это сделать в рассматриваемом случае, так как 1981 г. был в Северном полушарии самым теплым с начала наблюдений (примерно на 0,5° С теплее по сравнению с долгосрочными средними значениями), а в начале 1982 г., еще до извержения Эль-Чичона, температура начала падать.

Исследователи, анализировавшие статистическую зависимость между вулканическими извержениями и снижением средней температуры, нашли, что температуры, усредненные в масштабе полушария, падают приблизительно на 0,3° С, и это похолодание ощущается после крупных извержений в течение 1—3 лет. Более детальные предсказания того, какое воздействие окажет извержение Эль-Чичона на температуру, делались по данным об изменении оптической глубины (т.е. об изменении степени непрозрачности, мутности) стратосферы, связанном с этим извержением, и по нескольким различным математическим моделям климата. Оптическую глубину можно определять путем сравнения показаний фотометра или пиргелиометра с нормальными значениями интенсивности света. На основании данных о падении температуры, вызванном предыдущими извержениями, при которых отмечались подобные изменения оптической глубины стратосферы, было предсказано, что извержение Эль-Чичона должно привести к снижению температуры Северного полушария к 1983 г. приблизительно на 0,4°. Согласно модели климата, разработанной А. Робом из Университета шт. Мэриленд, к следующей зиме (1984—1985 гг.) похолодание достигнет 0,5°.

Другие климатические модели предсказывают такое же снижение температуры, хотя сроки задержки похолодания меняются от одной модели к другой в зависимости от предположений, касающихся условий распространения и рассеяния вулканического облака.

Один из недавно выполненных анализов падения температуры после вулканических извержений (в том числе после извержения Эль-Чичона) привел к поразительным выводам. П. Келли и К. Сир из Университета Восточной Англии исследовали изменение среднемесячных температур Северного полушария после крупных извержений, отмечавшихся за последние 100 лет. Оказалось, что если вулкан находится также в Северном полушарии, то максимальное понижение температуры наблюдается уже через два месяца после извержения, а примерно через год следует второе понижение, после чего температура медленно возвращается на прежний уровень. Изменение температуры Северного полушария в ответ на извержение в Южном полушарии задерживается, вероятно, на 7—8 месяцев.

Согласно выводам Келли и Сира, извержение Эль-Чичона, расположенного на 17° с.ш., оказало наибольшее влияние на среднемесячные температуры (вызвав падение на 0,2° С) уже в июне 1982 г., спустя два месяца после извержения. Более того, поскольку этот эффект приходится на период, когда вулканическое облако еще не опоясало земной шар и в нем содержалось значительное количество пыли, предполагается, что оно способно влиять на температуру в более широком поясе, чем оно покрывает, и что похолоданию способствует как накапливающаяся в атмосфере серная кислота, так и вулканическая пыль.

ПАДЕНИЕ поверхностной температуры, возможно, было не единственным результатом воздействия извержения Эль-Чичона на климат Земли. При изменении вертикального профиля атмосферных температур могла измениться и картина атмосферной циркуляции, что, по-видимому, повлияло на интенсивное развитие явления Эль-Ниньо, отмеченного прошлой зимой (1982—1983 гг.). Эль-Ниньо сопровождается резким изменением характера как атмосферной, так и океанической циркуляции в экваториальной области Тихого океана. Хотя явление типа Эль-Ниньо распознается по всей периферии Тихого океана, его обычно ассоциируют с резким изменением океанских течений у западного побережья Южной Америки, где оно обычно начинается. В этом районе периодически ослабевают юго-восточные пассаты. Когда ветры замирают, в водах западной части Тихого океана образуется на-

гонная волна, движущаяся в восточном направлении и перерезающая течение Гумбольдта, которое в нормальных условиях проходит вдоль побережья Южной Америки и направлено на север. Временное прекращение этого течения создает в свою очередь погодные аномалии на всем континенте.

Вполне вероятно, что аэрозольное облако могло вызвать развитие Эль-Ниньо вследствие нагрева верхней атмосферы тропиков. Повышение температуры стратосферы уменьшает разность температур между стратосферной и земной поверхностью, что приводит к ослаблению атмосферной циркуляции и зависящей от нее океанической циркуляции. Эль-Ниньо 1982—1983 гг. подтверждает такое предположение особенно потому, что дальнейшее его развитие отличалось от нормального. Необычным был тот факт, что это явление началось в мае, а не в октябре или ноябре и изменение схемы циркуляции проявилось по всей приэкваториальной зоне Тихого океана примерно в одно и то же время, а не перемещалось постепенно от берегов Южной Америки на запад.

Из девяти явлений Эль-Ниньо, отмеченных после 1950 г., только два отличались аномальным развитием: в 1982—1983 гг. и в 1963 г. (совпавшее с извержением вулкана Агунг, когда произошел предыдущий выброс материала в стратосферу и появилось плотное аэрозольное облако, оказавшее воздействие на тропические широты). Однако некоторые процессы, обычно предшествующие развитию Эль-Ниньо, например падение атмосферного давления на Таити и острове Пасхи в сочетании с изменениями давления в Австралии и Индонезии, в 1982 г. начались, по-видимому, еще до извержения Эль-Чичона. В настоящее время всякая причинная связь между вулканическими извержениями и аномальными Эль-Ниньо остается недоказанной, и этот вопрос, по-видимому, не удастся разрешить, пока не будут проведены дальнейшие исследования.

Теперь, когда извержение Эль-Чичона продемонстрировало ту важную роль, какую играет сера в общем вулканическом воздействии на атмосферу, нельзя ли нам обратиться к прошлому и наметить связь между прежними извержениями вулканов и климатическими изменениями. К сожалению, андезитовые извержения, такие, как извержение Эль-Чичона, оставляют мало следов в геологической истории. Как правило, андезитовые вулканы извергают небольшой объем магматического материала, после чего остаются тонкие, легко размываемые пепловые отложения. Поэтому геологам будет очень трудно (если вообще это возможно) собрать полные сведения о прошлых богатых серой изверже-

ниях путем изучения пепловых отложений. Вместе с тем частые небольшие извержения могут оказать такое же влияние на климат, как одно мощное извержение. Анализ климатических моделей позволяет предположить, что с периодами повышенной вулканической активности могут быть связаны некоторые продолжительные периоды снижения глобальных температур, отмеченные за время наблюдений.

Один из перспективных методов обнаружения в геологической истории богатых серой вулканических извержений — измерение кислотности годовых напластований льда в полярных ледниковых покровах Земли (в Гренландии и Антарктиде). Общее количество аэрозоля серной кислоты в атмосфере можно получить из значений кислотности ледяного слоя, если известна широта, на которой произошло извержение, хотя вулканы, расположенные близко к данному ледовому покрову, могут оказать чрезвычайно сильное влияние на кислотность, так как их сернистые газы попадают в ближайшие районы через тропосферу. При сопоставлении климатических данных с кислотностью различных слоев льда в керне буровых скважин выясняются интересные зависимости. Например, сравнительно кислый лед отлагался в период 1350—1700 гг. н.э., известный как «малое оледенение». Найденные зависимости позволяют предположить, что обогащенные серой вулканические извержения действительно могут служить важным фактором, определяющим продолжительные периоды изменения климата Земли.

АНАЛИЗ пепловых отложений Эль-Чичона еще не завершён; исследование стратосферного аэрозоля с помощью воздушных шаров-зондов, самолетов и спутников продолжают; показания наземных приборов все еще указывают на присутствие аэрозоля. Полученные данные углубили наши знания о связях между вулканами и мировым климатом. Дальнейший анализ этих данных и их использование при моделировании и прогнозировании воздействия вулканических извержений на климат будут занимать ученых — вулканологов и специалистов по атмосфере — еще многие годы. Извержение Эль-Чичона подтвердило гипотезу, согласно которой содержание серы в вулканических продуктах в большей степени влияет на размеры возникающего аэрозольного облака, чем объем выброшенного вулканом пепла. К каким выводам приведет дальнейшее исследование, покажет будущее, но уже сейчас ясно, что извержение Эль-Чичона дало в руки ученых беспрецедентный набор сведений о влиянии вулканических извержений на мировой климат.

Издательство **МИР** предлагает:

Р. Клейтон

ФОТОСИНТЕЗ

**Физические механизмы
и химические модели**

Перевод с английского



В книге одного из ведущих ученых в области фотосинтеза Р. Клейтона проблемы конверсии солнечной энергии обсуждаются и анализируются с точки зрения физики и химии. Помимо научных аспектов рассматриваются вопросы моделирования первичных электрохимических

стадий природного фотосинтеза с целью построения фотокатализаторов, электрохимических ячеек, генераторов фототоков на основе органических молекул.

Для научных работников — биохимиков, биофизиков, биологов.

1984, 20 л. Цена 3 р. 30 к.



Столкновения атомных ядер при высоких энергиях

В настоящее время физики научились бомбардировать мишени тяжелыми ядрами, летящими почти со скоростью света.

Среди осколков, рождающихся в столкновениях ядер, — аномалоны, таинственные объекты, которые вновь сталкиваются с ядрами гораздо раньше, чем следовало бы ожидать

УИЛЬЯМ К. МАК-ХАРРИС, ДЖОН О. РАСМУССЕН

В О ВРЕМЯ первого полета человека на Луну в 1969 г. астронавты на космическом корабле «Аполлон-11» сообщили о любопытном явлении. Когда, укладываясь спать, они закрывали глаза, то видели случайные точечные световые вспышки. На Земле вскоре догадались, что вспышки вызваны входящими в состав космических лучей тяжелыми атомными ядрами, которые ударялись о космический корабль. Количество энергии, которое каждое ядро передавало сетчатке глаза астронавта, было больше порога стимуляции светочувствительных клеток сетчатки.

Вскоре после полета это предположение проверили. Ускоритель протонов высоких энергий Лаборатории Лоуренса Калифорнийского университета в Беркли (Bevatron), построенный в начале 50-х годов, только что был реконструирован для ускорения более тяжелых ядер, чем отдельные протоны. Эдвин М. Мак-Миллан, который был тогда директором лаборатории, вызвался подставить голову под пучок тяжелых ядер большой энергии, имеющей малую интенсивность. Он увидел такие же вспышки, как и астронавты.

С тех пор в столкновениях ядер высокой энергии были обнаружены явления, объяснить которые оказалось гораздо труднее. Например, в результате столкновений возникают объекты, названные аномалонами. Это ядерные фрагменты, которые испытывают новое столкновение, пролетев удивительно короткое расстояние. Иногда в столкновениях «проглядывают истоки» сил, связывающих нуклоны (т.е. протоны и нейтроны) в ядре. Полагают, что это проявляется активность кварков — введенных теоретиками составных частей протонов и нейтронов. Вполне вероятно, что при экстремальных температурах и давлениях, которые возникают при столкновениях ядер высокой энергии, будут образовываться новые состояния ядерного вещества, подобные тем, что существо-

вали, когда возраст нашей Вселенной исчислялся миллионными долями секунды.

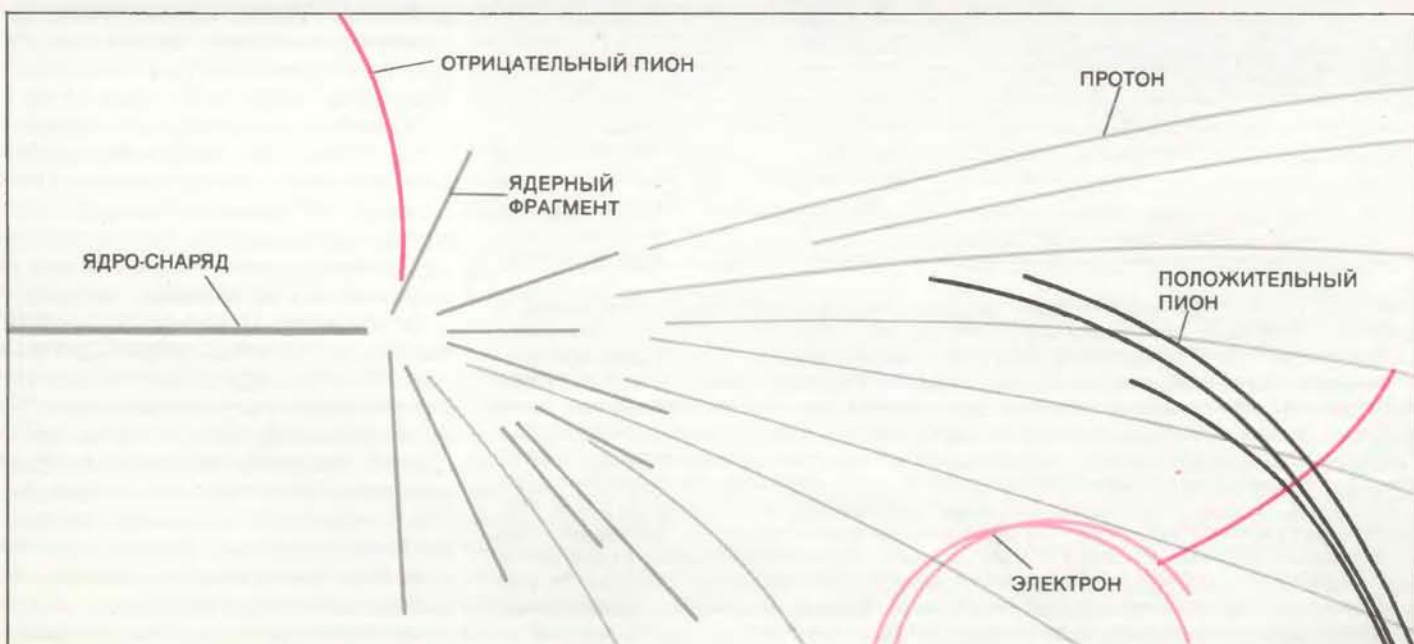
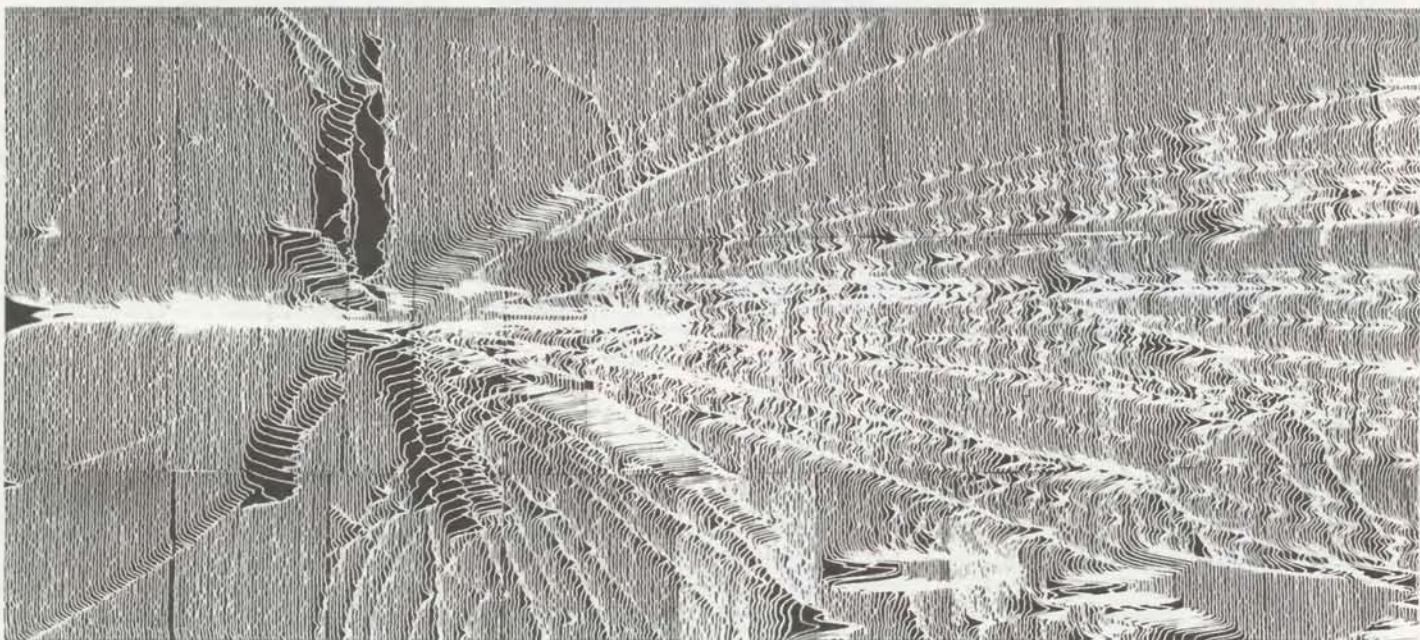
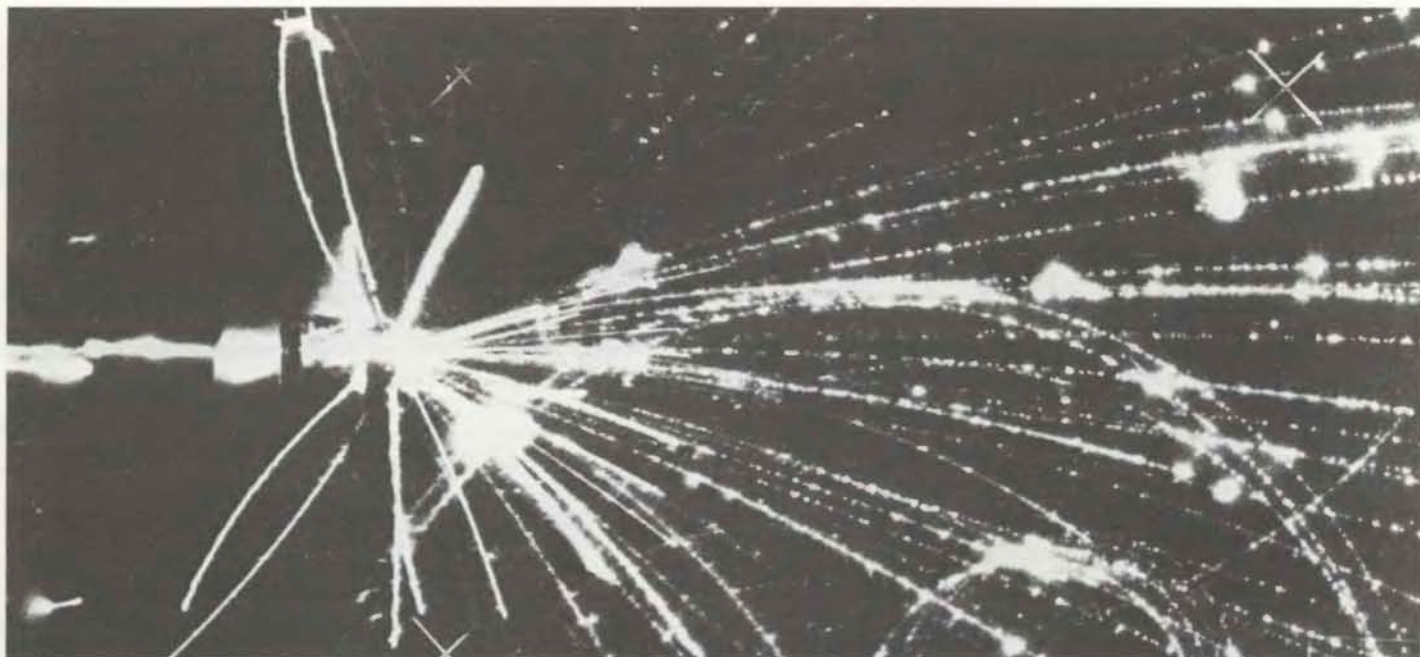
Почему вспышки, вызываемые в глазу столкновениями ядер высоких энергий, были открыты астронавтами в космическом пространстве, а не каким-нибудь пассажиром авиалайнера, собравшимся вздремнуть? Главная причина заключается в скорости потери энергии ядром при столкновениях в веществе. Эта скорость пропорциональна квадрату электрического заряда частицы-снаряда, участвующей в столкновении. Таким образом, ядро железа из космических лучей, которое, после того как все электроны, входившие в состав атома железа, были ободраны, стало ионом с положительным зарядом в 26 единиц, теряет энергию со скоростью в $26^2 = 676$ раз больше, чем протон из космических лучей, имеющий ту же скорость. Кроме того, тяжелые ядра из космических лучей с большей вероятностью разваливаются во время столкновений с ядрами газов в верхних слоях атмосферы, поэтому они не могут проникнуть в нижние слои атмосферы.

ЗАДОЛГО до полета «Аполлона-11» способность тяжелых ионов быстро терять энергию в веществе заставила медиков пропагандировать ускорители тяжелых ионов. Они доказывали,

что одно попадание такого иона может убить раковую клетку, а не просто нарушить ее активность. (Биологические повреждения, вызываемые в большинстве случаев радиоактивным излучением, происходят из-за появления в клетках перекисей и других химических радикалов.) В начале 70-х годов работало несколько ускорителей тяжелых ионов, но их пучки могли проникнуть в ткань на глубину всего лишь нескольких миллиметров. Для разгона ионов до больших энергий требовались ускорители, кольца которых имели бы такие же размеры, как у ускорителей элементарных частиц.

Физики не хотели закрывать старые ускорители, такие, как Bevatron, — они нашли им новое применение. Была сконструирована вакуумная линия транспортировки пучка, по которой линейный ускоритель тяжелых ионов NPLAC (Heavy-Ion Linear Accelerator) мог посылать свой пучок в Bevatron. Ионы с энергией 8,5 МэВ на 1 нуклон (т.е. 8,5 млн. электронвольт на каждый протон и нейтрон ядра) теперь могли быть ускорены до такой огромной энергии, как 2 ГэВ (2 млрд. электронвольт) на 1 нуклон. Эта комбинированная установка, названная Bevalac, смогла впервые ускорить тяжелые ядра в лабораторных условиях до скоростей, достигающих 95% скорости света, и тем самым сообщить им энергию,

СТОЛКНОВЕНИЕ ЯДЕР, сфотографированное в стримерной камере Лаборатории Лоуренса Калифорнийского университета в Беркли (*вверху*). В такой камере заряженная частица оставляет за собой трек ионизованного газа. *В середине* — картина столкновения, реконструированная устройством, состоящим из телекамеры, управляемой ЭВМ. Величина пиков соответствует интенсивности света, которая зависит от плотности ионизации треков и расстояния от каждого трека до телекамеры. На схеме *внизу* указаны некоторые частицы. Слева влетает ядро аргона-40; его кинетическая энергия 72 ГэВ. Пролетев в камере около 0,3 м, оно ударяет ядро свинца (мишень состоит из оксида свинца). Большая часть зарегистрированных осколков, летящих после столкновения вперед, — протоны; их траектории слегка загибаются вниз магнитным полем в камере. Некоторые из осколков — это пионы, в которые превратилась энергия столкновения. Некоторые положительные пионы пересекают треки протонов; отрицательные пионы движутся в обратную сторону. Самые тяжелые фрагменты состоят из протонов и нейтронов; они оставляют короткие, сильно ионизованные треки.



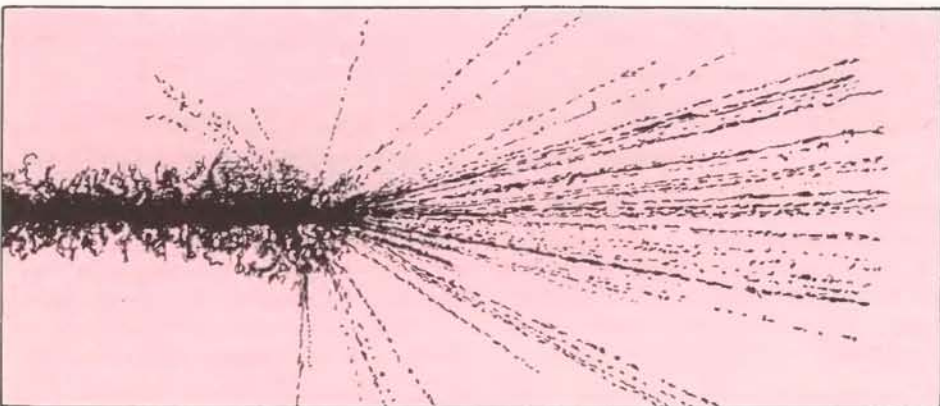
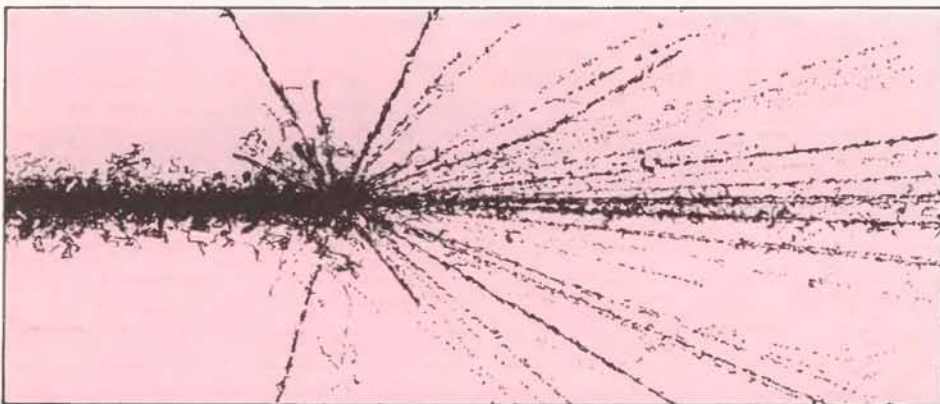
приближающуюся к энергии космических лучей. Эти скорости и энергии называют релятивистскими, потому что тела, движущиеся со скоростями, составляющими заметную часть скорости света, ведут себя в соответствии с предсказаниями специальной теории относительности (релятивизма). Тогда же в Объединенном институте ядерных исследований в Дубне (СССР) на ускорителе, называвшемся синхрофазотроном, начали ускорять ядра углерода до энергии, в два раза большей, чем на ускорителе Bevalac. Пучок, однако, имел меньшую интенсивность.

Возникшие параллельно с этими достижениями новые идеи в теоретической физике позволили глубже понять строение вещества. Кварковая теория

элементарных частиц приняла достаточно совершенную форму, чтобы объяснить внутреннюю структуру протонов и нейтронов. Давно известно, что атомное ядро состоит из протонов и нейтронов, находящихся на орбитальных «оболочках». Теперь выяснилось, что каждый протон или нейтрон состоит в свою очередь из трех кварков. Протон состоит из двух *u*-кварков и одного *d*-кварка, нейтрон — из двух *d*-кварков и одного *u*-кварка. Кварки имеют дробный электрический заряд: если заряд протона принять за единицу, то заряд *d*-кварка будет равен $-1/3$, а заряд *u*-кварка составит $+2/3$. Кварковая теория дала ответ на некоторые фундаментальные вопросы, касающиеся смещения разных состояний,

когда протон и нейтрон соединяются, образуя дейтрон (ядро водорода-2). Кроме того, как мы увидим, она позволяет проникнуть в глубь явлений при столкновениях ядер высоких энергий, которые ранее казались загадочными.

Новые возможности при получении пучка тяжелых ионов высоких энергий приводят к исчезновению «белых пятен» в наших знаниях. Рассмотрим такую схему: на ней по осям отложены энергия, которую можно сообщить частицам в лабораторных условиях, и их масса. Прогресс физики высоких энергий состоит в продвижении вдоль оси энергии. При этом используются пучки элементарных частиц — как правило, электронов, протонов, а также мезонов. (Мезоны образуют класс частиц, промежуточных по массе между электроном и протоном.) Напротив, наука о ядре продвигается по оси масс. В результате область, удаленная от обеих осей, оказывается terra incognita — ожидающей своих исследователей.



ЭТИ ТРИ ТИПА столкновений ядер высоких энергий были зарегистрированы в Беркли с помощью фотоэмульсии, которую облучали пучком ядер урана-238 с энергией 228 ГэВ. В периферическом столкновении (вверху) ядро урана пролетает близко от ядра в эмульсии, но так, чтобы они провзаимодействовали, хотя бы посредством электромагнитных сил. В результате ядро урана разделяется на два ядерных фрагмента. Ядро-мишень остается целым. (Тонкие «закорючки» вокруг треков созданы электронами, оторванными от многочисленных атомов в эмульсии.) В столкновении промежуточного типа (в середине) ядро урана ударяет ядро в эмульсии, но удар не лобовой. Оба ядра разваливаются. Некоторые более темные треки отмечают путь осколков ядра-мишени, вылетевших под большими углами и даже в направлении назад. В центральном столкновении (внизу) ядро урана поглощает ядро в эмульсии. Эта многонуклонная система затем распадается, а ее импульс способствует движению фрагментов вперед. В каждом столкновении диаметры треков увеличены примерно в 400 раз.

Столкновения ядер с ядрами при релятивистских энергиях можно разделить на три категории: периферические, промежуточные и центральные. Такое деление до некоторой степени произвольно, но любое данное столкновение, как правило, можно отнести к той или иной категории. В периферических столкновениях одно из ядер, — ядро-снаряд, — слегка задевает второе ядро — ядро-мишень, — или пролетает достаточно близко к нему, так что оба ядра взаимодействуют хотя бы посредством электрических сил. Большой осколок ядра-снаряда продолжает двигаться вперед. В промежуточном столкновении ядро-снаряд ударяет ядро-мишень, но, так сказать, «не в лоб». Например, падающее ядро может срезать половину ядра-мишени. Большие части обоих ядер полностью разрушаются. В центральных столкновениях ядро-снаряд попадает в мишень практически «в лоб». Затем смесь из двух ядер «разваливается», а импульс, имевшийся у падающего ядра, способствует движению осколков вперед.

Периферические столкновения заслуживают внимательного изучения. Результаты столкновений можно зарегистрировать разными типами детекторов. Например, это можно сделать с помощью фотографических эмульсий, в которых путь заряженной частицы сквозь слой бромида серебра виден как трек, образованный металлическим серебром, или в пузырьковой камере, где путь заряженной частицы сквозь перегретую жидкость, находящуюся под давлением, виден как трек из пузырьков (в сущности, заряженная частица вызывает локальное кипение жидкости). Есть еще стримерные камеры, в них частица проходит через газ, к которому приложено высокое напряжение,



УСКОРИТЕЛЬ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ в Беркли представляет собой два ускорителя, соединенных линией транспортировки пучка. Bevatron (слева) — кольцевой ускоритель, имеющий в диаметре около 30 м, — был построен в начале 50-х годов и предназначался для ускорения протонов до энергии 6 ГэВ. К 70-м годам он устарел. Затем было доказано, что он может

ускорять тяжелые ядра. Сейчас линейный ускоритель тяжелых ионов HILAC (справа) ускоряет ядра до энергии 8,5 МэВ на нуклон. Bevatron дополнительно ускоряет их до энергии 2 ГэВ на нуклон, и их скорость достигает 95% скорости света. Объединенную установку назвали Bevalac.

и ее путь отмечается последовательностью электрических разрядов, похожих на маленькие молнии. Данные всех детекторов подтверждают, что фрагменты, возникающие в периферических столкновениях, мало отклоняются от направления движения падающего ядра.

Однако с помощью этих детекторов невозможно определить импульс (или скорость) фрагментов. Для этого используют дополнительную технику: столкновение ядер проводят в магнитном поле, которое искривляет траектории фрагментов, если у них есть электрический заряд. Чем больше импульс фрагмента, тем меньше его траектория искривляется. Искривление можно измерить при визуальной регистрации трека или с помощью нескольких детекторов частиц, расположенных вокруг места столкновения. Измерения показывают, что фрагменты, возникающие в периферических столкновениях, имеют почти такую же скорость, как ядро-снаряд. Наблюдаются только небольшие отклонения, связанные с размером фрагментов; они максимальны, когда масса фрагмента равна половине массы ядра-снаряда. Некоторые изменения скоростей фрагментов связаны с изменением скорости нуклона в ядре. (Это происходит из-за своеобразного «покачивания» нуклона, которое называют фермиевским движением

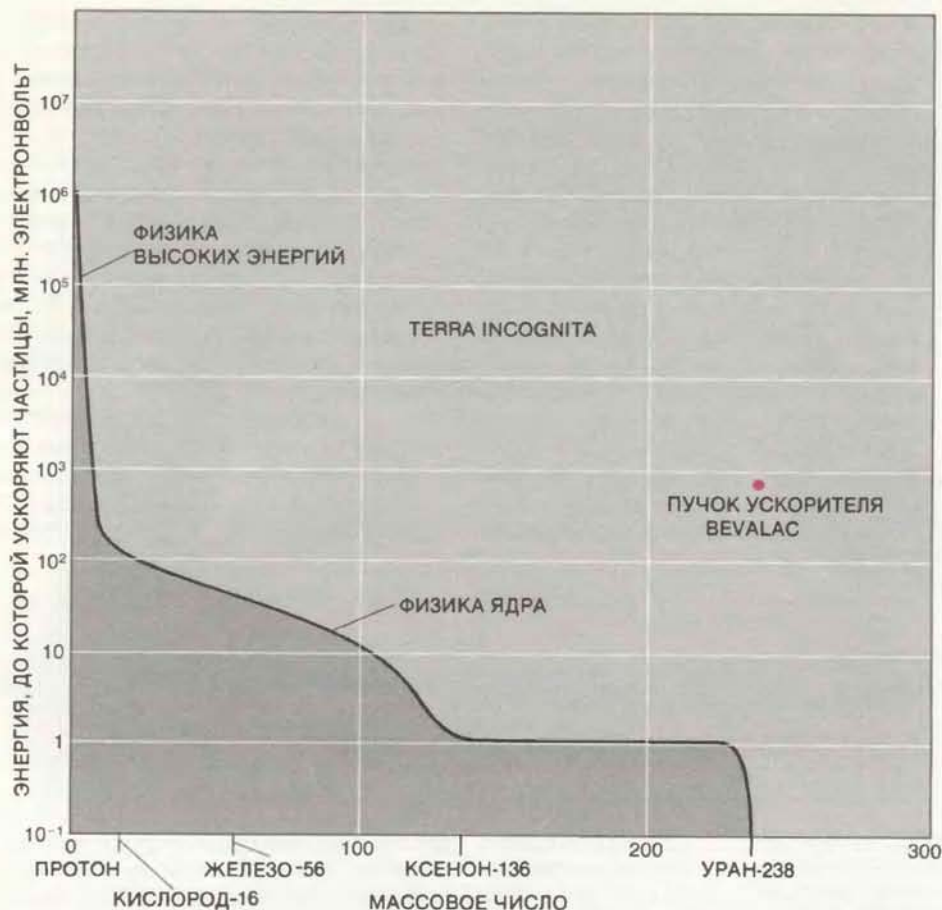
и которое почти одинаково во всех ядрах.)

Фрагменты, рождающиеся в периферических столкновениях при малых энергиях, ведут себя не так просто. При низких энергиях сталкивающиеся ядра взаимодействуют в течение отрезка времени, который на много порядков величины больше, чем время, необходимое для того, чтобы ядро начало колебаться или чтобы релятивистская частица пролетела сквозь ядро. Поэтому даже в касательном столкновении ядра имеют возможность слиться, хотя бы частично. В результате образуется жидкая капля ядерного вещества, энергия которой достаточна для испарения нуклонов во всевозможных направлениях с различными скоростями.

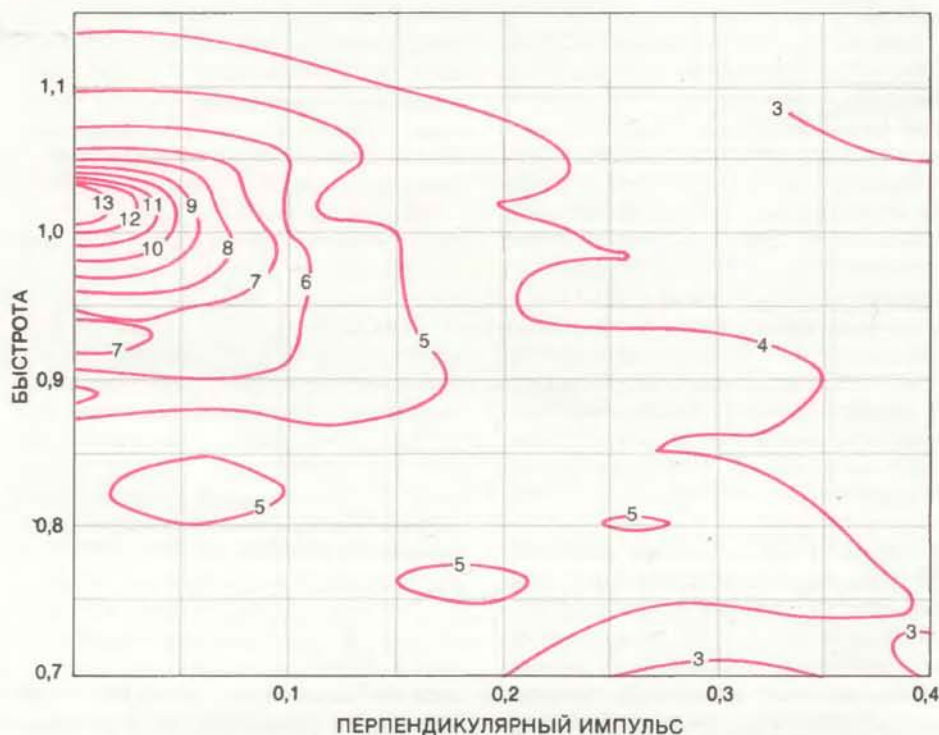
БОЛЬШАЯ часть энергии, выделяющейся при столкновении ядер высоких энергий, обычно превращается в массу в результате рождения множества экзотических нестабильных элементарных частиц, главным образом пионов (пионы — это самые легкие мезоны). История пионов богата событиями. В 30-х годах Хидеки Юкава предсказал их существование в ядре в качестве «виртуальных частиц». Он доказал, что сильное взаимодействие, связывающее нуклоны в ядре, переносится частицами, которыми обменива-

ются нуклоны. Этот обмен нельзя никак обнаружить, и пион появляется самопроизвольно как флуктуация ядерного состояния, будучи «виртуальным» (или «возможным»), а не реальным. Несмотря на эту «виртуальность», масса пиона, выраженная в единицах энергии, составляет 139 МэВ.

Интересное свойство проявляют пионы, рождающиеся в периферических столкновениях ядер высоких энергий. Многие отрицательно заряженные пионы как бы фокусируются: их притягивают положительно заряженные, летящие вперед фрагменты, приобретая их скорости и направление движения. Это явление можно использовать практически. На ускорителях частиц в Лос-Аламосе, Ванкувере и Цюрихе пучки пионов получают в результате столкновений интенсивных пучков протонов высоких энергий. Используя ускорители тяжелых ионов, можно получить пионные пучки более экономным способом. В качестве тяжелых ионов следует выбрать ядра кремния-28. Оказывается, что у движущихся в веществе пионов и ядер кремния-28 скорость потери энергии, которая пропорциональна полной энергии частицы, одинакова. Поэтому не имеет значения, в какой точке внутри вещества в результате столкновения рождается пион: где бы в мишени ядро кремния-28 ни испытало



НОВАЯ ОБЛАСТЬ НАУКИ, которую изучают, сталкивая ядра, имеющие большие энергии, хорошо видна на схеме. До самых высоких энергий были ускорены самые легкие частицы, в основном элементарные. Поэтому большую часть схемы занимает terra incognita. Ядра урана-238, разогнанные до энергий, доступных ускорителю Bevalac, попадают как раз в неизученную область (цветная точка).



ФОКУСИРОВКА ПИОНОВ — характерная черта столкновений ядер высоких энергий. Пучок ядер аргона-40 с энергией 21 ГэВ, ударяя мишень из хлорида калия, рождает отрицательные пионы, которые «фокусируются» таким образом, что приобретают почти ту же скорость, что и ядра пучка. По осям отложены: «быстрота» — мера скорости, составляющей значительную часть скорости света, и импульс, перпендикулярный направлению пучка. Контурные линии показывают относительное число отрицательных пионов.

столкновение, родившиеся отрицательные пионы будут хорошо сколлимированы с пионами, появившимися в других столкновениях.

СЛЕДУЮЩИЙ продукт периферических столкновений ядер высоких энергий (а также случайных столкновений промежуточного типа) более загадочен, чем пион. Это аномалон — осколок ядра-снаряда, чей свободный пробег (т.е. расстояние, которое он пролетает между двумя последовательными столкновениями) аномально короток. Может быть, что такое «аномалон», лучше всего объяснить так: аномалон — это ядро, которое взаимодействует досрочно. За последние два года накопилось много доказательств существования аномалонов. Однако эксперименты трудоемки и утомительны: приходится проследить последовательности столкновений, просматривая под микроскопом фотоэмульсии. К тому же доказательства существования аномалонов не всегда очевидны. Поэтому сообщество физиков-ядерщиков разделилось на два лагеря: верующих и неверующих. Почему аномалоны вызывают такое внимание и широкое обсуждение? Если они действительно существуют, это будет иметь далеко идущие последствия не только для физики ядра, но и для физики элементарных частиц и, значит, для фундаментальных теорий строения вещества.

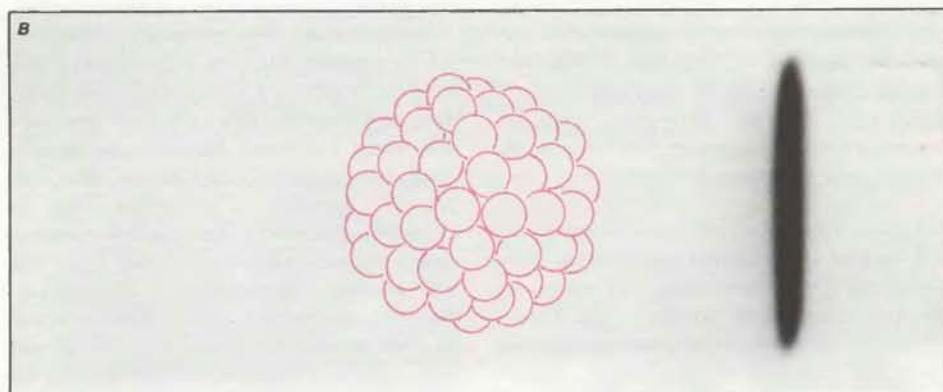
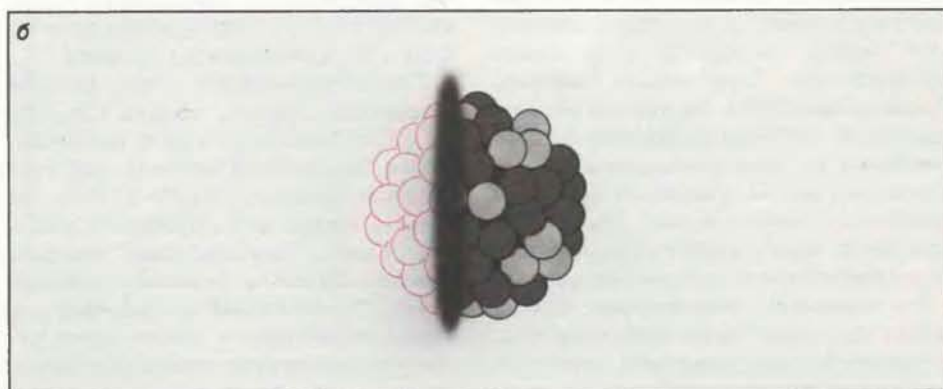
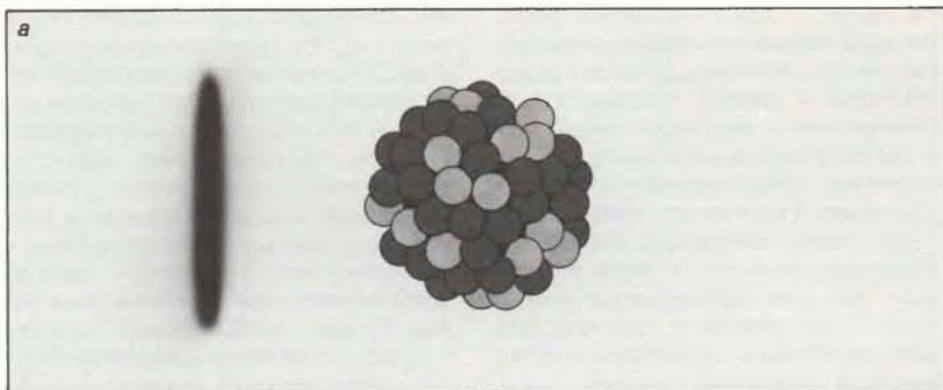
Аномалоны впервые заметили в начале 50-х годов при фотографической регистрации космических лучей. Иногда тяжелое ядро, сталкиваясь с ядром вещества фотоэмульсии, создавало «звезду» (как бы вспышку фотографических треков), а затем фрагмент, возникший в столкновении, создавал вторую «звезду», пролетев гораздо более короткое расстояние, чем следовало ожидать, скажем, только один — два сантиметра вместо десяти.

Легко понять затруднительное положение ученых, пытавшихся объяснить это странное явление. Представим себе, что мы многократно повторяем следующий эксперимент: ведем автомобиль по шоссе на большой скорости, вдруг сворачиваем в сторону и безо всякой дороги устремляемся в лес, в котором в беспорядке растут большие деревья. Иногда мы разбиваемся моментально, в другой раз задеваем несколько деревьев и успеваем проехать несколько большее расстояние. После многих попыток можно вычислить среднее расстояние, которое мы проезжаем по лесу. Оно зависит от ширины автомобиля и среднего расстояния между деревьями. В последовательной серии попыток автомобиля внешне одни и те же. Единственное известное нам различие состоит в том, что они были отремонтированы после одной

или нескольких предыдущих аварий. И мы с удивлением обнаруживаем, что такие автомобили разваливаются, ударившись о дерево, после того как проехали в среднем лишь одну десятую часть расстояния, которое проезжает новый автомобиль! Ясно, что время от времени происходит нечто неожиданное. После аварии автомобиль ведет себя так, как будто бы он стал намного шире. Это и будет «автомобиль-аномалон».

О наблюдении аномалонов при регистрации космических лучей с помощью фотоэмульсий время от времени сообщалось в 50-х и 60-х годах. После появления пучка на ускорителе Bevalac стало возможным регистрировать достаточное число контролируемых столкновений ядер высокой энергии и тем самым проверить свойства аномалонов. Три группы — в Лаборатории Лоуренса в Беркли, Национальном исследовательском совете в Оттаве и Нью-Йоркском университете в Буффало — исследовали фотоэмульсии, облучавшиеся на ускорителе Bevalac пучками разных ядер, имевших разные энергии — вплоть до железа-56 с энергией 1,88 ГэВ на 1 нуклон. Группа из Университета шт. Миннесота еще раз изучила уже известные данные о столкновениях космических лучей. И вот два года назад, ко времени, когда состоялось первое Международное рабочее совещание по аномалонам, совместные усилия привели к следующим результатам.

ВО-ПЕРВЫХ, аномалоны действительно имеют аномально короткий средний свободный пробег. Среди фрагментов ядра-снаряда, путь которых был прослежен разными группами ученых, малая часть (около 6%, хотя сообщавшиеся числа изменяются в пределах от 3 до 10%) имеет средний свободный пробег не больше 2,5 см, или меньше одной десятой пути ядра-снаряда. Во-вторых, аномалоны наблюдались только при энергиях падающих ядер больше 1 ГэВ на 1 нуклон. (При энергиях ниже 1,8 ГэВ на 1 нуклон выполнено так мало исследований, что точное значение пороговой энергии рождения аномалонов не определено.) В-третьих, аномалоны должны иметь время жизни по порядку величины не меньше 10^{-10} с, иначе они не смогли бы пролететь расстояние 2,5 см. Это время по грубым оценкам на 13 порядков величины больше, чем время, необходимое для возбуждения колебаний ядра. В-четвертых, если аномалон самопроизвольно распадается на лету, то распад сопровождается вылетом только электрически нейтральных частиц — нейтронов или гамма-лучей (квантов электромагнитного излучения высокой энергии). Это видно по отсутствию треков заряженных частиц, кото-



РЕЛЯТИВИСТСКОЕ СЖАТИЕ — еще одна характерная черта столкновений ядер. На рисунке показано гипотетическое столкновение при сверхвысокой энергии. Ядро урана с энергией один триллион электронвольт на нуклон подлетает к покоящемуся ядру урана (а). Ядро-снаряд, которое летит со скоростью, большей 99,999% скорости света, имеет форму диска; его сжатие предсказывается специальной теорией относительности. Столкновение с мишенью продолжается только 10^{-22} с. Это время слишком коротко, чтобы оба ядра пришли в равновесие, поэтому ядро-снаряд пролетает сквозь ядро-мишень (б). Тем не менее оно нагревает ядро-мишень до температуры, большей одного триллиона градусов. Такая температура близка к температуре Вселенной сразу же после Большого взрыва.

рые начинались бы от траектории аномалона в фотоэмульсии. Свойства аномалонов оказываются не зависящими от величины заряда фрагмента. Есть, правда, некоторые не вполне определенные указания на то, что аномалоны с зарядом в одну или две единицы никогда не образуются. Это пятая из важнейших характеристик аномалонов.

Шестое и, возможно, самое странное свойство аномалона состоит в своеобразном эффекте памяти, которое можно выразить словами: «однажды став аномаломом, всегда будешь аномаломом». Выражаясь более точно, это зна-

чит, что фрагмент, вылетевший из «звезды», созданной аномаломом, имеет больше шансов оказаться аномаломом, чем если бы он вылетел из другой — «неаномалонной» — звезды.

Это солидный список свойств. На протяжении последних двух лет группы ученых из лабораторий, разбросанных по всему миру (в Египте, Индии, Италии, СССР, ФРГ, Швейцарии, Швеции) изучали фотографии столкновений ядер высоких энергий, полученные на ускорителе Bevalac и синхротроне. В результате значительно улучшилась статистика данных об аномалонах. Кроме того, некоторые груп-

пы начали использовать новые детекторы, особенно пластик-трековые детекторы. Некоторые пластики чувствительны к ударам тяжелых ионов. Стопки тонких пластинок такого пластика облучают пучком ионов, а затем химически обрабатывают (травят). Травление увеличивает повреждения вдоль тонких конических углублений, которыми отмечен путь иона в детекторе. Большое преимущество нового метода заключается в том, что диаметр углубления, сделанного ионом с заданной скоростью, зависит только от его заряда. Измерив диаметр, можно узнать заряд, а измерение диаметров можно выполнять с помощью специальных приборов — сканеров, управляемых ЭВМ. На втором Международном рабочем совещании по аномалонам, которое проходило в Беркли прошлым летом, участники пришли к согласию относительно реальности списка из шести свойств аномалонов, хотя некоторые из них нельзя еще считать полностью доказанными. Кроме того, несколько групп сообщили, что, согласно их исследованиям, аномалоны всегда имеют электрический заряд, кратный единице электрического заряда. Таким образом, к нашему списку можно добавить седьмое свойство: аномалоны не имеют дробного электрического заряда. Другими словами, аномалоны не содержат случайно «заблудившихся» кварков.

ДАТЬ удовлетворительное теоретическое объяснение свойствам аномалонов по крайней мере так же сложно, как выполнить эксперимент. Предлагалось много теорий, но до сих пор ни одна из них не объяснила все факты настолько хорошо, чтобы ее признали хоть с некоторой вероятностью правильной. Наиболее эффектные теории, в которых аномалоны рассматривают

как проявления кварковой структуры вещества. Эти теории основаны на аналогии. Рассмотрим происхождение химической связи, т.е. связи атомов в молекуле. Эта связь имеет короткодействующий, насыщающийся характер; иначе говоря, она действует только между отдельными соседними атомами. Но возникает химическая связь в конечном счете благодаря далекодействующим электромагнитным силам. Ее короткодействующий характер есть результат происходящей на больших расстояниях от атома компенсации электрических зарядов ядра и электронов атома, которые равны по величине и противоположны по знаку.

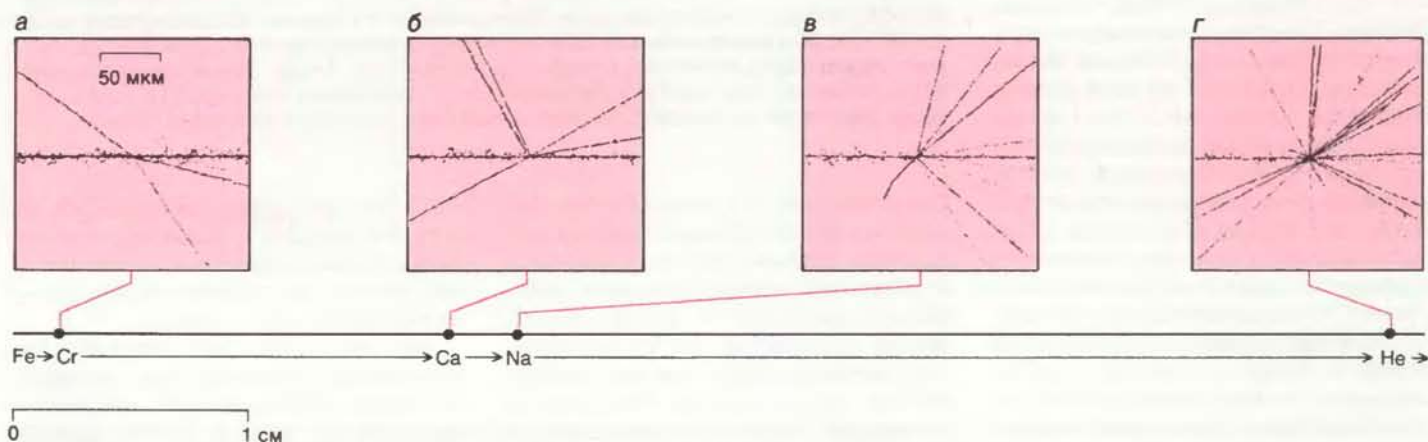
Теперь рассмотрим связь, которая удерживает нуклоны вместе. Она также короткодействующая и насыщающаяся, ее обычная область действия меньше размера ядра; может быть, она тоже возникает из далекодействующих сил. Связь, удерживающая нуклоны вместе, будет короткодействующей потому, что каждый из трех кварков, образующих нуклон, имеет заряд, отвечающий сильному взаимодействию и называемый «цветом», а эти цвета в обычных условиях взаимно гасятся.

Аномалоны представляют собой одно из первых реальных оснований для предположений о возможном проявлении далекодействия сильного взаимодействия. Поэтому были предприняты попытки представить аномалоны как группы кварков, в которых цвет не скомпенсирован; в результате далекодействующее сильное взаимодействие увеличивает вероятность столкновений и укорачивает средний свободный пробег ядерного фрагмента. Если все эти гипотезы выстроить в ряд, то на одном конце окажется «демонический дейтрон», который состоит не из двух кварковых триплетов, а из трех кварковых дублетов, а на другом — огромная

груда кварков. Пока нет гипотезы, которая была бы совместима со всеми пунктами из списка свойств аномалонов. Не последнее место среди трудностей занимает и соображение, что аномалоны рождаются при энергиях, на много меньших, чем те, которые необходимы для сильных перестроек кварковой структуры или рождения кварков.

Объяснения природы аномалонов, не связанные с кварками, также многочисленны. Они простираются от гипотезы о ядрах-пузырьках (пустых внутри пузырьках, состоящих из нуклонов) до ядер-квазимолекул (похожих на гантели образований, возникающих, когда два ядра объединяются, но не сливаются). Идея состоит в том, чтобы представить аномалон распухшим или раздутым объектом и увеличить его шанс столкнуться с каким-нибудь другим объектом. Среди этих объяснений есть и выдвинутое нами, согласно которому аномалон представляет собой образование из отрицательных пионов, сильно связанных с ядерным фрагментом, обогащенным нейтронами. Пионы могут «вытягивать» нейтроны наружу посредством конвекции и увеличивать поверхность, создавая на фрагменте выпуклости. Известно, что в столкновениях ядер рождается большее число пионов, а отрицательные пионы собираются вокруг фрагментов больших размеров. Кроме того, можно указать, что пионы притягиваются к протонам и нейтронам посредством сильного взаимодействия и что отрицательные пионы притягиваются гораздо сильнее к нейтронам, чем к протонам.

Основная проблема нашей модели состоит в том, что при любом контакте отрицательных пионов с протонами вещество распадается за время, намного более короткое, чем время жизни



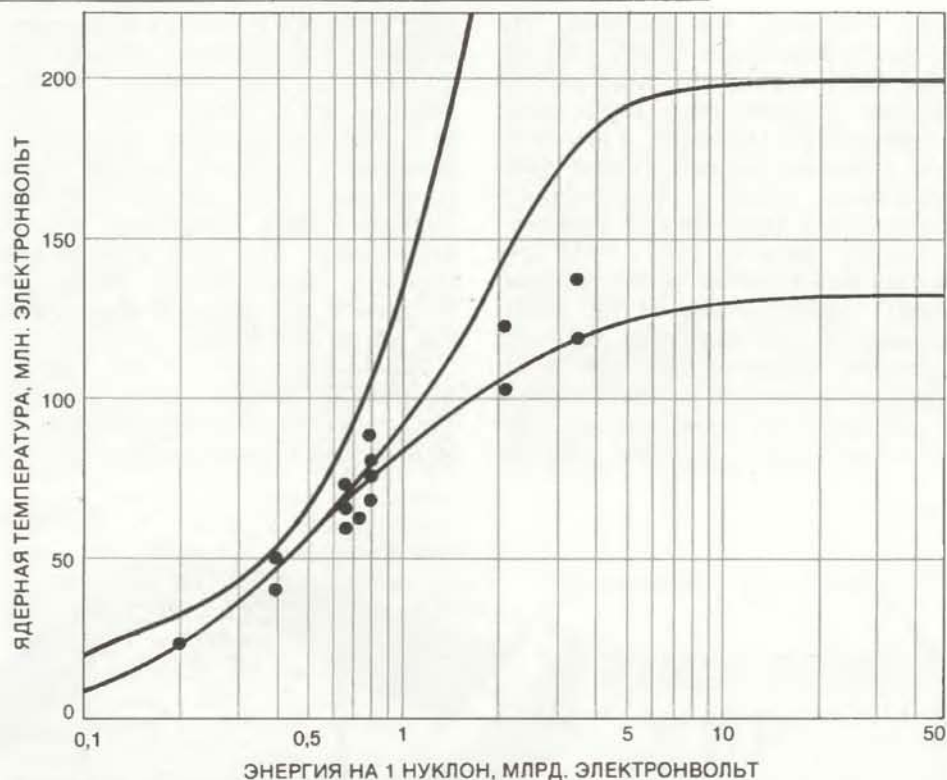
АНОМАЛОНЫ — загадочное явление в столкновениях ядер высоких энергий. Это ядерные фрагменты, имеющие аномально короткие расстояния между последовательными столкновениями. На иллюстрации дан пример рождения аномалона. Ядро железа с энергией 1,88 ГэВ на нуклон сталкивается с ядром в фотоэмульсии, рождая ядро хрома (а). Пролетев 1,62 см, ядро хрома испытывает столкновение,

рождая ядро кальция (б), причем следовало ожидать, что ядро хрома пролетит 10 см или больше. Через 0,3 см ядро кальция тоже испытывает столкновение, рождая ядро натрия (в). Пройденное расстояние опять удивительно мало. Пролетев 3,75 см, ядро натрия испытывает столкновение, в котором рождается ядро гелия (г). Эта последовательность событий была зарегистрирована на ускорителе Bevalac.

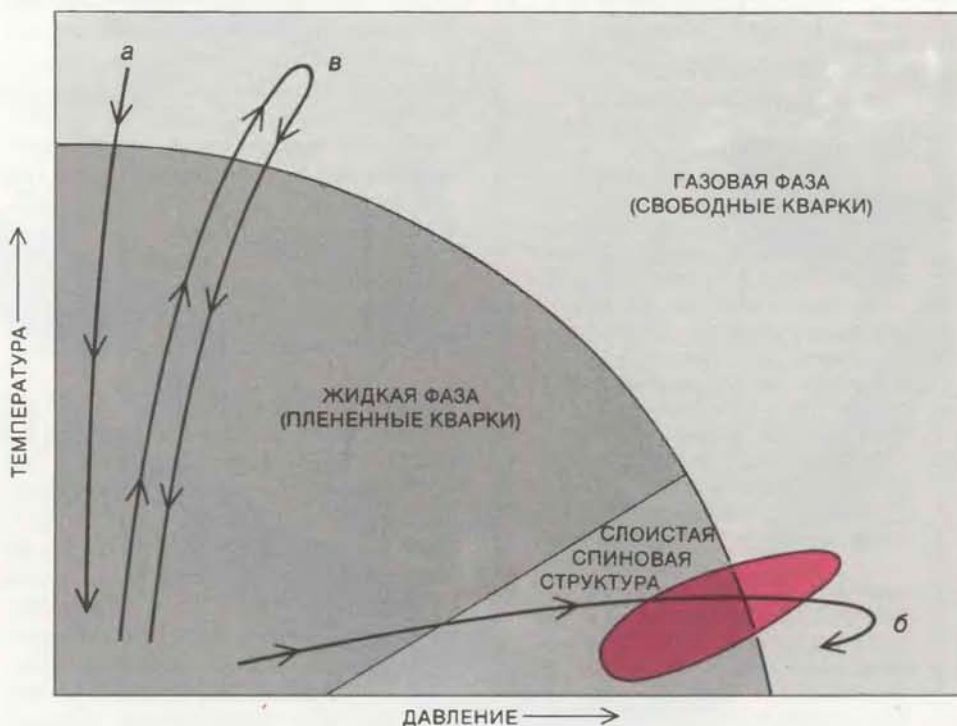
аномалона. В нас тем не менее вселяют надежду недавние теоретические расчеты, согласно которым объект, состоящий из нескольких отрицательных пионов и нейтронов, может существовать достаточно долго и его можно обнаружить. Пока таких пион-нейтронных образований никто не наблюдал, но поиски на разных ускорителях тяжелых ионов могут привести к их обнаружению. Действительно, похоже, что отрицательные пионы, связанные в ядре, могут стать явлением, присущим не только теории аномалонов. Данные, полученные с помощью детекторов частиц, по-видимому, указывают на то, что пионы могут захватываться на орбиту вокруг ядерного фрагмента, а затем срывать с орбиты и улетать прочь. Поэтому мы думаем, что аномалон есть не что иное, как пион-нейтронный ореол, окружающий ядерный остов. Центробежные силы, действующие на пион-нейтронные образования, удерживают их на некотором расстоянии от протонов остова. Возможно, что необходимое в этой теории обогащенное нейтронами ядро (или обогащенные нейтронами области ядра) может объяснить эффект памяти, свойственный аномалонам. Обогащенный нейтронами ядерный фрагмент в последующих столкновениях будет вновь создавать обогащенные нейтронами фрагменты.

Можно ли усмотреть связь между пион-нейтронными образованиями и проявлениями «дальнедействующего происхождения» сильного взаимодействия? До сих пор попытки объяснить кварковую структуру простых ядер концентрировались вокруг идеи об объединении нескольких кварковых триплетов. Это гарантировало виртуальную компенсацию цветовых зарядов. А что можно сказать о расчетах, основанных на объединении в одну группу, скажем, отрицательного пиона и двух нейтронов? Это простейшее из пион-нейтронных образований будет состоять из восьми кварков: пяти кварков d , двух кварков u и одного антикварка \bar{u} . (Отрицательный пион представляет собой спаренные кварк d и антикварк \bar{u}). Компенсация цветовых зарядов в таком кластере, по-видимому, менее вероятна.

ОДИН аспект ядерных столкновений при высоких энергиях делает их особенно многообещающими для космологических исследований. Огромная скорость, с которой тяжелое ядро, имеющее большую энергию, отдает ее ядру-мишени, означает, что ядро-мишень можно нагреть до температуры, весьма близкой к той, которую имела Вселенная в течение очень короткого периода времени после Большого взрыва. Таких температур нельзя достичь, бомбардируя тяжелые ядра пуч-



ЯДЕРНЫЕ ТЕМПЕРАТУРЫ, которые характерны для столкновений ядер, ускоренных на установке Bevalac, используют для проверки моделей ядерного вещества в экстремальных условиях. Кривые — результат теоретических расчетов. Согласно одной из гипотез (*нижняя кривая*), при нагревании ядра вся энергия превращается в гипероны, возбужденные состояния нуклонов. Затем гипероны распадаются на нуклоны и пионы. Противоположная гипотеза (*верхняя кривая*) исходит из того, что при нагревании никаких превращений нуклонов не происходит. Третья гипотеза (*средняя кривая*) носит промежуточный характер.



ГИПОТЕТИЧЕСКАЯ ФАЗОВАЯ ДИАГРАММА показывает, какие типы ядерного вещества могут возникать при изменении температуры и давления. Обычные ядра находятся в «жидкой» фазе (*темно-серый цвет*). При очень высоких температурах и давлениях нуклоны расщепляются на кварки и глюоны (*светло-серый цвет*). При высоких давлениях и промежуточных температурах может существовать третья фаза, в которой спины нуклонов выстраиваются слоями (*серый цвет*). Траектория *а* показывает эволюцию ядерного вещества в ранней Вселенной, траектория *б* — эволюцию ядерного вещества во время взрыва сверхновой, а траектория *в* — эволюцию ядерного вещества во время центрального столкновения ядер. Периферическим столкновениям ядер могут соответствовать разные области (*выделено цветом*).

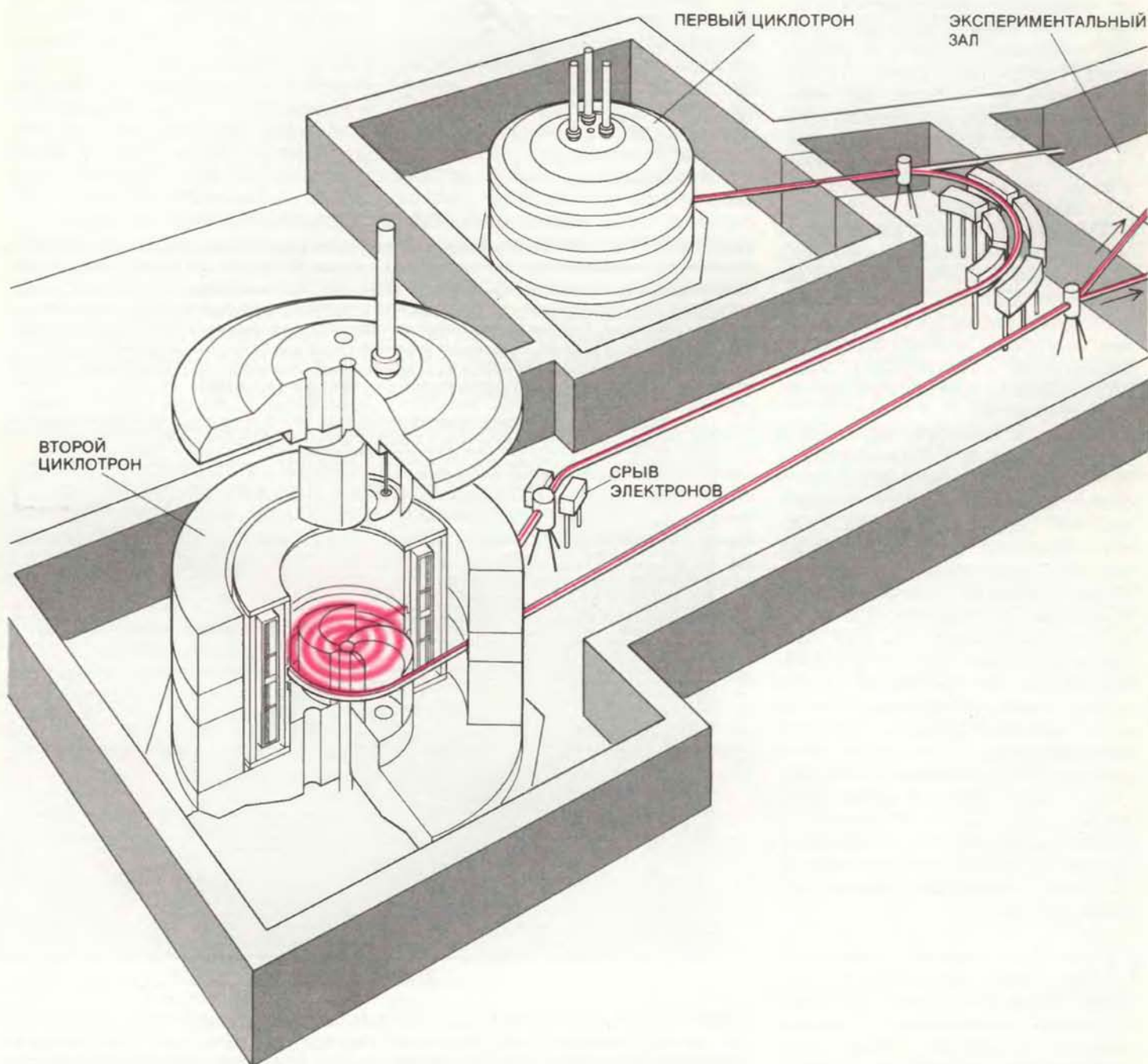
ками электронов или протонов. Эти легкие частицы будут терять лишь малую часть их полной кинетической энергии, пролетая даже сквозь самые тяжелые ядра. Напротив, в центральном столкновении двух атомов урана ядро-снаряд может остановиться, отдав всю свою кинетическую энергию.

Группа ученых из ФРГ и США проводила на ускорителе Bevalac эксперименты, направленные на то, чтобы установить, действительно ли ядра, имеющие максимальные для этого ускорителя энергии, останавливаются в центральных столкновениях. Они сконструировали сложную сфериче-

скую оболочку из многих детекторов, которые определяют как энергию, так и скорость потерь энергии у частиц, вылетающих из мишени. Затем следует «стена» из детекторов, которая расположена в нескольких метрах «ниже по течению». Всего используется более 1000 детекторов. Полученные данные показывают, что ядра кальция еще слишком малы, чтобы полностью остановить друг друга, но ядра ниобия уже достаточно велики для этого.

Понятие температуры ядра требует объяснения. Вообще говоря, температура служит просто мерой хаотического движения в группе частиц. Энергия

столкновения ядер превращается, по крайней мере частично, в хаотическое движение нуклонов ядра; следовательно, вполне можно говорить о ядерной температуре. У вещества, находящегося в тепловом равновесии (состоит ли оно из нуклонов, молекул или макроскопических частиц в состоянии хаотического движения), распределение скоростей спадает экспоненциально. Другими словами, частицы, имеющие большую энергию, относительно редки. Средняя кинетическая энергия пропорциональна температуре вещества T , выраженной в кельвинах. Константа пропорциональности — это по-



СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ ЦИКЛОТРОНЫ в Мичиганском университете — первые установки такого типа. Эти две машины будут ускорять тяжелые ядра до энергий 200 МэВ на нуклон. Один циклотрон, строительство которого уже завершено, будет ускорять слабо ионизованные атомы по спиральной траектории между полюсами сверхпроводящего магнита, которые имеют форму пропеллера. Диаметр

магнита — около 3 м; диаметр области, в которой происходит ускорение, равен 1,3 м. Затем пучок ионов будет направляться через фольгу, которая «обдирает» с атомов оставшиеся электроны, во второй циклотрон. Размеры и стоимость ускорителей невелики по сравнению с другими недавно построенными установками, а энергия на 1 нуклон в пучке будет выше, чем в большинстве ускорителей тяжелых ионов.

стоянная Больцмана k . Физики-ядерщики предпочитают не использовать величину T , которая принимает огромные значения (миллиарды кельвинов); они применяют величину kT — среднюю кинетическую энергию, приходящуюся на один нуклон.

Приведем несколько примеров. Температура поверхности Солнца (T) около 6000 кельвинов. Соответствующая кинетическая энергия (kT) составляет 0,5 эВ. Это означает, что атомы на поверхности Солнца имеют кинетическую энергию, меньшую, чем электроны, ускоренные напряжением батарейки карманного фонарика. (Понятно, что кинетическая энергия, полученная частицей при нагревании в обычных условиях, абсолютно не показательна.) Температура в центре Солнца предполагается равной 15 млн. кельвинов. Соответствующая кинетическая энергия составляет 1300 эВ, что приблизительно равно энергии электронов, ударяющих по экрану электронно-лучевой трубки обычного телевизора. Полагают, что температура в центре звезды, когда она становится сверхновой, составляет несколько миллиардов кельвинов. Соответствующая кинетическая энергия достигает 1 МэВ (энергия, сообщаемая электронам в самых мощных электронных микроскопах). Это верхний предел для температур, возникающих в процессах, которые протекают в сегодняшней Вселенной. Есть основания предполагать, что в ранней Вселенной преобладали намного большие температуры.

СЛУЧИТСЯ ли с ядерным веществом что-нибудь необычное, если нагреть его до исключительно высоких температур? Посмотрим, что происходит с обычным веществом, когда его нагревают. Первоначально оно в большинстве случаев твердое. Когда его нагревают, оно тает, плавится, превращаясь в жидкость. Потом начинает кипеть, становясь газом. Далее его молекулы распадаются на атомы. И наконец электроны отрываются от атомов, так что электроны и ионизованные ядра (некоторые из них потеряли все электроны) движутся независимо, образуя газ заряженных частиц — это плазма.

Ядерное вещество, по-видимому, не имеет твердой фазы; оно напоминает жидкость. Теоретики, однако, предсказывают, что высокая температура (или огромное давление) вызовут фазовый переход, в котором нуклоны развалятся на кварки и глюоны. (Глюоны — это обменные частицы, которые удерживают кварки вместе.) Результат такого фазового перехода будет аналогичен тому, что мы видели на примере плазмы, — отдельные кварки будут «рыскать» по всему ядру, вместо того чтобы двигаться только внутри кварковых

триплетных «мешков». Конечно, наши представления об этих фазах ядерного вещества весьма спекулятивны. Можно показать также, что кроме нормальной, жидкой фазы и предсказываемой плазменной фазы можно получить фазу так называемого «пионного конденсата», если достичь высоких ядерных плотностей без высоких ядерных температур. В этой фазе нуклоны в ядре выстроятся своеобразными слоями, так что в одном слое все спины (внутренние угловые моменты) нуклонов будут направлены в одну сторону, а в следующем слое — в противоположную сторону. (Употребление термина «пионный конденсат» здесь не совсем уместно; его следует использовать, когда речь идет о стабильности пионов, связанных в плотном ядерном веществе.) Есть соображения в пользу того, что в центре нейтронной звезды ядерное вещество находится в «пион-конденсатной» фазе. К сожалению, возможность ее создания на Земле затруднена, так как неясно, каким образом сильно сжать ядерное вещество без одновременного его нагревания до высоких температур.

Насколько плотным и горячим должно стать ядерное вещество, чтобы превратиться в кварк-глюонную плазму? Расчеты, которые должны дать ответ на этот вопрос, проводятся сейчас с помощью мощных ЭВМ. Окончательные результаты пока не получены, но лучшие из выполненных до сих пор оценок свидетельствуют о том, что при нормальных ядерных плотностях температура должна достигать 200 МэВ. По-видимому, такие условия лишь немного выходят за пределы возможностей существующих ускорителей тяжелых ионов. Готовятся эксперименты, цель которых показать, что кварк-глюонная плазма возникает в столкновениях ядер высоких энергий.

НОВЫЕ ускорители могут еще больше повысить шансы ученых на успех. Строительство некоторых из них только что завершено, другие строятся в разных лабораториях мира. Благодаря сверхпроводящим магнитам и надежным микроэлектронным системам управления их можно сделать более компактными и менее дорогими, чем предполагалось. Тем не менее получение пучков ядер экстремально высоких энергий, необходимых для изучения фаз ядерного вещества и их значения для космологии, остается в перспективе. Лаборатория Лоуренса в Беркли и Брукхейвенская национальная лаборатория разработали предварительные предложения о постройке ускорителей тяжелых ионов (и связанных с ними ион-накопительных колец), рассчитанных на энергии в несколько триллионов электронвольт (ТэВ). Действующие ныне ускорители позволяют получить

только поверхностное представление о науке, которая изучает столкновения релятивистских ядер. Эта наука объединяет две области — физику элементарных частиц высоких энергий и ядерную физику. За последние десятилетия эти две области знания оказались мало связанными друг с другом. Известно, что там, где смыкаются две климатические зоны, происходят не только бури и ураганы, но и существует изобилие даров природы. Соединение двух наук — физики ядра и физики элементарных частиц — для исследования ядерных столкновений несет в себе столь же богатые возможности.

Издательство МИР предлагает:

**И. Костов,
И. Минчева-Стефанова**
**СУЛЬФИДНЫЕ
МИНЕРАЛЫ.**
Кристаллохимия,
парагенезис и
систематика

Перевод с английского
Новая книга известного болгарского минералога академика И. Костова и И. Минчевой-Стефановой посвящена важному классу минералов — сульфидам и их аналогам (арсенидам, селенидам, теллуридам и т.п.). Детально рассмотрены кристаллохимические особенности сульфидов, изложены оригинальные представления об их образовании и ассоциациях и на этой основе предложена классификация сульфидов. Табличное приложение к книге содержит важнейшие химические и кристаллохимические данные 515 минеральных видов.

Для минералогов, геохимиков, кристаллохимиков, специалистов по изучению рудных месторождений, технологии минерального сырья, преподавателей, аспирантов и студентов геологических вузов.

1984 г., 19 л.

Цена 3 р. 15 к.



Кольская сверхглубокая скважина

Забой этой самой глубокой в мире скважины достиг 12 км. Опыт ее бурения с применением оригинальной технологии дал уникальные результаты в исследовании земной коры

Е. А. КОЗЛОВСКИЙ

НЕ БЕЗ оснований считается, что экономический потенциал государств все в большей степени зависит от минеральных ресурсов. В наше время ежегодно добываются миллиарды тонн полезных ископаемых. Масштабы геологоразведочных работ, естественно, также огромны. В поисках новых источников минерального сырья и энергии человечество уже вышло на шельфы морей и в Мировой океан. На континентах большая часть новых месторождений залегает на значительных глубинах от дневной поверхности. Бурением глубоких (4—6 км) и сверхглубоких (свыше 7 км) скважин, в том числе и Кольской, глубина которой уже достигла 12 км, начата научная подготовка и разработка технических средств для изучения и освоения ранее недоступных глубин Земли. Вполне понятно, что увеличение глубины освоения недр хотя бы еще на 1—2 км, не говоря уже о глубинах в 5—10 км, принципиально расширит перспективы роста минерально-сырьевого и энергетического потенциала человечества.

Считается, что мантия Земли — основной источник поступления в земную кору рудного вещества, мощных тепловых потоков. Для поисков глубоководных месторождений необходимо более точно знать механизм, контролирующий процессы рудообразования и размещения месторождений в земной коре. В связи с этим становится актуальной задача поисков месторождений на глубине 3—7 км и более. Особая роль отводится бурению глубоких и сверхглубоких скважин, которые наряду с наземными геолого-геофизическими и космическими средствами являются определяющими в изучении глубинного строения Земли. При бурении этих скважин приходится преодолевать сложные термодинамические условия, пересекать зоны сверхвысоких давлений — до нескольких тысяч атмосфер. Поэтому требуется надежная и высокоточная техника.

В Советском Союзе планирование и организация перечисленных исследова-

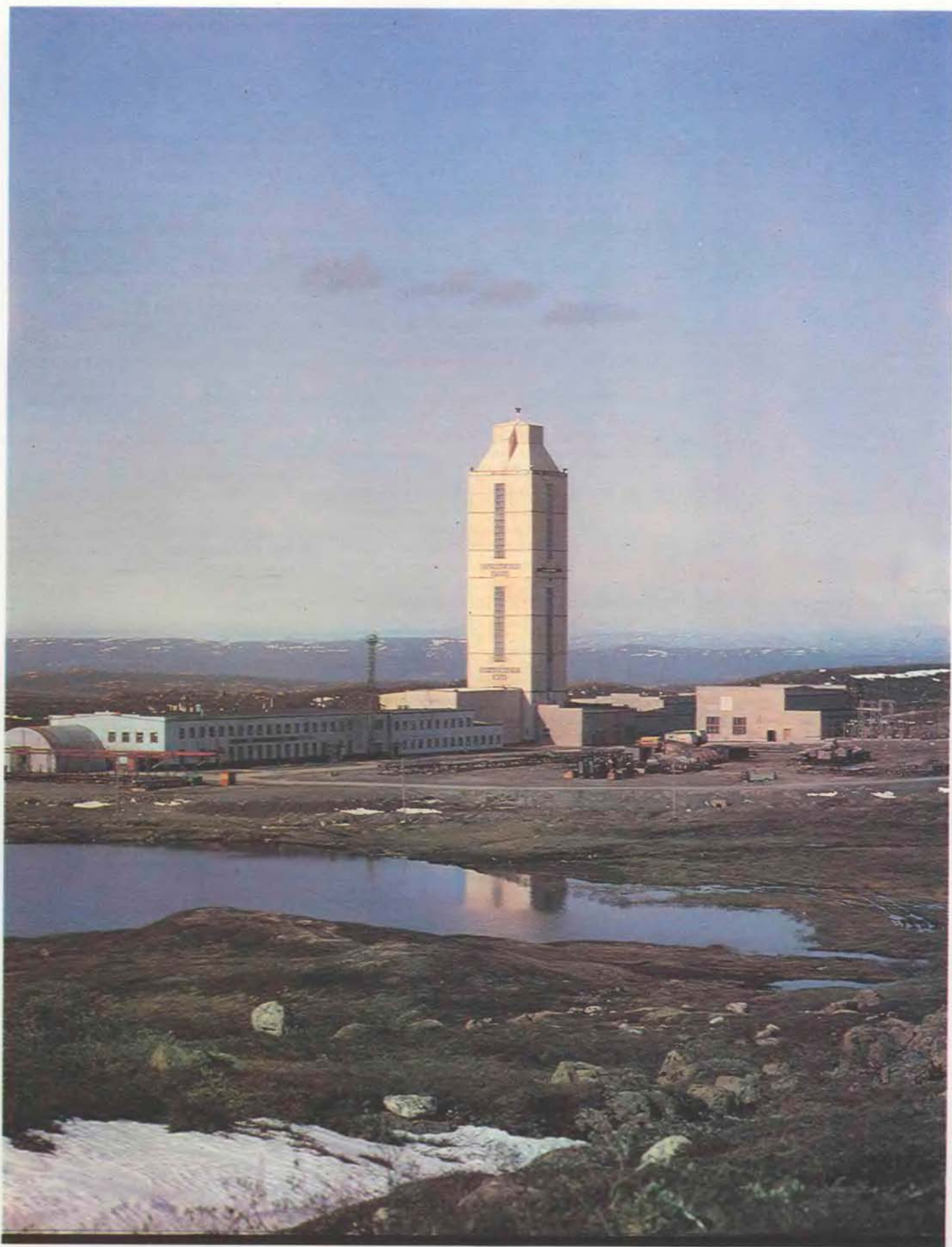
ний осуществляются под эгидой Межведомственного научного совета по проблеме «Изучение недр Земли и сверхглубокое бурение», созданного в 1962 г.

В изучении глубинного строения территории Советского Союза можно выделить три этапа. Первый этап (1962 — 1969 гг.) завершился научным обоснованием программы и созданием отечественных технических средств для бурения и геолого-геофизических исследований в скважинах глубиной до 10—15 км. Второй этап (1970 — 1980 гг.) озаглавлен бурением Кольской и Саатлинской сверхглубоких скважин в комплексе с глубинными геофизическими исследованиями отдельных регионов СССР. Третий этап начат в 1981 г. Это переход к планомерному комплексному изучению земной коры и верхней мантии Земли на всей территории СССР.

В общем плане предусматривается решение трех крупных взаимосвязанных проблем. Во-первых, изучение закономерностей строения и развития континентальной земной коры: осадочного чехла наиболее глубоких впадин на платформах; осадочных разрезов геосинклиналей; состава и строения нижней части «гранитного» слоя, «базальтового» слоя и верхних слоев верхней мантии Земли; природы границ Конрада и Мохоровичича; процессов дифференциации вещества очагов интрузий, флюидов, растворов и газов в земной коре; геотермических режимов земной коры. Во-вторых, разработка научных основ и методов прогнозирования, поисков и разведки глубоко- и сверхглубоководных месторождений полезных ископаемых, в том числе месторождений нефти и газа. В-третьих, создание эффективных и экономичных технических средств для проникновения в недра Земли на глубину 10—15 км. Это чрезвычайно сложные и в то же время одни из важнейших научных фундаментальных и прикладных проблем. Они непосредственно относятся и к Кольской сверхглубокой скважине.

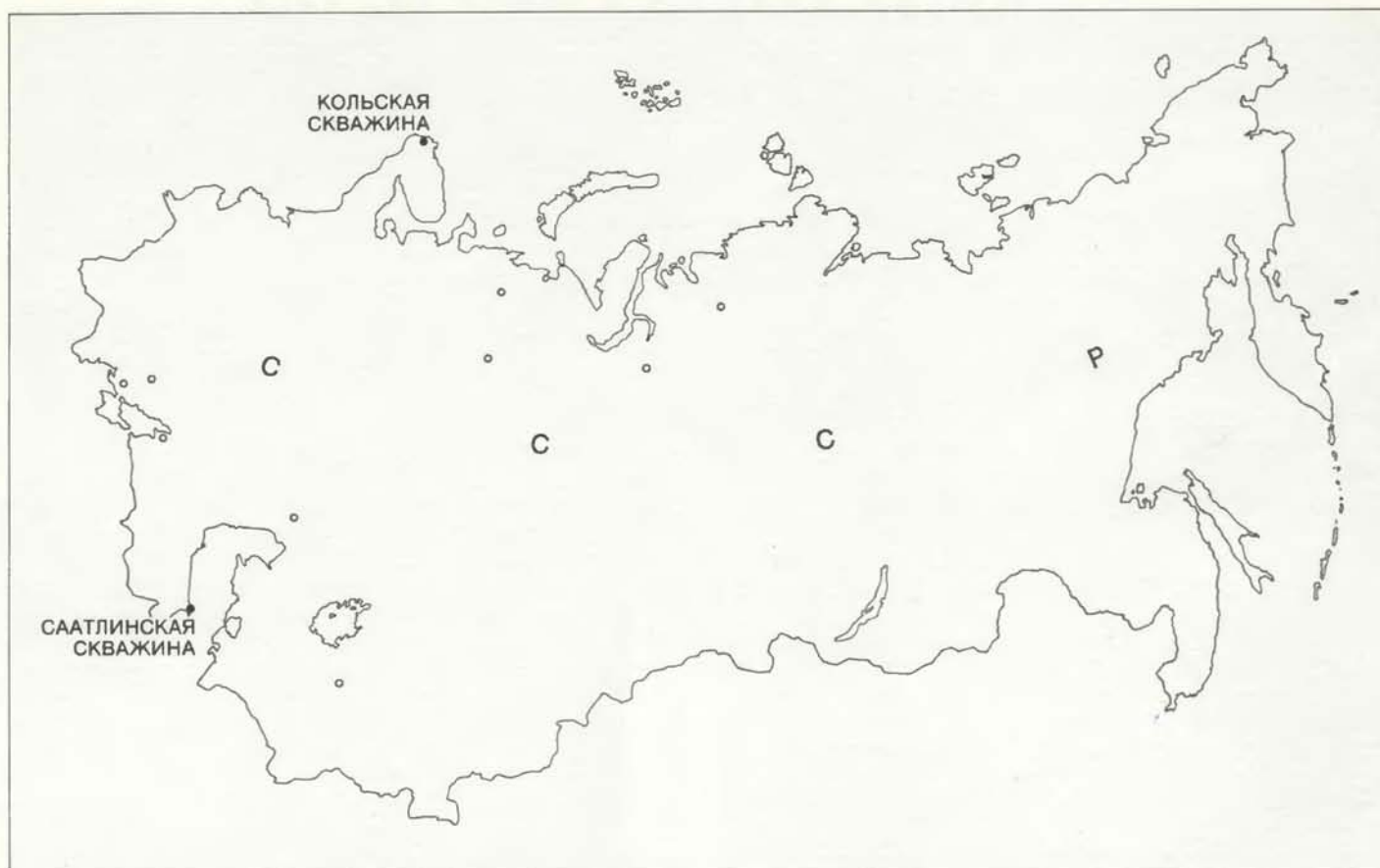
КОЛЬСКИЙ полуостров расположен в Печенгском медно-никелевом рудном районе Мурманской области. Он занимает северо-восточную часть Балтийского щита, в строении которого участвуют древнейшие кристаллические породы. Аналогичные породы широко развиты и в других регионах земного шара — в Индии, Северной Америке, Южной Африке, Западной Австралии, Антарктиде и Гренландии. Печенгский район является опорным для познания геологии и рудообразования Балтийского щита и в определенной мере древней континентальной земной коры и докембрия всего мира. В этом районе Балтийский щит на протяжении сотен миллионов лет подвергался эрозии. По оценкам, разрушено, вынесено водой и ледниками в другие районы примерно 5—15 км верхней части гранитного слоя. Поэтому геологический разрез Кольской скважины с некоторыми допущениями соответствует глубинам примерно 15—25 км усредненного разреза континентов. Образуя говоря, глубина наблюдений по скважине не 10, а все 15—25 км. Таким образом, место бурения крайне привлекательно с научной точки зрения, однако его выбор обусловил и технические трудности, связанные прежде всего с труднопроходимостью пород Кольского полуострова. Заметим, что Кольская сверхглубокая — пока единственная скважина, в которой уже сейчас почти половина вскрытого разреза представлена не осадочными, а кристаллическими породами.

В КОНСТРУКЦИИ Кольской скважины был реализован оригинальный в научном и инженерном отношении проект. Бурение на всем интервале осуществлялось отечественным оборудованием и инструментом. Мировая практика бурения сверхглубоких скважин основывается на роторном способе бурения с использованием стальных труб. Однако при такой технологии, начиная с глубин порядка 9—10 км, возникают существенные трудности. Они связаны с большими напряжения-



ВИД БУРОВОЙ ВЫШКИ в арктическом исполнении с корпусом производственно-технических служб и привышечным зданием, соединенные закрытой галереей. Вышка обшита гофрированным листовым железом, что обеспечивает в условиях Заполярья постоянно плюсовую температуру внутри нее. В производственно-техническом корпусе размещены

инженерно-техническая служба и оборудование для текущего, среднего и частично капитального ремонта буровой установки и инструмента. В привышечном корпусе находится буровое оборудование, включая системы циркуляции бурового раствора, установки для приготовления и очистки раствора, энергетическое и другое оборудование.



СЕТЬ взаимосвязанных геофизических профилей на территории СССР является принципиальной основой глубинных исследований, предусмотренных Национальной программой глубинного изучения недр страны. Работы в соответствии с этой программой осуществляются с 1981 г. Программа включает комплекс геологических, геофизических, геохимических, космогеологических, аэрогеофизических и других методов, бурение глубоких и сверхглубоких скважин. Цель программы — изучение эволюции и строения глубинных слоев земной коры, совершенствование теории лито- и тектогенеза, магмообразования и метаморфизма, выяснение их связи с процессами миграции и локализации углево-

дородов и рудообразующих веществ. На этой основе будут созданы объемные модели разных типов земной коры, улучшены методы прогнозирования, поисков и разведки месторождений полезных ископаемых, усовершенствованы технические средства для изучения недр Земли, определены главные направления геологоразведочных работ в СССР. На карте показана сеть опорных глубоких и сверхглубоких скважин на территории страны. Кружками обозначены глубокие и сверхглубокие опорные скважины; Кольская и Саатлинская скважины отмечены сплошными черными кружками.

ми в верхней части бурильной колонны, которые складываются из напряжений от веса бурильных труб и от сил сопротивления вращению всей колонны. Кольская же скважина бурится забойным двигателем, получающим энергию от потока бурового раствора, без вращения колонны (или с ее вращением с минимальной скоростью 2—4 об/мин). Вместо стальных бурильных труб используются трубы из легких сплавов. Выигрыш очевиден — в бурильной колонне исчезают напряжения, связанные в роторном бурении с ее вращением. Существенно уменьшаются напряжения в верхней части колонны, порожденные весом собственно бурильных труб, поскольку применяемые сплавы значительно легче стальных. Технология бурения Кольской скважины по фактору допустимых напряжений в бурильной колонне отодвигает предел проходки скважин до глубины 15 — 17 км. Однако в этом случае возникают новые проблемы. Алюминие-

вые сплавы начинают разупрочняться при температуре свыше 110 — 150°C, а в сверхглубоких скважинах она, как правило, превышает 200 — 250°C. Отечественной промышленностью были созданы сплавы на основе алюминия и бурильные трубы из них, способные работать при температуре 230—250°C. И это не предел. Успехи в порошковой металлургии открывают перспективы повышения термостойкости алюминиевых материалов, выдерживающих температуру 270 — 300°C. В дальнейшем решение проблемы может быть достигнуто путем создания бурильных труб из титанового сплава для температур около 400°C. Новая технология, основанная на использовании бурильного инструмента и забойных двигателей, изготовленных из легких сплавов, имеет еще ряд преимуществ. Прежде всего это снижение требований к грузоподъемным механизмам буровой установки. Если традиционная технология бурения сверхглубоких скважин вы-

нуждает решать сложную проблему создания установок с грузоподъемностью до 800 — 900 т, то при новом способе достаточной оказывается грузоподъемность 400 — 500 т. Для замены каждого отработанного долота и подъема на поверхность образцов породы (керн) при проходке сверхглубокой скважины бурильная колонна извлекается на поверхность, а затем в обратном порядке спускается к забою. При выполнении многих сотен таких операций в скважинах, имеющих, как правило, отклонение от вертикали, происходит интенсивное изнашивание обсадных труб, стенок открытого ствола и самих бурильных труб. В конечном итоге износ становится причиной серьезных осложнений и аварий. Расчеты и опыт показали, что скорость износа находится в прямой зависимости от прижимающих усилий, а эти усилия в свою очередь — от веса бурильной колонны. Применение на Кольской скважине труб, изготовлен-

ных из легких сплавов, резко снижает скорость износа. Аналогично использование забойного двигателя, при котором колонна бурильных труб не вращается, приводит к уменьшению трения, а значит, и степени износа в скважине.

Сверхглубокие скважины как инженерный объект проектирования находятся в крайне невыгодном положении в связи со сложностью прогнозирования ожидаемых условий проходки. Недр Земли очень изменчивы. Даже соседние скважины могут резко отличаться по условиям бурения, поэтому предусмотреть все трудности на будущем подземном пути скважины практически невозможно. При бурении Кольской сверхглубокой потребовалась разработка технологии, которая обеспечивала бы свободу маневра и оперативный выбор оптимальных решений в ходе бурения. Была предложена новая технологическая схема — бурение опережающим стволом. В процессе бурения конструкция скважины корректировалась по фактическому изменению характеристик геологического разреза в околоствольном пространстве. Это позволило бурить Кольскую скважину открытым стволом практически по всему интервалу, т.е. без закрепления стенок скважины стальными трубами. Металлоемкость ствола уменьшилась в несколько раз.

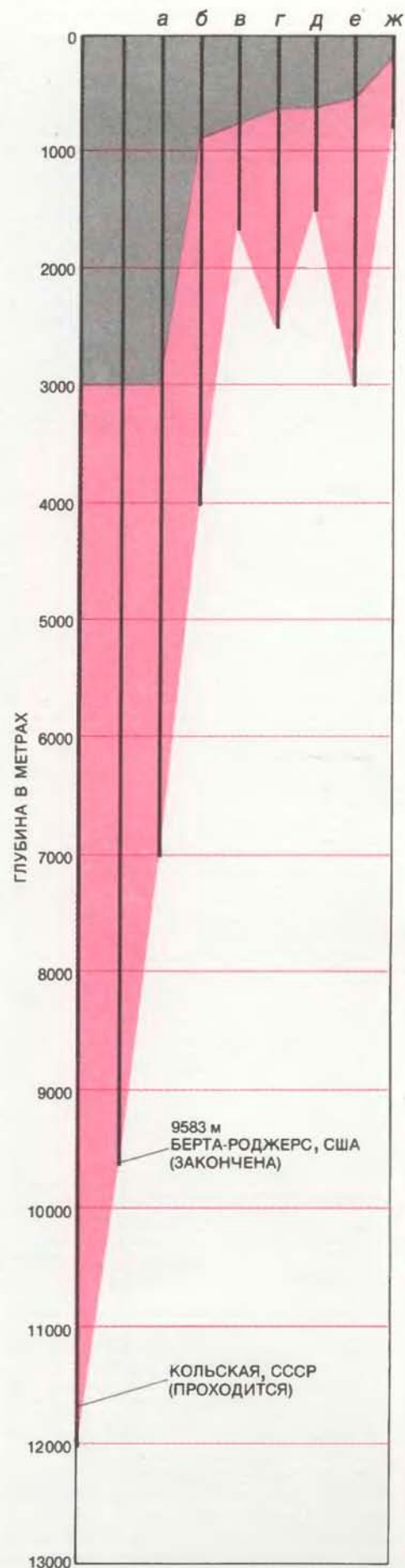
Забойный двигатель, сердцем которого является гидравлическая турбина, занял центральное место в комплексе технических средств. Сверхглубина предъявила к турбобуру более жесткие, чем обычно, требования: низкая частота вращения (80 — 150 об/мин), термостойкость, повышенный вращающий момент. Чрезмерно высокая скорость вращения приводит к быстрому выходу из строя породоразрушающего инструмента и соответственно к снижению скорости проходки скважины. Для решения этой проблемы разработана редукторная приставка к турбобуру, которая снижает частоту его вращения в 3 — 4 раза. Для контроля за работой забойного двигателя и долота была создана гидравлическая линия связи, основанная на передаче в буровом растворе импульса давления. Информация кодируется частотой импульсов, которая пропорциональна изменению контролируемого параметра, и передается со скоростью около 1500 м/с. Созданные забойные датчики и чувствительная наземная аппаратура, снабженная оригинальными фильтрами шумов, обеспечили надежный контроль работы турбобура и долота на глубине 12 км.

труднее было доставлять образцы вещества на поверхность. Теоретически куски породы в виде цилиндрических столбиков диаметром 60 — 80 мм (керны) выбуриваются буровой головкой. При этом периферийная кольцевая часть забоя разрушается. В идеальном случае керн должен продвинуться в буровой снаряд и попасть в колонковую трубу. В ней он будет находиться в процессе бурения, пока его не поднимут наверх. Однако на большой глубине керн, выбуренный из массива и освобожденный от горного давления, как бы «взрывается». Его разрушают мощные внутренние силы, порожденные сжатием вышележащей многокилометровой толщи пород. Керн разрушается, его отдельные кусочки забивают проход в колонковую трубу и истираются в процессе бурения. Обычно сохраняется не более 5 — 10% выбуренного керна. Для борьбы с этим был создан принципиально новый колонковый снаряд с системой гидротранспорта керна. Если при обычной технологии промывочная жидкость, омыв забой, по затрубному пространству возвращается наверх, то в Кольской скважине она частично направляется обратно в колонковую трубу. Жидкость подхватывает кусочки горной породы и «укладывает» их в специальную камеру, оставляя вход свободным для новых порций керна.

Таковы вкратце технологические особенности бурения Кольской сверх-

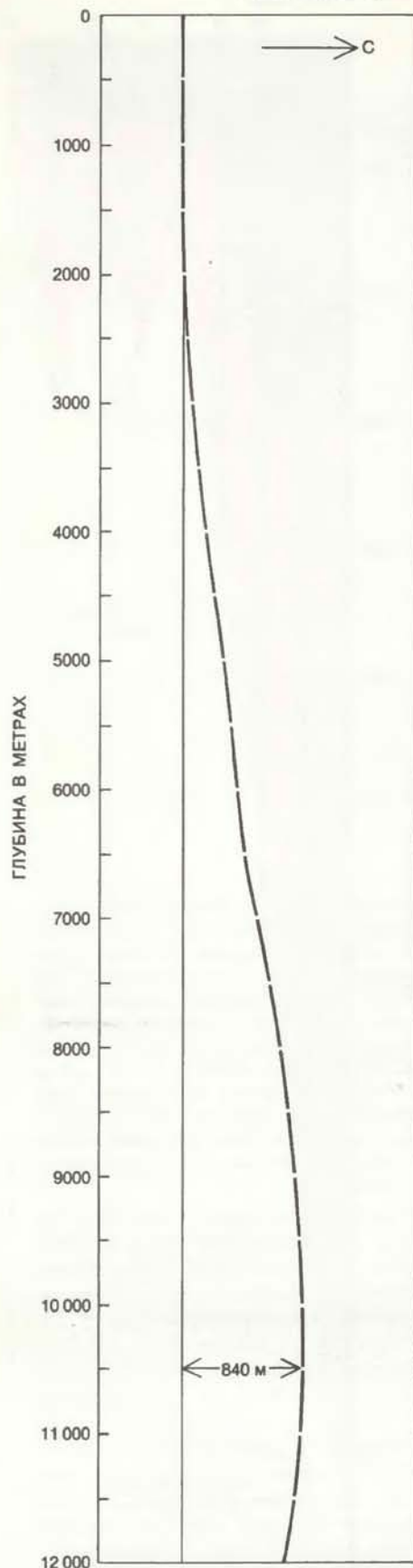
ГЛУБИНЫ РАЗВЕДОЧНЫХ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СКВАЖИН, М

ВИД ПОЛЕЗНОГО ИСКОПАЕМОГО	СРЕД.	МАКС.
а НЕФТЬ И ГАЗ (СУША И МОРЕ)	2500–3000	5000–7000
б ТЕРМАЛЬНЫЕ ВОДЫ	700–800	2000–4000
в КАМЕННЫЙ УГОЛЬ	600–1100	1500–1800
г ЖЕЛЕЗНЫЕ РУДЫ	300–800	1000–2500
д ЦВЕТНЫЕ МЕТАЛЛЫ	600–700	1000–1500
е БЛАГОРОДНЫЕ МЕТАЛЛЫ, АЛМАЗЫ	300–500	2000–3000
ж ПРЕСНЫЕ ВОДЫ	100–150	700–800



СВЕРХГЛУБОКИМ БУРЕНИЕМ доказана принципиальная возможность образования месторождений полезных ископаемых на глубинах 7 км и более. В настоящее время недра Земли освоены в основном до глубины 3 км (см. таблицу). Ресурсные возможности недр Земли на глубинах 3 — 15 км представляются весьма значительными. На рисунке указаны рекордные, максимальные и средние глубины проникновения в недра Земли бурением.

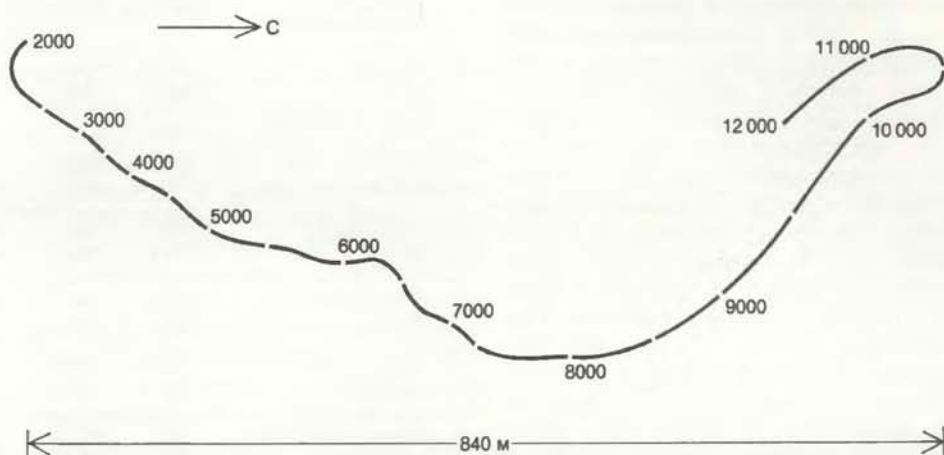
КАЖДЫЙ кусочек горной породы, извлеченный из недр, представляет большую ценность. Чем дальше уходила в глубину Кольская скважина, тем



глубокой. В дальнейшем намечается усовершенствовать технический процесс и технические средства бурения под новые, более жесткие условия: высокая, до 300 — 350°C, температура, давление до 3 тыс. атм, агрессивность окружающей среды, потеря устойчивости массива горных пород в приствольном пространстве и искривление скважины. Нужно свести к минимуму изменения характеристик горных пород, вызываемые бурением и подъемом на поверхность, и для этой цели разработать средства для отбора и доставки образцов с больших глубин в герметизированных контейнерах, обеспечивающих сохранение естественных забойных условий, в том числе газодонасыщенности. Кроме того, необходимо создать стационарный каротажный подъемник для спуско-подъемных операций в скважинах глубиной до 15 км, грузонесущий геофизический трехжильный кабель длиной 12,5 — 15,5 км. Условия бурения скважин глубиной 15—20 км в условиях температуры 300—400°C и давлении 2 — 3 тыс. атм будут имитироваться на разрабатываемом в настоящее время стенде, снабженном контрольно-измерительной аппаратурой. Предстоит усилить работы по совершенствованию методов интерпретации геофизических данных с использованием ЭВМ применительно к новым представлениям о волновых сейсмических полях, исследованию природы физических (геодинамических) границ в коре и верхней мантии Земли, по выяснению их взаимоотношения с геологическими (структурно-вещественными) границами и контактами, изучению природы аномалий фи-

зических полей, не выраженных в структурных образованиях, но влияющих на скорость и проводимость упругих волн. Особое значение приобретают вопросы повышения разрешающей способности и точности методов, а также объема извлекаемой из сейсмограмм информации.

ПЕРЕЙДЕМ теперь к рассмотрению научных результатов бурения. Заметим для начала, что непосредственному геологическому наблюдению доступен разрез земной коры в интервале около 20 км: высочайшая в мире вершина Эверест имеет высоту 8848 м, а глубины океанических впадин достигают 11 км. Таким образом, по сумме наблюдений в разных точках земной поверхности и по косвенным данным более или менее надежны суждения об оболочке земного шара толщиной 10 — 15 км при его радиусе более 6000 км. В связи с этим гипотезы о строении и составе нашей планеты базируются в основном на геофизических и астрономических измерениях. По ним выделяют земную кору — верхнюю оболочку Земли средней мощностью около 35 км. Предполагают, что мощность коры уменьшается до 5 — 10 км на дне океанов и возрастает до 70 — 75 км под горными хребтами. Ниже, по скачкообразному росту скоростей распространения сейсмических волн (до 7,8 — 13,6 км/с) выделяют мантию Земли плотностью 3,3 — 5,9 г/см³. Различают верхнюю (35 — 300 км), среднюю (300 — 950 км) и нижнюю (950 — 2900 км) мантии. О ее составе можно судить по продуктам вулканической деятельности, метеоритам, геофизическим и



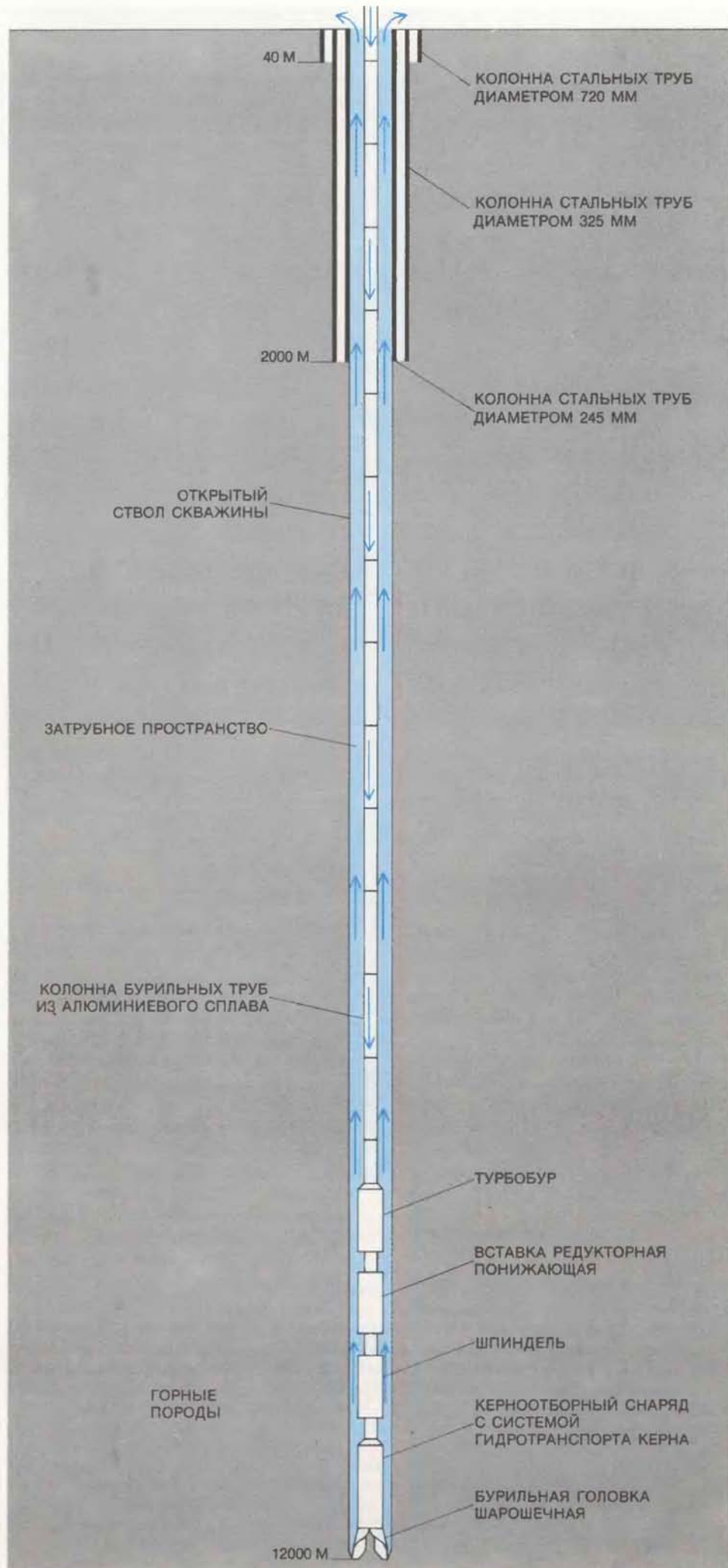
ЧРЕЗМЕРНЫЕ ИСКРИВЛЕНИЯ ствола скважин приводят к серьезным технологическим осложнениям и авариям в результате резкого увеличения сил трения. Особенно опасны искривления в верхней части скважины. В общей сложности через устье скважины глубиной более 11 км за счет спуско-подъемных операций проходит более 25 млн. м бурильных труб. Измерения параметров пространственной траектории ствола Кольской скважины (углы наклона к вертикали и азимут по странам света) проводились через каждый метр проходки отечественной аппаратурой, работающей по принципу отвеса и гироскопа. Максимальный угол

наклона на глубине 10—10,5 км составляет 17° (средний угол — около 5°) при максимальном отклонении скважины от вертикали 840 м, т.е. в среднем около 8 м на 100 м проходки. Борьба с искривлением ствола скважины велась с помощью специальных технических средств. Применялись жесткие забойные компоновки с центраторами-калибраторами, компоновки с повышенным маятниковым эффектом, турбинные отклонители, контролируемые телеметрической забойной системой, и другие устройства. На схеме показаны отклонения ствола Кольской скважины от вертикали в разрезе и в плане

астрономическим данным. Полагают, что до глубины 1100 км в составе мантии Земли преобладают силикаты магния и железа (в земной коре наиболее распространены кислород, кремний и алюминий), а ниже — сульфиды и окислы железа, меди, цинка, свинца, ртути, сурьмы, висмута, а также селен, теллур, мышьяк, золото, серебро и другие металлы. Температура в верхней мантии оценивается 1000 — 1500°C, давление 100 тыс. атм. Земная кора также неоднородна. В 1926 г. Х. Джеффрис ввел в геофизику представление о трехслойном строении континентальной земной коры (осадочный, гранитный и базальтовый слои). Оно было основано на сопоставлении скоростей упругих волн в естественных условиях и на лабораторных образцах. Соответствующие значения скорости и плотности равны: для осадочных пород менее 5 км/с и 1,8 — 2,5 г/см³, для гранитных 5 — 6 км/с и 2,5 — 2,75 г/см³, для базальтовых 6 — 7 км/с и 2,75 — 3,0 г/см³. С гранитным слоем стали отождествлять широко развитые на поверхности континентов архейские гранитогнейсовые комплексы. Базальтовый слой не имеет выхода на дневную поверхность ни на одном из континентов земного шара, поэтому его состав до сих пор остается предметом оживленных дискуссий. Принято считать, что океаническая кора представлена базальтовым слоем, перекрытым маломощными осадками, т.е. в отличие от трехслойной континентальной коры океаническая кора двухслойная.

ОДНОЙ из задач Кольской скважины было пересечение гранитного и продолжение бурения в базальтовом слое. На основании профильных сейсмических исследований северо-западной ча-

ПРОХОДКА Кольской скважины до глубины 40 м осуществлялась долотом диаметром 920 мм с последующей обсадкой трубами диаметром 720 мм. Внутри этой колонны была опущена колонна труб диаметром 245 мм. Ее не закрепляли и не цементировали. Далее бурили долотом диаметром 214 мм. Когда забой достиг глубины 5,3 км, начались частые вывалы породы из стенок скважины у отметки около 1,8 км. Для ликвидации этого осложнения подняли незакрепленную колонну труб диаметром 245 мм, разбурили ствол скважины с 40 м до глубины 2 км долотом диаметром 394 мм. После этого опустили в скважину колонну съемных труб диаметром 245 мм. На рисунке затрубное пространство, по которому движется буровая жидкость, обозначено голубым цветом. Синие стрелки — направление потока буровой жидкости, нагнетаемой к турбобуру под давлением около 250 атм. Общая длина бурового снаряда (турбобур, вставки, шпindel, керноотборный снаряд) составляет 22—38 м.



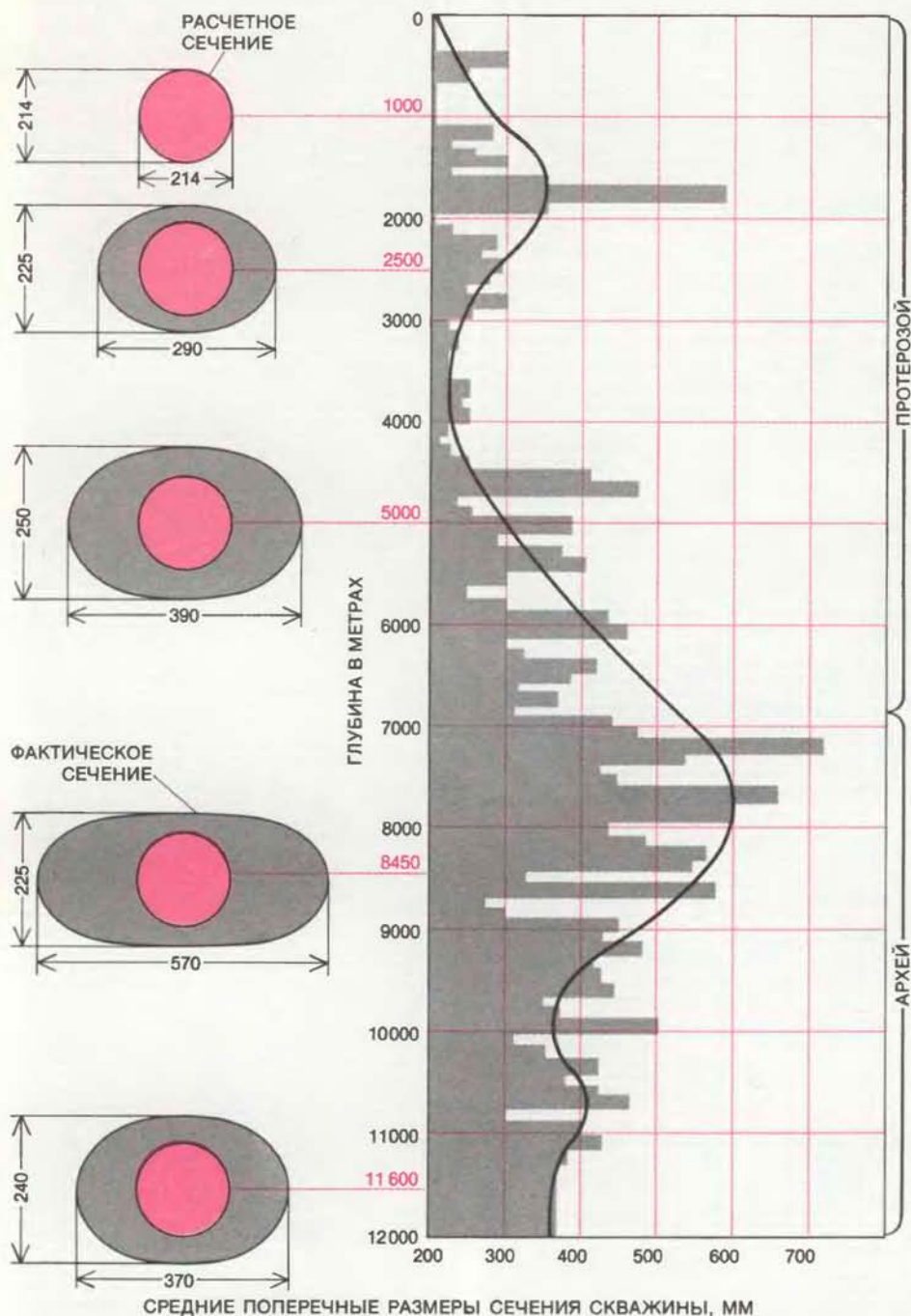
сти Балтийского щита до заложения Кольской скважины ожидалось, что протерозойские осадочно-вулканогенные образования на глубине 4,7 км уступят место породам гранитного слоя (гранитогайсы основания), а на глубине 7 км бур пересечет сейсмиче-

скую поверхность Конрада и войдет в базальтовый слой, прослеживающийся до сейсмической поверхности Мохоровичича (35 — 40 км). По обобщенной схеме древние щиты в верхней части разреза обычно представлены протерозойскими и архейскими суперкри-

сталлическими породами и ниже — гранитогайсами. С последними связаны месторождения хрома, железа и магнетитовых слюд. Для поясов развития архейских и протерозойских суперкристаллических пород характерен более широкий набор месторождений: сульфидные медно-никелевые руды, колчеданные залежи (содержащие медь, цинк, серебро), а также железистые кварциты, редкометалльные месторождения золота. Однако до бурения Кольской скважины прямыми наблюдениями о составе и рудоносности глубинных зон земной коры наука не располагала.

При бурении Кольской скважины не было встречено ожидаемого по геофизическим данным базальтового слоя. Подошва осадочно-вулканогенного комплекса оказалась на глубине 6,8 км. Далее скважина достигла и пока еще не вышла из гранитного слоя, представленного породами гнейсо-мigmatитового комплекса. Их абсолютный возраст оценивается в 2,5 — 2,7 млрд. лет. На основании данных комплексного изучения метаморфических пород из разреза Кольской скважины и их сравнения с аналогичными образованиями, имеющими выходы на дневную поверхность, историю геологического развития континентальной коры Балтийского щита в архейское (более 2,6 млрд. лет) и протерозойское (2,6 — 1,1 млрд. лет) время можно представить в следующей последовательности.

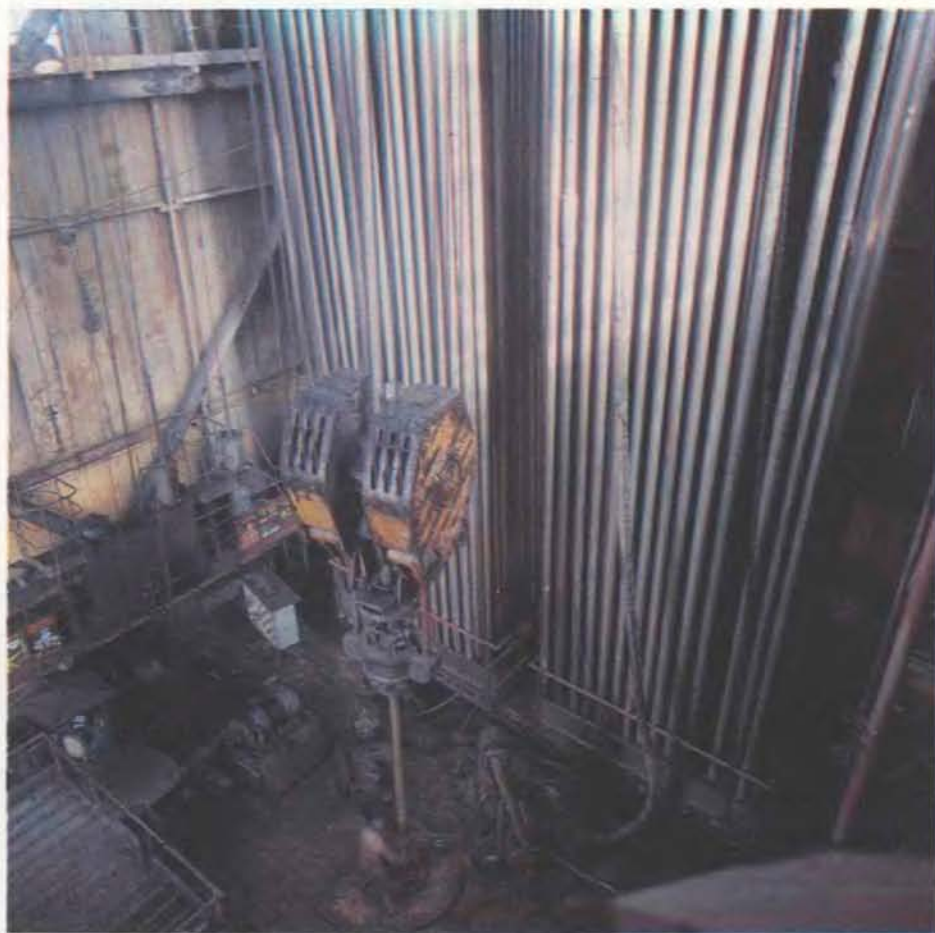
Первый этап формирования архейского комплекса, вскрытого Кольской скважиной на глубине 6842 — 12 000 м, характеризовался накоплением мощных осадочных толщ, в том числе железистых кварцитов (обнаружены на глубине 7635 м), и активной вулканической деятельностью, сопровождаемой излияниями лав. С глубинными излияниями генетически связано железотитановое оруденение, представленное магнетитом и ильменитом. Максимальные концентрации этих рудных минералов (40 — 50%) встречены скважиной в амфиболитах на глубине 8711 м. В последующий этап породы архейского комплекса испытали складчатость, метаморфизм и ультраметаморфизм в условиях гранулитовой фации (температура 750 — 900°C, давление 5 — 11 тыс. атм). Радиологический возраст кульминации гранулитового метаморфизма оценивается в 2,7 — 2,8 млрд. лет. Архейский цикл завершился консолидацией гранитогайсового комплекса с последующим глубоким разрывом и образованием коры выветривания, накапливающейся в изолированных впадинах. В ряде районов мира с подобным типом отложений связаны гигантские залежи металлоносных конгломератов типа южноафриканских.



ПРИ БУРЕНИИ Кольской скважины установлено закономерное саморасширение ее ствола с глубиной. Аномальный рост сечения ствола (до 700 × 230 мм) наблюдался на глубине около 1,8 км и в интервале 7—8,5 км (до 740 × 250 мм), более чем в 3—3,5 раза по сравнению с диаметром бурения. Скважина проходилась долотом диаметром 214 мм. Радиальные размеры сечений измерялись по всей скважине профиломерами в двух перпендикулярных плоскостях по оси ствола и многоточечными радиусомерами в 8 плоскостях. Измерения показали, что увеличение сечения скважины происходит сразу после вскрытия массива горных пород долотом. После этого размеры и форма сечения практически оставались неизменными. Это можно объяснить особенностями хрупкого разрушения кристаллических пород (по аналогии с горными ударами в глубоких шахтах), с которых снята нагрузка в околоствольном пространстве скважины. Эллипсоидальность сечений скважины обусловлена анизотропией свойств горных пород и тектонического давления.

Протерозойский комплекс, полностью вскрытый Кольской скважиной от поверхности до подошвы (0 — 6842 м), характеризует четыре этапа формирования внутриконтинентального подвижного Печенгско-Варзугского пояса на архейском фундаменте. Первый — заложение пояса, второй — андезитобазальтовый вулканизм, третий — пикритбазальтовый вулканизм и четвертый этап — метаморфизм и образование складчато-разрывных дислокаций. Протерозойские осадочно-вулканогенные толщи отлагались на жестком стабилизированном основании, наследуя генеральное простираие архейских структур. Резкие изменения мощностей конгломератов вплоть до их выклинивания свидетельствуют о формировании их водными потоками в древних речных долинах. Переход от первого этапа ко второму был ознаменован резкой вспышкой субплатформенного вулканизма, который начался излиянием однородной андезитобазальтовой магмы. Вулканическая деятельность второго этапа сопровождалась внедрением безрудных интрузий габбро-диабазов и завершилась низкотемпературными аутометасоматическими изменениями всех ранее образованных пород. Вулканизм третьего этапа начался излияниями толеитовых базальтов с видимой мощностью 1,9 км. Дальнейшая эволюция мантийных очагов при их последовательном опускании до глубины 90 — 150 км привели к генерации ультраосновной магмы, сформировавшей пикрит-толеитовые покровы и сопровождающие их интрузивные комплексы, в том числе рудносные дифференцированные интрузии, с которыми связаны наиболее крупные сульфидные медно-никелевые месторождения Печенгского рудного поля, выходящие на дневную поверхность. Кольской сверхглубокой скважиной вскрыты новые интервалы локализации медно-никелевых руд на глубине 1,5 — 1,8 км. Это рассеянно- и густовкрапленные сульфидные медно-никелевые руды, которые по структурным признакам, минеральному составу и генезису аналогичны рудам, выходящим на поверхность.

ДО ПРОХОДКИ Кольской сверхглубокой теория рудообразования была построена на данных, полученных в основном при изучении конечных продуктов рудогенеза — месторождений. Таким образом, решалась обратная задача реконструкции возможного хода истории формирования скоплений полезных ископаемых. Разумеется, для этих целей использовались и результаты исследований в районах современного вулканизма, и принципы физической химии. Однако все это не могло заменить прямых наблюдений процессов, протекающих в земных недрах. В



БУРОВАЯ УСТАНОВКА «Уралмаш-15 000» предназначена для бурения скважин в твердых кристаллических породах на глубину до 15 км. Высота буровой вышки 86 м, грузоподъемность 400 т. Спуско-подъемные операции механизированы и автоматизированы. Привод двигателей от источников постоянного тока. Это позволяет осуществлять плавное регулирование всех технологических процессов, включая скорость подъема инструмента, частоту вращения ротора, подачу раствора и т.д.

Кольской сверхглубокой на всем протяжении разреза обнаружены газы и притоки сильноминерализованного вод, которые циркулируют по мощным зонам тектонических нарушений. Трещинные воды содержат бром, йод и в повышенных количествах тяжелые металлы. Газы представлены гелием, водородом, азотом, а также метаном и другими углеводородами. Данные свидетельствуют об активных газодонных процессах в кристаллических породах континентальных плит на больших глубинах, что значительно расширяет перспективы выявления новых рудных горизонтов. Особый интерес представляют обнаруженные на глубинах 4,5 — 11 км крупные зоны раздробленных пород с низкотемпературной гидротермальной минерализацией. Обломки пород цементируются кварцем, кальцитом, сульфидами меди, железа, свинца, цинка, никеля, кобальта. Относительно низкие температуры образования этих сульфидов и близкий к метеоритному изотопный состав серы могут свидетельствовать об их мантийном происхождении. На глубинах более 9,5 км встречены проявления магне-

титовой, флогопитовой, мусковитовой и сульфидной минерализации. Полученные данные свидетельствуют о значительном вертикальном диапазоне благоприятных условий для формирования гидротермальных рудных месторождений. Таким образом, «кольский эксперимент» дал замечательный результат, показав, что глубины континентов благоприятны для рудоотложения. Вопрос теперь в том, чтобы разработать эффективные методы обнаружения и изучения руды на глубинах 5 — 10 км.

КОЛЬСКОЙ скважиной впервые в мировой практике пересечена граница резкого изменения скоростей распространения сейсмических волн, которую принято отождествлять с поверхностью раздела гранитного и базальтового слоев. На самом деле изменение скорости связано с разуплотнением горных пород в процессе прогрессивного метаморфизма при высвобождении воды из кристаллических решеток силикатов: из-за наличия вышележащих мощных водоупоров свободная вода не может быть удалена из толщи.



ДЕФЕКТОСКОПИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА «БУР-1М» используется для определения толщины стенок труб, обнаружения в них трещин и прочих дефектов, возникающих в процессе бурения в сложных условиях суперглубин из-за больших механических нагрузок. Прибор в автоматическом режиме помечает краской места на буровых трубах с отклонениями по качеству нормы, фиксирует величины отклонений на записывающей ленте, подает звуковой сигнал при обнаружении этих аномалий. Дефектоскопия позволяет поддерживать на необходимом уровне надежность буровой колонны, что предупреждает возникновение аварийных ситуаций в скважине.

Как было показано выше, этап андезитобазальтового вулканизма завершился низкотемпературными автоматическими изменениями протерозойских пород без существенного влияния на минеральный состав архейского фундамента. Принципиально иной характер изменений физического состояния пород связан с этапом пикритобазальтового вулканизма. Мощные (около 2 км) лавовые покровы этого этапа, перекрыв погруженные в архейский фундамент образования протерозоя, привели к изоляции последних (т.е. созданию закрытой системы) и резко повышению в них температуры. Это обусловило в свою очередь прогрессивный метаморфизм пород протерозойского комплекса и регрессивный архейского комплекса в условиях эпидот-амфиболитовой фации.

Согласно традиционным представлениям, прогрессивный метаморфизм в условиях «открытой» системы, т.е. при постоянном давлении, должен приводить к замещению богатых водой минералов маловодными с удалением из пород свободной воды. Для образующихся таким образом метаморфических комплексов, как известно, харак-

терно одновременное удаление связанной (H_2O^+) и свободной (H_2O^-) воды, уменьшение пористости и проницаемости, что в свою очередь вызывает закономерное увеличение скорости распространения упругих волн (V_p). Отсюда следует, что в средне- и высокометаморфических комплексах решающее влияние на величину V_p оказывает плотность пород, тесно связанная с их химическим составом. Экстраполяция этой связи на глубину и являлась до сих пор одним из ведущих критериев при интерпретации результатов глубинного зондирования, т.е. для объяснения изменений скорости V_p со сменой химического состава пород и, как следствие, для выделения гранитного ($V_p = 5,5 - 5,8$ км/с) и базальтового ($V_p = 6,0 - 7,0$ км/с) слоев. Возможно, эти соображения справедливы при метаморфизме пород открытой системы. Кольская скважина обнаружила «результаты» метаморфизма в «закрытой» системе, из которой водные флюиды не могли быть удалены. Поэтому поведение воды в верхней части протерозойского комплекса резко отличается от нижней его части и подстилающего архейского комплекса.

Д О ГЛУБИНЫ 4,5 км содержание химически связанной воды довольно постоянно и устойчиво держится в пределах 4% по массе горных пород. Ниже оно резко падает и в интервале 4,5 — 6,8 км составляет в среднем 2,1% при колебаниях от 1 до 3%. С глубины 4,5 км и далее открытая пористость, включая микротрещиноватость, достигает в отдельных интервалах 3% против 0,6 — 1,0% в верхней зоне. Одновременно трещиноватость увеличивается до 0,25 — 0,3 м/м и даже до 0,5 — 0,7 м/м против 0,01 — 0,04 м/м в интервале 0,8 — 4,5 км. Параллельно с этим также резко уменьшается (на $0,2$ г/см³) плотность, падает скорость продольных волн и увеличивается анизотропия. Колебания всех этих показателей происходят синхронно:

ИНТЕРВАЛ ГЛУБИН, М	800— 4500	4500— 6835
СРЕДНЕЕ СОДЕРЖАНИЕ H_2O^- В ПОРОДЕ, %	4,0	2,1
ПЛОТНОСТЬ, Г/СМ ³	3,1	2,9
ФАКТОР АНИЗОТРОПИИ	0,97	0,90

Расчеты показывают, что общий объем породы вместе с водой ниже отметки 4,5 км по разрезу должен был увеличиться на 1,7%, а общая пористость на момент образования должна была достигать 6 — 7%, т.е. на порядок больше, чем в верхней зоне. Для сохранения прежнего объема породы вода должна быть сжата под давлением, соответствующим мантийным глубинам. Поскольку прочность пород на порядки меньше, дегидратация обязательно должна сопровождаться микрогидроэрозиями. Нижняя граница зоны разуплотнения отмечается на глубине около 9 км по увеличению скорости упругих волн и плотности и прекращению инъекций подземных вод в ствол скважины. Исключение составляют редкие, но очень интенсивные водопоявления на глубине 9920 и 10 020 м. В этой области фиксируется увеличение на 1,1% количества химически связанной воды. Изъятие свободной воды обусловлено процессами мусковитизации. В результате, начиная с глубины 9 км, уменьшился объем свободной воды, произошло уплотнение пород, так как поры и трещины на такой глубине существовать не могут из-за недостаточной прочности пород. Таким образом, увеличение скорости упругих волн в нижней зоне обусловлено протеканием ретроградных процессов, а не резким изменением химического состава пород, как считалось ранее.

Отметим еще раз, что рассмотренное явление гидрогенного разуплотнения метаморфических пород обнаружено впервые при бурении Кольской скважины. Оно заключается в том, что при смене фаций прогрессивного метаморфизма происходит выделение воды из минеральных гидратов. Вследствие большего суммарного объема этой воды и новообразованных минералов по сравнению с исходными происходит растрескивание и разрыхление пород, причем разуплотненная зона сохраняется в течение длительного времени (в данном случае около миллиарда лет) при наличии соответствующей водонепроницаемой «покрышки». Это позволяет понять геологическую природу некоторых отражающих границ в земной коре, по крайней мере в верхней ее части (до 15 — 20 км); природу и происхождение гидротермальных флюидов, не связанных с интрузиями; механизм образования некоторых типов тектонических нарушений, в том числе служащих путями вывода гидротермальных флюидов и локализации месторождений полезных ископаемых, и, наконец, коренным образом меняет представление о круговороте воды в условиях континентов и о строении подземной гидросферы.

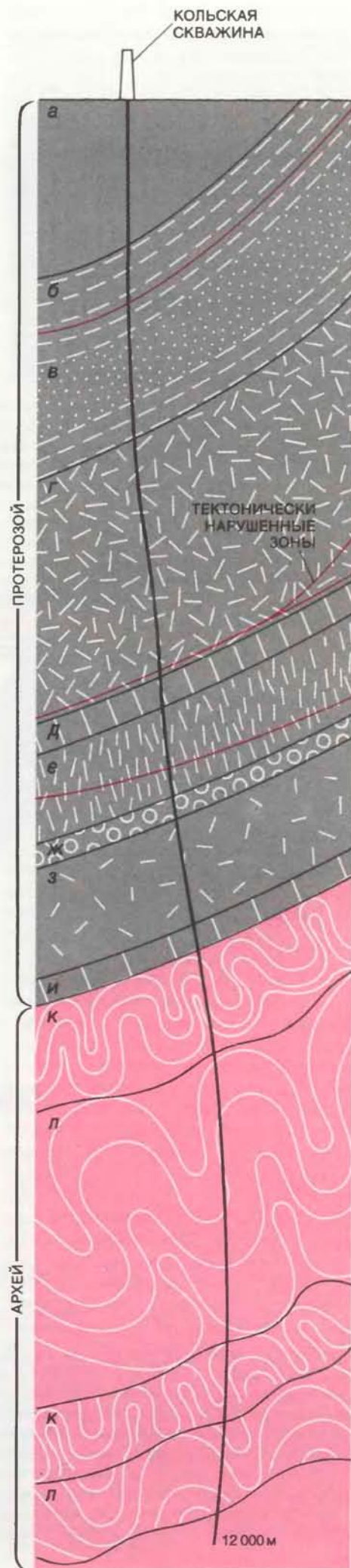
ПО РАЗРЕЗУ Кольской скважины установлены закономерные изменения с глубиной состава пород и их физических свойств. Выявлен ступенчатый рост общей кислотности пород с глубиной, отражающий специфику первичного состава нижнепротерозойского и архейского комплексов. Тенденцию к такому росту обнаруживают также общая щелочность и содержание радиоактивных, редких и редкоземельных элементов. На протяжении всего разреза прямая связь между химическим составом и плотностью пород в целом устойчива, тогда как связь этих параметров со скоростью распространения продольных упругих волн (V_p) сохраняется лишь в верхней части разреза, а в нижней полностью нарушена. В средней и нижней частях разреза вариации значений V_p определяются исключительно степенью пористости, в том числе трещиноватостью пород. При этом между пористостью и V_p устанавливается тесная обратная зависимость. Эти закономерности позволяют подойти на принципиально новой основе к решению одной из актуальных проблем, поставленных перед сверхглубоким бурением, — интерпретации геофизических данных о природе глубинных неоднородностей в земной коре. Иначе говоря, новые результаты вносят существенные поправки в сложившиеся представления о возможности прямой упрощенной корреляции геофизических данных с реальным вещественным составом глубинных ча-

стей земной коры.

Непосредственные измерения заставляют также изменить представления о распределении температуры в недрах Земли. Предполагалось, что в пределах таких тектонически спокойных регионов, как Балтийский щит, рост температуры с глубиной незначителен. На глубине 7 км ожидалась температура около 50°C, на глубине 10 км 100°C. Реальная температура оказалась существенно выше. Если до глубины 3 км температурный градиент по Кольской скважине соответствовал расчетному и составлял 1°C на 100 м, то ниже 3 км он увеличился до 2,5°C на каждые 100 м. Температура на глубине 10 км достигла 180°C вместо ожидаемых 100°C. Рост температурного градиента обусловлен идущим из глубин Земли мощным тепловым потоком. Закачиваемые в скважину сотни кубометров холодных буровых растворов возвращаются на поверхность нагретыми до 45°C. По мнению теплофизиков, вклад тепла в этот поток за счет радиоактивного распада в горных породах, пересекаемых скважиной, незначителен. Основным источником тепла оказалась мантия. В результате изучения околоствольного пространства выявлены современная и древняя (относящаяся к ранним стадиям развития литосферы) геотермическая зональность земной коры в районе Балтийского кристаллического щита. Изучена радиогеохимическая зональность урана, тория и калия. Это существенный вклад в разработку общей термической модели формирования земной коры и решение конкретных проблем использования эндогенного тепла в хозяйственных целях.

В ЗАКЛЮЧЕНИЕ отметим кратко еще некоторые результаты. Установлено современное и геосторическое изменение состояния вещества по глубин-

СХЕМА ГЕОЛОГИЧЕСКОГО РАЗРЕЗА, вскрытого Кольской сверхглубокой скважиной. Протерозой: а — авгитовые диабазы с прослоями тероксеновых и пикритовых порфиритов, туфы и туффиты основного состава с платовыми интрузиями габбро-диабазов; б — филлиты и алевролиты с прослоями туфов; в — ритмично слоистые песчаники с прослоями алевролитов и филлитов; г — актинолитизированные диабазы с редкими прослоями туфов; д — доломиты, аркозовые песчаники и серицитовые сланцы; е — метабазиты; ж — доломиты и полимиктовые песчаники; з — диабазовые порфириты и сланцы; и — конгломераты и гравеллиты. Архей: к — биотит-плаггиоклазовые гнейсы с высокоглиноземистыми минералами; л — магматизированные и гранитизированные биотит-плаггиоклазовые гнейсы с линзами магнетит-альфиболовых сланцев.



ному разрезу. Прослежена его эволюция от архея до конца раннего протерозоя, характеризующих в значительной мере строение щитов и фундаментов древних платформ мира. Температура метаморфизма в протерозойском комплексе возросла от 300 до 650°C, а геотермический градиент составлял около 10°C на 100 м, т.е. в 5 раз превышал современный. Температура метаморфизма, оцененная косвенными методами, в архейском комплексе падала во времени от 1200 — 900°C до 800 —

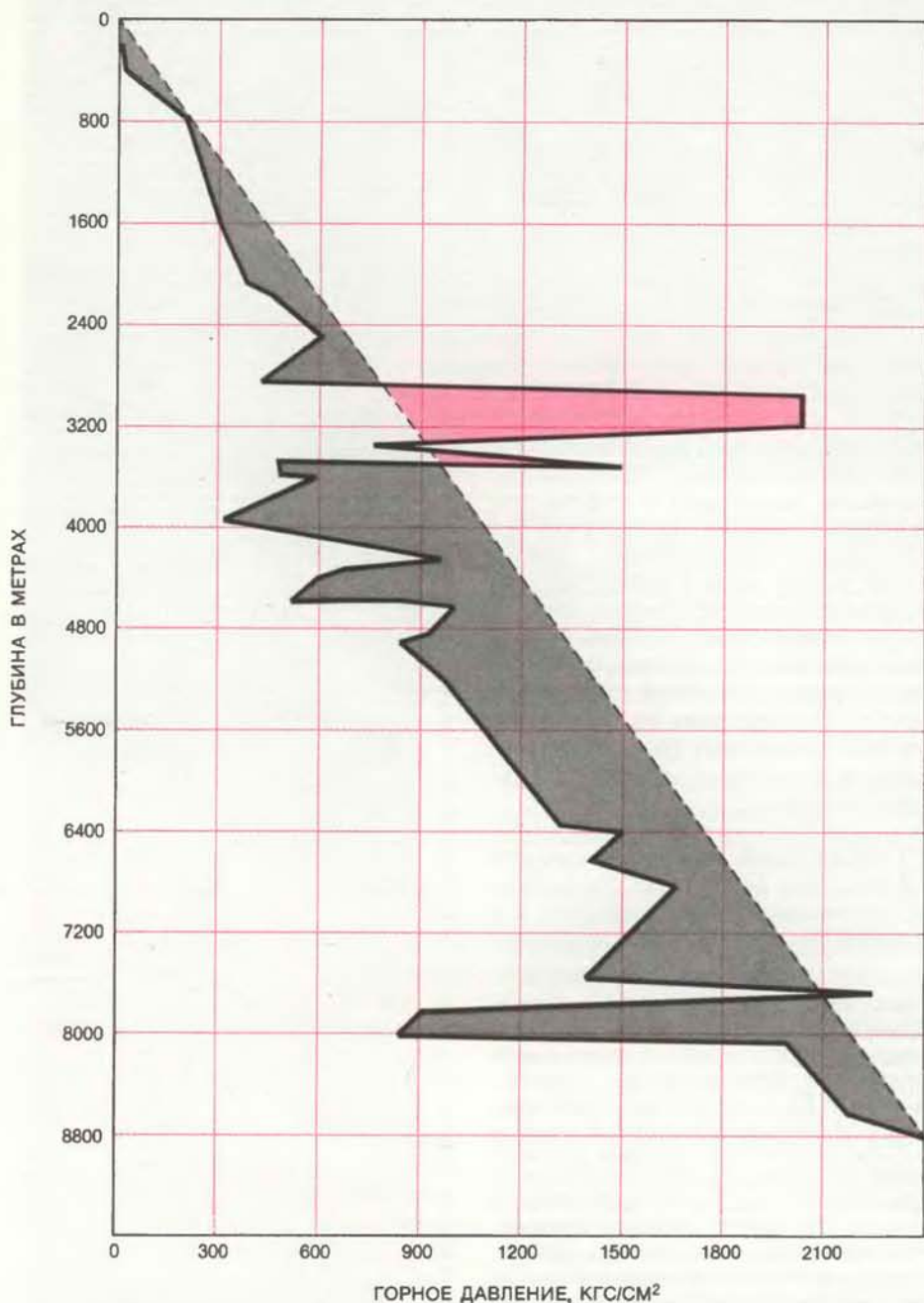
650°C. На основе построенной модели химического состава континентальной коры рассчитан состав первичной коры, соответствующий дациту. Установлена вертикальная зональность в распределении оруденения, обусловленная геологической зональностью, и доказана принципиальная возможность гидротермального рудообразования на глубинах более 5 км. Установлена вертикальная гидрогеологическая зональность: с глубиной воды существенно хлоридно-кальциевые (верхний

структурный этаж) сменяются водами гидрокарбонатно-натриевыми (нижний структурный этаж). В составе газов с глубиной возрастает роль водорода и гелия и падает роль углеводородных газов. Выявлена вертикальная зональность в распределении проявлений деформаций в земной коре: до глубины 4,5 км развиты практически недеформированные породы, в слое от 4,5 до 6,8 км — сланцеватые породы. Глубже развиты преимущественно гнейсовидные породы. На этом фоне — по всему разрезу — встречаются локальные зоны милонитизации и катаклаза пород, вдоль которых протекали низкотемпературные гидротермальные процессы.

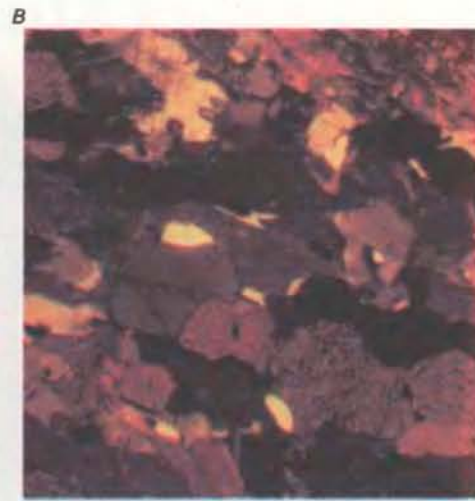
Перечень результатов бурения Кольской скважины, разумеется, не исчерпывается упомянутыми выше. Приведем для примера лишь один, крайне интересный для биологов результат. Обнаружено, что глубинные горизонты, считавшиеся извечно «мертвыми», когда-то активно участвовали в биологических процессах, протекавших в земных недрах. По данным изотопного анализа углерода выделены два источника углекислого газа. Первый связан с мантией и характерен для архейских пород, второй имеет биогенное происхождение и преобладает в породах протерозойского комплекса. В последних к тому же найдены окаменевшие остатки микроорганизмов — микрофоссилий, возраст которых исчисляется сотнями миллионов лет.

Научное и практическое значение Кольской сверхглубокой скважины трудно переоценить. Уникальный материал о состоянии и характеристиках вещества земной коры на больших глубинах позволяет существенно расширить возможности фундаментальных наук в прогнозировании дальнейшего развития минерально-сырьевой базы СССР. Кольская сверхглубокая скважина после завершения ее проходки будет превращена в природную лабораторию для испытания и совершенствования приборов и методов геолого-геофизических, геохимических и гидрогеологических исследований, для проведения долговременных наблюдений за температурным режимом и физико-химическими процессами, протекающими в земной коре. Подобные исследования важны для изучения не только нашей планеты.

КАКОВЫ же дальнейшие перспективы глубинного изучения территории СССР? В настоящее время программа изучения глубинного строения земной коры с целью определения перспектив нефтегазоносности и рудоносности основных районов включает три главных направления: глубинные геолого-геофизические исследования, глубокое и сверхглубокое бурение, создание и совершенствование технических средств



ЛИТОСТАТИЧЕСКОЕ ДАВЛЕНИЕ в массиве кристаллических горных пород измерялось с помощью метода, разработанного на основе изучения закономерностей распространения акустических волн в приствольном массиве горных пород. Изменения скоростей распространения акустических волн показали, что горное давление возрастает по сложной зависимости от глубины и горно-геологических условий. Отмечен резкий скачок давления на глубине около 3 км и его падение на глубине около 8 км. На графике пунктирная кривая построена в предположении, что горное давление возрастает пропорционально глубине и плотности пород. Сплошная кривая показывает изменение давления, измеренного по скорости распространения акустических волн в околоствольном пространстве скважины.



ОБРАЗЦЫ ПОРОД, извлеченных из Кольской скважины. **А** — метаморфизованная вулканическая лава (амфиболовый сланец) с карбонат-кварцевыми и рудными прожилками, секущими сланцеватость. Характерна неполная перекристаллизация исходной породы с частичным сохранением первичных минералов; замещение пироксенов амфиболами сопровождается возникновением сланцевой текстуры. Протерозойский комплекс, глубина 6238 м, керн, натуральная величина. **Б** — мусковитизированный (грейзенизированный) гнейс. Метасоматическое замещение кварцем (желтое) и мусковитом (сине-зеленое) метаморфогенных плагиоклаза и биотита. Процесс грейзенизации широко раз-

вит по всему разрезу архейского комплекса под воздействием растворов глубинного происхождения. Архейский комплекс, глубина 10 640 м, микрофотография ($\times 20$) прозрачного шлифа. **В** — амфиболит. Большую часть поля шлифа занимает роговая обманка (темное и коричневое с густой сетью микротрещин — спайность); кварц в виде мелких зерен (светло-желтое), плагиоклаз — более крупные зерна (темно-желтое) и редкие чешуйки биотита (красные тона). В амфиболитах установлена титаномагнетитовая минерализация. Архейский комплекс, глубина 11 427 м, микрофотография ($\times 10$) прозрачного шлифа.

для глубинных геолого-геофизических исследований. Программа разработана на 80-е годы. Основа глубинных геолого-геофизических исследований — сеть взаимосвязанных геофизических профилей, размещенных по территории СССР. В местах их пересечения будут заложены глубокие и сверхглубокие скважины. В эту систему включаются прогностические геофизические полигоны Академии наук СССР, где изучаются вариации геофизических полей.

Основной задачей исследований вдоль протяженных каркасных профилей первого класса, так называемых геотраверзов, является изучение принципиальных различий в строении, внутренней конструкции и состоянии вещества литосферы в регионах с разными геодинамическими режимами развития. Профили второго класса прокладываются в пределах однородных тектонических блоков или в определенной системе последних, а также их ограничений (сопряжения, разломы) и должны помочь решить структурно-тектонические, литологические (вещественный состав) и другие региональные задачи. Работы внутри каркасных полигонов первого и второго классов имеют уточняющий характер и направлены на изучение локальных неоднородностей верхних горизонтов коры, разломов и зон контактов. Главное их назначение — решение задач, связанных со средним и крупномасштабным прогнозированием и поисками месторождений полезных ископаемых.

Первая система глубинных сейсмических опорных профилей в сочетании с глубокими и сверхглубокими скважинами позволит наряду с решением фундаментальных задач изучить строение крупнейших геоструктур территории СССР, перспективных на нефть и газ. Это прежде всего Восточно-Европейская платформа, Западно-Сибирская плита, Сибирская платформа, т.е. структуры, перекрытые многокилометровыми толщами осадочных и осадочно-вулканогенных образований. Вторая система профилей пересечет приподнятые и обнаженные участки древних и молодых платформ — Балтийского и Украинского щитов, Воронежского массива и Волго-Уральской антеклизы в пределах Восточно-Европейской платформы, Алданского и Анабарского щитов Сибирской платформы, эпигерцинской Туранской плиты, Уральской, Алтае-Саянской и Казахстанской складчатых областей, зон новейшей эпиплатформенной активизации — Тянь-Шаня и Забайкалья. Будет составлен опорный разрез земной коры по международному геотраверзу в советской части Балтийского щита с выходом на Кольскую сверхглубокую скважину. Важное практическое значение имеют работы по изучению глубинных осадочных комплексов и подстилающих образований фундамента и коры в целом в пределах шельфовых участков Баренцева и Карского морей, зоны перехода от Азиатского континента к Тихому океану.

Программой предусмотрено значительное расширение объемов глубокого

и сверхглубокого бурения. Продолжится бурение Кольской и Саатлинской скважин. Намечено начать проходку Тюменской, Анастасьевско-Троицкой и Уральской сверхглубоких (до 12 — 15 км) скважин. Тюменская сверхглубокая скважина будет пробурена в северной части Уренгойского газового месторождения с целью пересечения всего разреза мезозойских и палеозойских осадочных образований и оценки их нефтегазонасыщенности, выявления пластов-коллекторов и покрышек, а также зон аномально-высоких и аномально-низких давлений.

Бурением Уральской сверхглубокой скважины предусматривается вскрытие и изучение наиболее полного разреза палеозойских образований эвгеосинклинальной зоны Урала. Этот разрез продуктивен на медно-колчеданное и скарново-магнетитовое оруденение. Проектируется вскрыть все рудоносные системы, пересечь кристаллический фундамент и, таким образом, решить принципиальные вопросы о возрасте и характере основания «типичной» геосинклинали. Одновременно в одиннадцатой пятилетке начнется бурение шести глубоких скважин, в том числе трех (Днепровско-Донецкая, Прикаспийская, Тимано-Печорская) в нефтеносных районах и трех (Мурунтауская, Норильская, Криворожская) в рудных. Предстоит сложная, длительная, но интересная работа; ведь по своим масштабам, научной и практической значимости изучение недр Земли является одной из актуальнейших задач современности.

Однополые ящерицы

Популяции ящериц-бегунов на юго-западе США, в Мексике и Южной Америке состоят только из самок. В отличие от других позвоночных они размножаются путем партеногенеза, т.е. без оплодотворения

ЧАРЛЗ ДЖ. КОУЛ

ВСЕ началось в 1958 г. со статьи сотрудника Академии наук СССР ленинградского зоолога Ильи Даревского*. Изучая ящериц рода *Lacerta* в Армянской ССР, он обнаружил, что некоторые их популяции состоят только из самок, и предположил, что такие ящерицы способны откладывать неоплодотворенные, но вполне жизнеспособные яйца. Многие зоологи отнеслись к открытию Даревского с недоверием: тогда считалось, что размножение позвоночных животных не может происходить без слияния мужского спермия с женской яйцеклеткой.

Впрочем, в США нашлись ученые, которые отнеслись к выводам Даревского и с пониманием, и с одобрением. Дело в том, что Ш. Минтон (Медицинский центр Индианского университета) и Р. Цвейфель (Американский музей естественной истории) на юго-западе США и на севере Мексики обнаружили популяции ящериц-бегунов из рода *Cnemidophorus*, также состоящие из одних самок. Интересно, что по соседству с ними существовали другие популяции тех же ящериц, в которых самцы и самки встречались в обычном соотношении 1:1. Минтон, Цвейфель и некоторые другие биологи полагали, что ящериц-бегунов стоит изучать, так как они совершенно новая группа в списке видов, размножающихся партеногенетически.

Термин «партеногенез», что означает размножение без оплодотворения, иногда неправильно употребляют для описания способов размножения, которые лишь на первый взгляд можно назвать однополыми. Так, самки некоторых рыб мечут диплоидные икринки, т.е. половые клетки у них содержат два полных набора хромосом. С генетической точки зрения это полноценные клетки, но они неспособны к дальнейшему развитию до тех пор, пока не будут активированы (но не оплодотворены!) спермой самца. Для описания такого способа размножения весьма

волью пользовались термином «партеногенез», имея в виду, что оплодотворения не происходит. В данном случае правильнее говорить о гиногенезе, отражая в названии ведущую роль женского начала. Существуют также рыбы, у самок которых икринки гаплоидны (т.е. содержат только по одному набору хромосом и в этом отношении ничем не отличаются от половых клеток других видов рыб, которым свойственно половое размножение) и не начинают развиваться до тех пор, пока не будут оплодотворены спермой самца, но другого, близкого вида. Такой способ размножения называют гибридогенезом: тем самым подчеркивается, что потомство всех самок имеет гибридную природу. Наконец, известен по меньшей мере один вид рыба-гермафродитов — ривулюсы (*Rivulus marmoratus*), которые размножаются путем самооплодотворения. И все же во всех трех случаях размножение происходит при участии спермиев, а для истинного партеногенеза они не нужны.

Доказать, что спермии не принимают участия в размножении, нелегко даже в условиях лаборатории, тем более это сложно в случае природной популяции. Так, например, у самок некоторых двуполых рептилий спермии после спаривания могут существовать в яйцеводах месяцами и даже годами; в конце концов происходит оплодотворение и образуются нормальные яйца. Для того чтобы доказать, что некоторые ящерицы-бегуны размножаются только партеногенетически, нужно было вырастить их дочерей до половой зрелости в отсутствие самцов и затем проверить, могут ли они дать потомство опять же без участия мужского пола.

В НАЧАЛЕ 60-х годов такие ящерицы-бегуны, которых по всем внешним признакам следовало считать однополыми, были отловлены в природе и привезены в лаборатории с целью изучить их размножение. Первое время ученых преследовали неудачи, так как никто не знал, как нужно содержать этих животных в неволе. Поначалу некоторые самки все же откладывали яйца, но большинство их погибало. Пути к решению проблемы

разведения были найдены в лаборатории Цвейфеля. Впрочем, когда уже многим удалось вывести в неволе первое поколение ящериц, возникла новая трудность: почти 90% животных погибло через 3 месяца, а большинство оставшихся — через 6. А ведь, чтобы стать половозрелыми, ящерицам-бегунам нужен без малого год. Казалось, нечего и надеяться получить в условиях лаборатории второе поколение.

Лишь в 1973 г. выяснилось, что необходимо для успешного существования ящериц-бегунов в неволе. Им отводили достаточно места, кормили, поили и согревали их, следили за чистотой в клетках, но оказалось, что свет от обычных лабораторных ламп не мог заменить им солнца: в нем не было ультрафиолетовых лучей. При попадании ультрафиолета на кожу ящериц в ней синтезируется витамин D — точно так же, как в коже млекопитающих, включая человека. Витамин этот нужен для правильного обмена кальция. В лаборатории герпетологии Американского музея естественной истории К. Таунсенд и автор этой статьи облучали ящериц ультрафиолетовым светом и обнаружили, что потребности разных видов ящериц-бегунов в нем неодинаковы.

Когда методические трудности были преодолены, разведение многих видов однополых ящериц-бегунов в неволе стало обычным делом. У нас в лаборатории сменились уже не два, а целых семь поколений однополых ящериц, и среди них не было ни одного самца.

К концу 70-х годов тот факт, что самки ящериц-бегунов могут размножаться истинно партеногенетическим путем, обходясь без спермы самцов, стал бесспорным. Путь к этому был нелегким: партеногенетические виды позвоночных были тогда неизвестны. Лучшим доказательством в пользу партеногенетического размножения послужили результаты сравнительного изучения развития самок однополых видов ящериц-бегунов и самок двуполых видов, особенно их органов размножения. Большая часть этой работы была выполнена Л. Харди (Университет шт. Луизиана, г. Шривпорт); начал он с нескольких ящериц второго

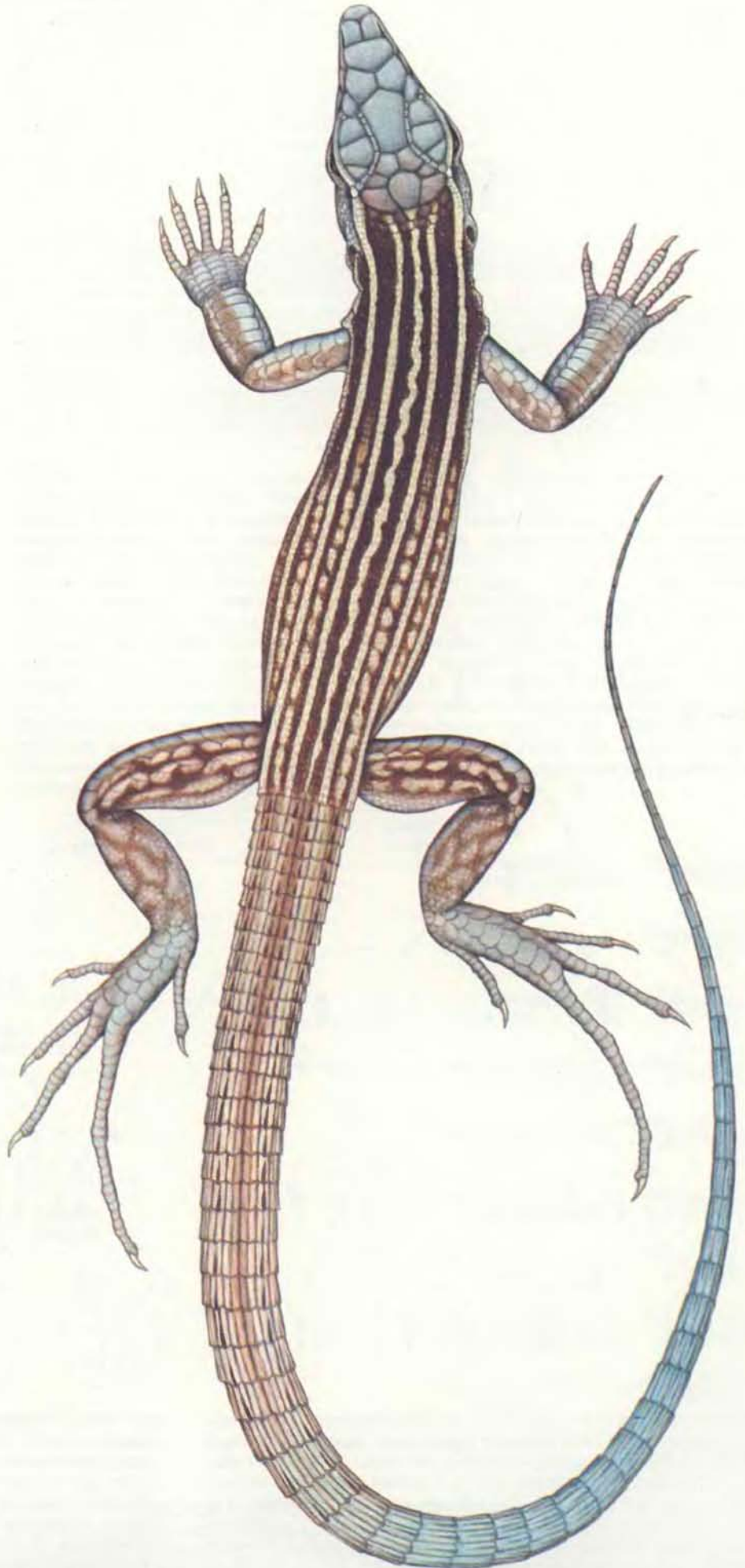
* И. С. Даревский продолжает исследование однополых ящериц и в настоящее время (см. библиографию к этой статье на с. 111). — Прим. ред.

поколения, которых мы ему предоставили. Оказалось, что практически все важные особенности строения органов размножения у однополых ящериц и у самок двуполых видов одинаковы, но ни у одной однополой ящерицы Харди не обнаружил и следа спермы. Это убедительно подтверждало правильность нашей точки зрения, согласно которой они размножаются строго партеногенетически.

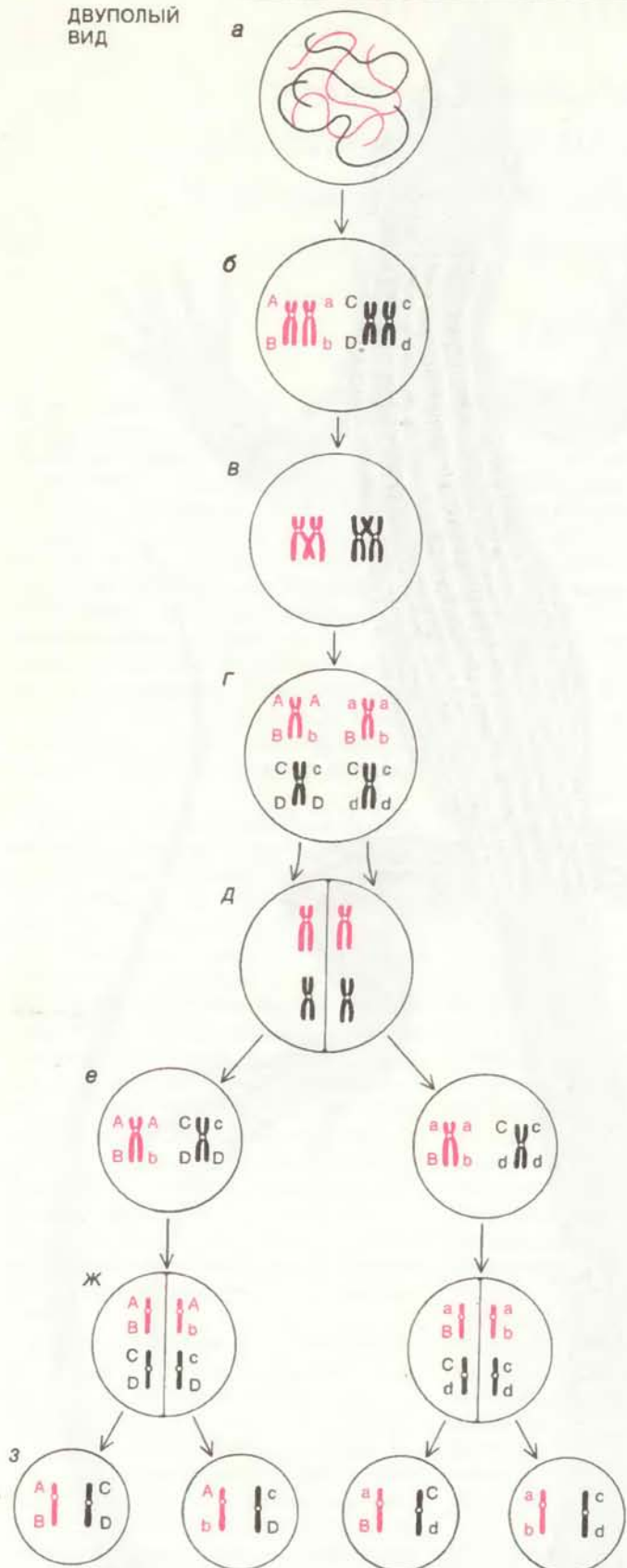
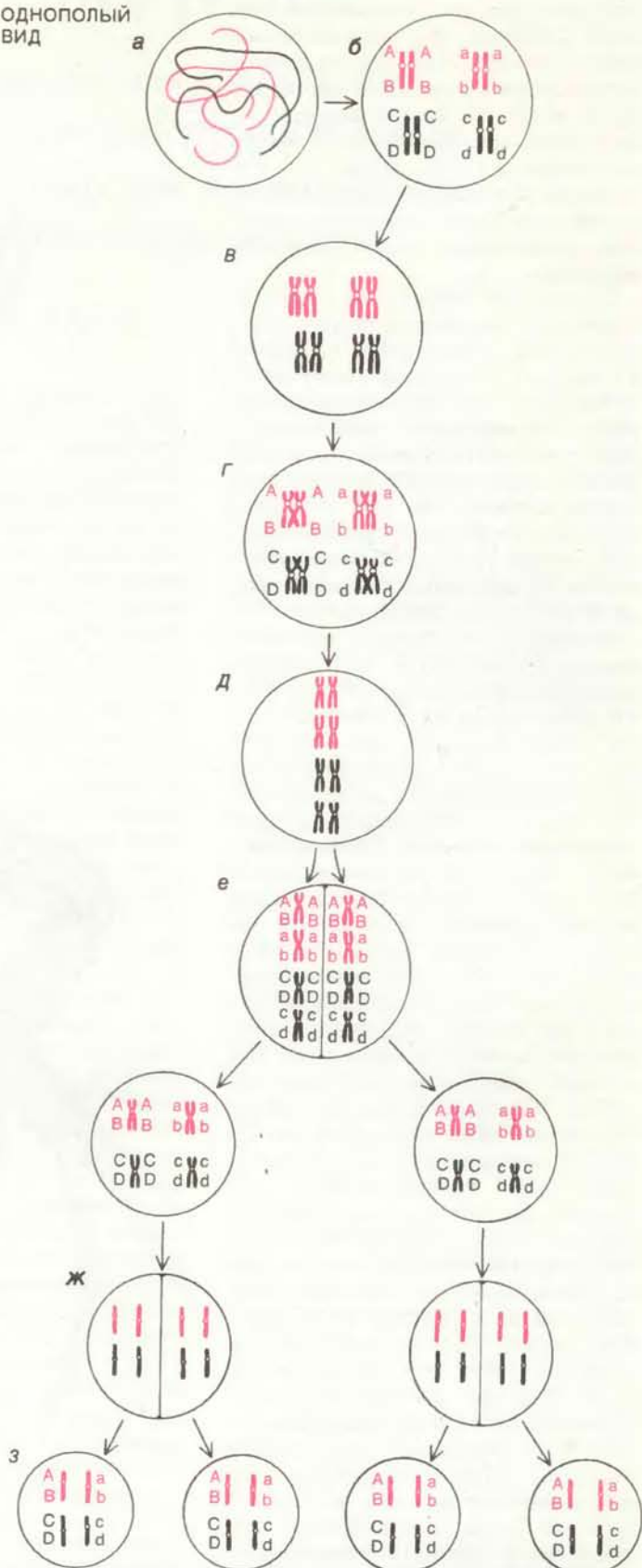
До того как были созданы лабораторные колонии ящериц-бегунов, многие зоологи, в том числе Р. Цвейфель, Т. Маслин (Колорадский университет, г. Боулдер) и У. Нивс (Медицинская школа Гарвардского университета), проводили опыты с однополыми ящерицами, пойманными в природе. Они хотели выяснить, действительно ли их популяции представляют собой клоны, т.е. группы генетически идентичных особей, происходящих от одного предка. И вот что они обнаружили.

Во-первых, такой признак, как число эпидермальных чешуек в средней части тела, у однополых ящериц оказался менее изменчивым, чем у живущих бок о бок с ними двуполых видов. Во-вторых, в клетках их тела содержатся два различных генома, т.е. два полных набора генов, о чем свидетельствуют маркерные хромосомы. Иными словами, по хромосомам они гетерозиготы. В тех случаях, когда это было особенно хорошо выражено, можно было видеть, что состояние гетерозиготности закреплено в популяции, чего и следовало ожидать, поскольку все особи похожи друг на друга. Напротив, ящерицы двуполых видов гомозиготны: в их клетках содержится по два одинаковых генома. В-третьих, у многих однополых ящериц набор хромосом в клетках больше нормального, т.е. двойного, характерного для двуполых, — он тройной. В-четвертых, когда белки однополых ящериц исследовали методом электрофореза, была получена картина, отвечающая представлениям о высоком уровне проявления фиксированной гетерозиготности; в случае белков двуполых ящериц этого обнаружено не было. Наконец, при трансплантации кусочка кожи от одной однополой ящерицы к другой ящерице того же вида он обычно приживался, что говорит о явной тканевой совместимости особей. У двуполых видов ящериц-бегунов при аналогичной пересадке трансплантат отторгался. Все эти данные говорили в пользу гипотезы о клональной природе видов однополых рептилий.

ЛАБОРАТОРНЫЕ колонии однополых ящериц-бегунов давали возможность глубже изучить их клоны, что трудно было сделать при работе с ящерицами, отловленными в природе. Например, у нас в лаборатории уход за яйцами и молодью организован так,



ЯЩЕРИЦА-БЕГУН однополого вида *Cnemidophorus neotexicanus*, обитающего в Новом Свете (увеличено вдвое). Большинство видов ящериц-бегунов двуполые: их размножение основано на оплодотворении яйца самки спермой самца. *C. neotexicanus* размножается партеногенетически: яйца развиваются без участия спермиев, а потомство состоит исключительно из самок.

ДВУПОЛЫЙ
ВИДОДНОПОЛЫЙ
ВИД

ПРОЦЕСС МЕЙОЗА у двуполовых ящериц-бегунов (слева) сопоставляется на этом рисунке с мейозом у однополого вида (справа). Схематически показаны две пары хромосом (черная и цветная) в диплоидной (т.е. с двумя наборами хромосом) клетке яичника (а). Эти хромосомы дублируются и образуют пары (б). Между хромосомами может происходить обмен частями (кроссинговер) (в), и в результате комбинации генов (гены обозначены буквами А, а, В, в, С, с, D, d) могут изменяться (г). Затем клетка делится (д), причем в дочерние клетки попадает по одной хромосоме из каждой пары (е). Второе деление клеток (ж) дает четыре новые клетки, одна из которых станет затем яйцом. Каждая клетка гаплоидна — в ней один набор хромосом (з). Теперь только слияние с гаплоидным спермием, т.е. оплодотворение, мо-

жет вернуть клетку в диплоидное состояние. У однополых ящериц начало такое же: в диплоидной клетке видны две пары хромосом (а). Далее хромосомы дублируются, но отходят друг от друга (б) и дублируются еще раз. Теперь они образуют пары (в), но клетка уже тетраплоидна. Каждая из новых хромосом образует пару с исходной, от которой она произошла. За кроссинговером (г) следует первое деление тетраплоидной клетки (д), причем в каждую из образующихся клеток отходит по одной хромосоме из каждой пары (е). Следующее деление (ж) дает четыре новые клетки; одной из них суждено стать яйцом. Каждое такое яйцо диплоидно (з) и генетически идентично исходной клетке. Развитие их начинается без участия спермиев.

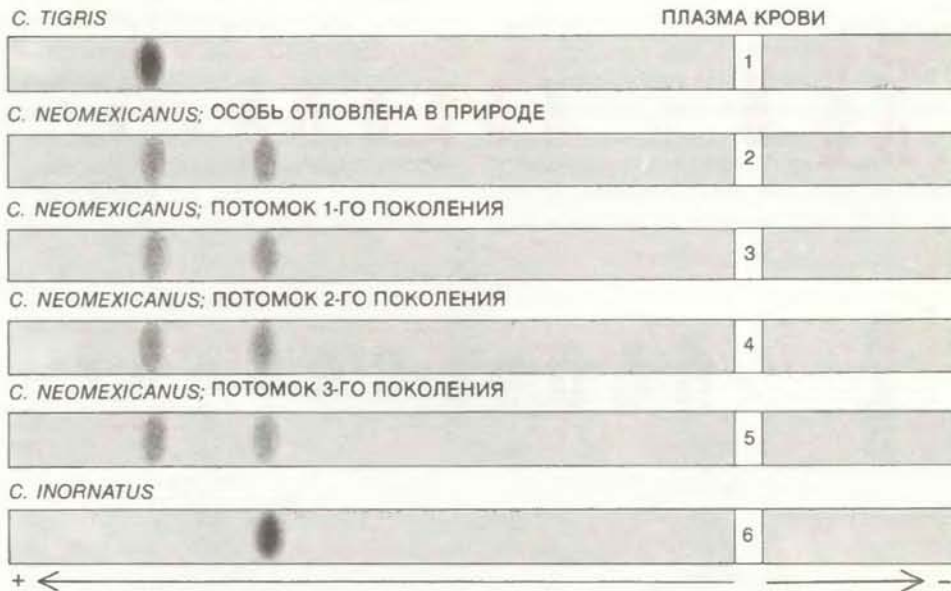
что мы можем отличать особей друг от друга, знаем их происхождение и всю родословную каждой ящерицы вплоть до того момента, когда самка — основательница клона была поймана в природе. Это позволяет сопоставлять в ряду поколений морфологические признаки животных, наборы хромосом, результаты электрофореза белков.

Исследуя наши колонии, мы выяснили довольно много важных деталей. Было установлено, что такие морфологические признаки, как цвет, характер окраски, размер и форма чешуй у отдельных ящериц колонии, как правило, всегда те же, что и у их матери. Иногда, правда, встречались и неожиданные отклонения; сейчас мы выясняем роль генетических факторов и внешней среды в их появлении. Что касается хромосомного набора, то в зависимости от того, к диплоидному или триплоидному виду принадлежала мать, у ее потомства хромосом будет столько же: 2 или 3 набора соответственно.

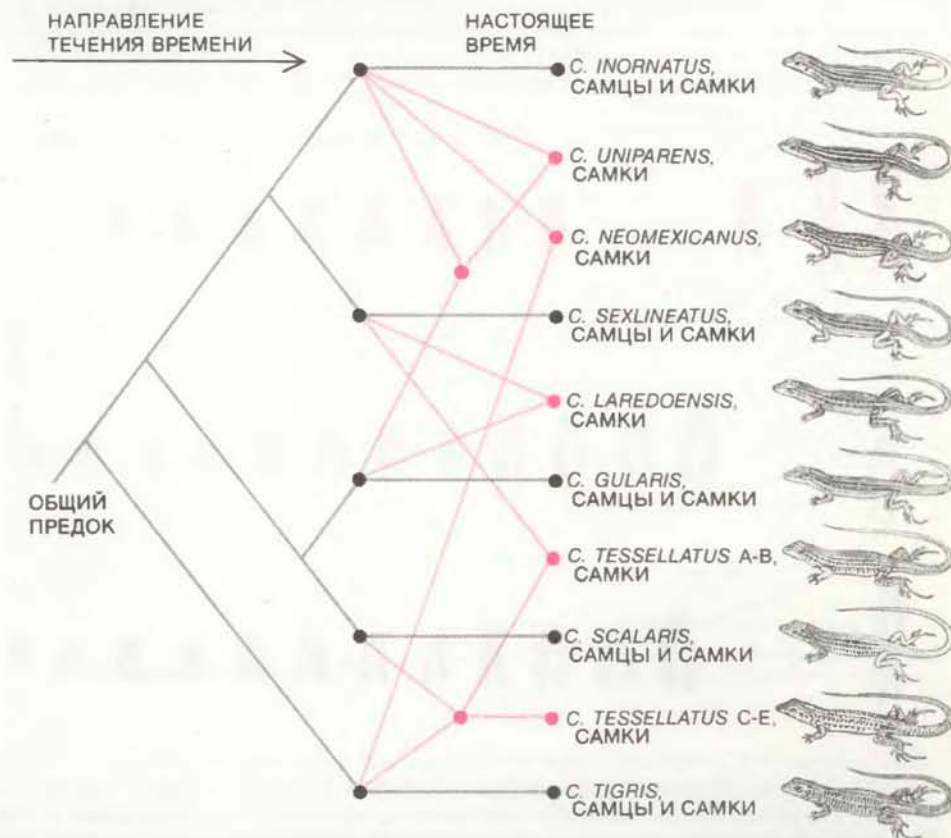
Исследователи обратились также к биохимической генетике. Г. Дессауэр (Медицинский центр Университета шт. Луизиана в Новом Орлеане) исследовал белки — продукты 30 с лишним генов и нашел, что у ящериц-бегунов из поколения в поколение характер распределения этих белков при электрофорезе не меняется и остается таким же, как и у их матери. Иначе говоря, работают те же гены, и все комбинации генов, включая гетерозиготные, фиксированны. Таким образом, данные, полученные в лаборатории, подтверждали выводы, сделанные на основании полевых исследований.

ИЗУЧЕНИЕ образования яиц у однополых ящериц-бегунов показало, что в яичниках в клетках, которым предстоит стать яйцами, происходит удвоение (дупликация) хромосом, и эти специализированные клетки становятся полиплоидными. У диплоидных видов образуются тетраплоидные клетки, а у триплоидных — гексаплоидные. Подсчет числа хромосом, а также сам факт существования клональной наследственности говорят о том, что при формировании яйцеклетки каждая из образовавшихся в результате дупликации хромосом образует пару с полностью себе подобной. Происходящий при кроссинговере обмен ДНК не имеет генетических последствий, так как в нем участвуют идентичные молекулы ДНК.

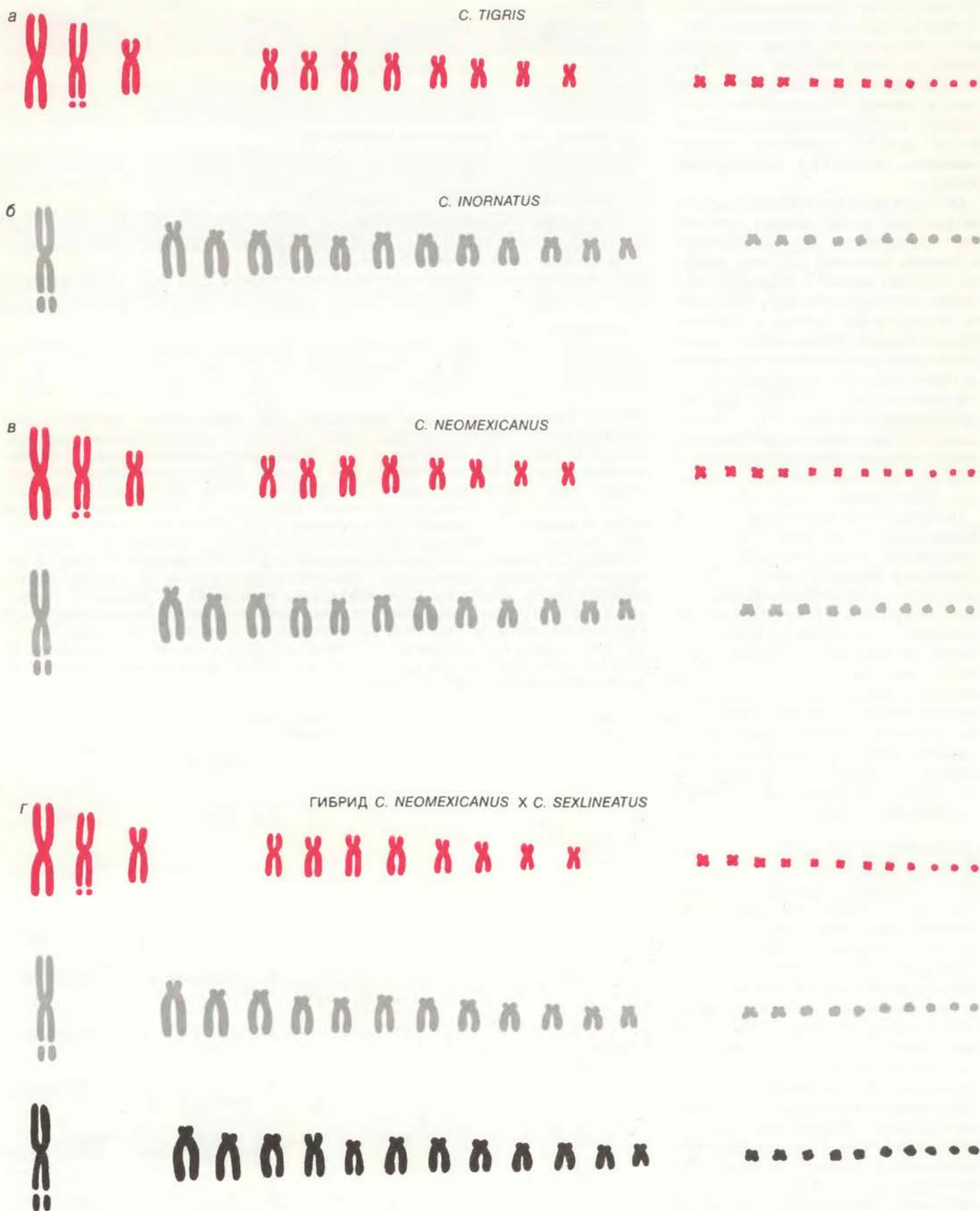
Как это обычно бывает при созревании половых клеток, вслед за кроссинговером клетки дважды делятся. В конечном счете образуются яйца, в каждом из которых столько же хромосом и та же комбинация генов, что и в исходной клетке яичника до дупликации хромосом. С генетической точки зрения такое зрелое яйцо полноценно (в отличие от гаплоидного у самок дву-



БЕЛКИ КРОВИ трех видов ящериц-бегунов исследовали методом гелеэлектрофореза. Образцы плазмы крови смешали с радиоактивным изотопом железа и внесли в 6 желобков в геле. После электрофореза на гель наложили фотопленку. Она засветилась над зонами, содержащими радиоактивную метку, — так определили, где в геле находится белок трансферрин, связывающий железо. Все белковые молекулы двигались в геле к аноду. Темное пятно в желобке 1 отвечает трансферрину с максимальной подвижностью; в этот желобок был помещен образец крови *C. tigris*. В желобке 6 — белок *C. inornatus*, по своей структуре он отличается от трансферрина *C. tigris* и обладает, как видно, существенно меньшей подвижностью. В желобке 2 был образец крови однополы *C. neomexicanus*, пойманной в природе. В желобках 3, 4, 5 — образцы, полученные от ее потомков последовательных поколений. Одинаковый характер расположения пятнышек в желобках 2—5 говорит о клональном механизме наследования. Обратите внимание, что у однополы *C. neomexicanus* работают два различных гена трансферрина, происходящие от родительских видов *C. tigris* и *C. inornatus*



ФИЛОГЕНЕТИЧЕСКОЕ РОДСТВО девяти видов ящериц-бегунов. Двуполые виды (черные кружки), видимо, дивергировали от одного общего предка. Более всего разошлись *C. inornatus* и *C. tigris*. Однополые виды (цветные кружки) возникли, вероятно, путем гибридизации; их филогенетические связи весьма причудливы. Диплоидные однополые виды, например *C. neomexicanus* и *C. laredoensis*, образовались в результате одного акта гибридизации, у триплоидных видов, таких, как *C. uniparens* и *C. tessellatus* A—B, родословная сложнее: гибридизация происходила более одного раза, а среди предков можно насчитать до трех двуполых видов.



ХРОМОСОМЫ некоторых видов ящериц-бегунов (схема). а — 23 хромосомы гаплоидной половой клетки *C. tigris*; б — 23 хромосомы такой же клетки *C. inornatus*; в — 46 хромосом соматической клетки однополой *C. neomexicanus*, число их нормально для диплоидной клетки. Видно, что набор в очень похож на сумму наборов а и б. Это говорит в пользу гипотезы о том, что *C. neomexicanus* возникли в результате скрещивания двуполых *C. tigris* и *C. neomexicanus* размножаются партеногенетически, и комбинация хро-

мосом передается неизменной от поколения к поколению. Если самка однополого вида спарится с самцом двуполого вида, то получится триплоидный гибрид (г). Здесь показан триплоидный набор из 69 хромосом соматической клетки гибрида, полученного в лаборатории при скрещивании самки *C. neomexicanus* с самцом двуполого вида *C. sexlineatus*. Если триплоидную самку скрестить с нормальным самцом, то у их потомства клетки будут тетраплоидные.

полых видов) и может развиваться без оплодотворения.

Как возник в природе этот необычный способ размножения? Ящерицы-бегуны рода *Cnemidophorus*, включающего около 40 видов, встречаются только в Новом Свете. Большинство видов двуполые, но 12, судя по всему, однополые. Большая часть однополых видов обитает в тех районах юго-запада США и севера Мексики, где сообщества растений при переменах климата в последнюю геологическую эпоху сильно изменялись.

Нередко в одном и том же месте существуют однополые виды и один-два вида двуполых ящериц. В таких условиях самка однополый ящерицы может случайно спариться с самцом двуполого вида и принести гибридное потомство. По числу хромосом детеныши будут полиплоидными: диплоидные однополые самки дадут триплоидное потомство, а триплоидные соответственно — тетраплоидное. По данным Дессауэра, все те характерные гены родителей, за проявлением которых можно следить при помощи метода электрофореза белков, у их потомков активны. Гибриды больше похожи на мать (от нее они получили два или три набора хромосом) и меньше на отца (его вклад — один набор хромосом). Если яйцо было оплодотворено спермием, несшим X-хромосому, то на свет появляется гибридная самка, а если Y-хромосому, — самец.

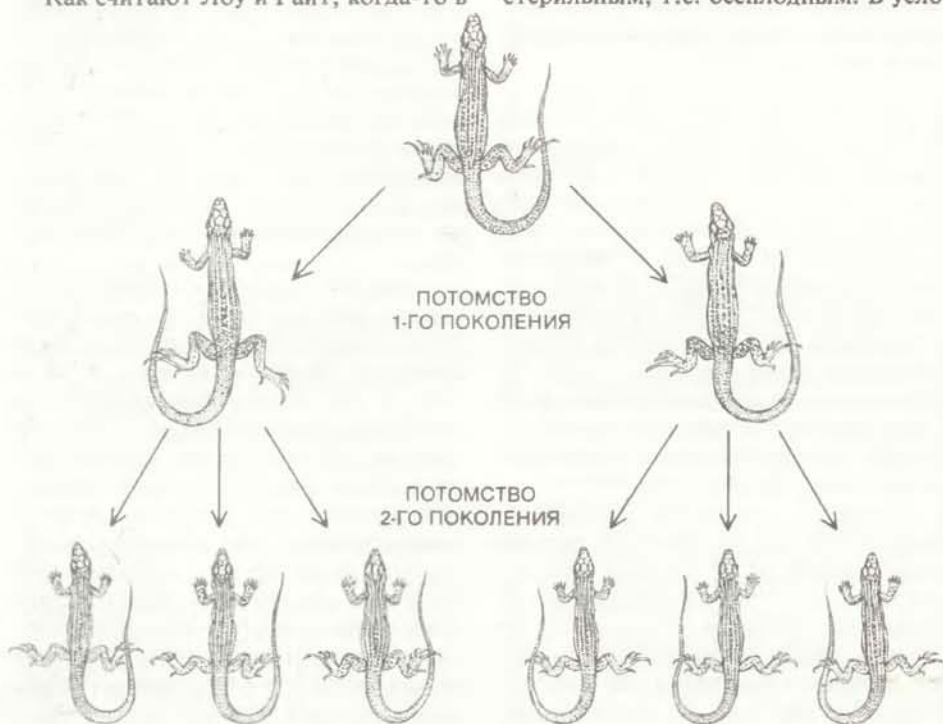
Судя по признакам таких гибридных особей, в природе однополые триплоидные виды ящериц-бегунов возникают как клоны от гибридных самок — детенышей диплоидной самки однополого вида, оплодотворенной самцом другого, двуполого вида. Но откуда же берутся диплоидные однополые ящерицы? Ответ на этот вопрос дали в 1966 г. Ч. Лоу-младший (Аризонский университет) и Дж. Райт (сейчас он работает в Лос-Анджелесском музее естественной истории). Наиболее подробно ими был изучен *C. neotexicanus*, обитающий в шт. Нью-Мексико. Эти ящерицы встречаются там по берегам речной системы Рио-Гранде и в прилегающей полупустынной местности, условия и растительность которой являются переходными от зоны пустынь к зоне лугов. Ящерицы-бегуны другого вида, двуполые *C. inornatus*, живут на соседних лугах и, таким образом, их ареал и ареал *C. neotexicanus* частично перекрываются. Еще один вид двуполых ящериц, *C. tigris*, обитает в пустыне: вблизи границ своей области распространения они также сосуществуют с *C. neotexicanus*.

Лоу и Райт отметили, что по таким ключевым признакам, как цвет, характер окраски, форма чешуек, число хромосом и тип местообитания, *C. neotexicanus* очень похожи на гибридов

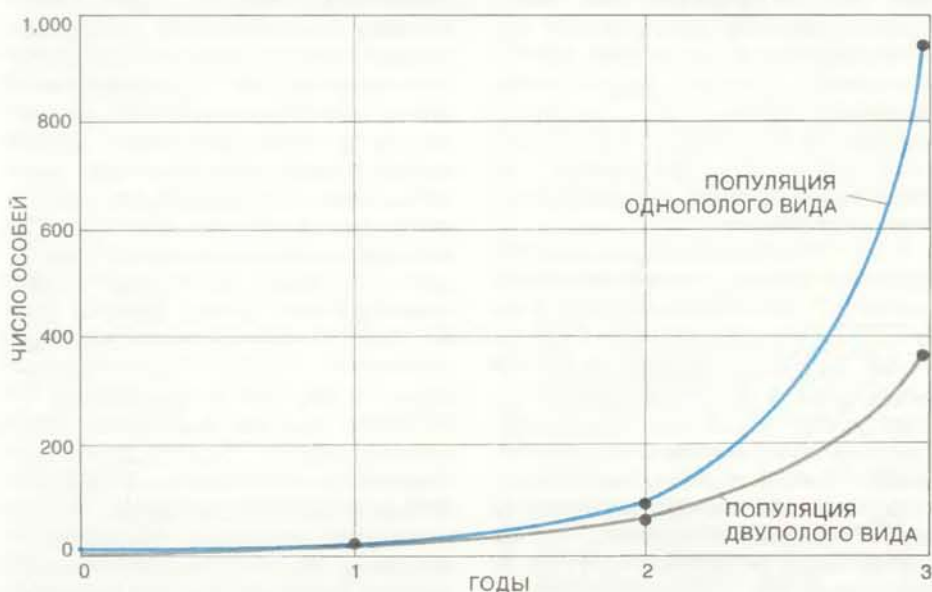
первого поколения от скрещивания *C. inornatus* и *C. tigris*. *C. neotexicanus* размножаются путем партеногенеза, так что их популяции — это клоны и сходство особей с гибридами первого поколения неизменно сохраняется в ряду поколений.

Как считают Лоу и Райт, когда-то в

прошлом луговые виды ящериц-бегунов скрещивались с видами из пустыни; в результате получались гибриды, подобные *C. neotexicanus*. Как это обычно бывает при межвидовом скрещивании, потомство, включавшее и самцов и самок, было большей частью стерильным, т.е. бесплодным. В усло-



ОДНОПОЛЫХ ЯЩЕРИЦ-БЕГУНОВ *C. exsanguis* теперь разводят в неволе. Получено уже семь поколений. Здесь показаны мать — основательница клона и ее потомки первого и второго поколений. Все они самки, генетически идентичные друг другу и исходной особи. 6 особей второго поколения отличаются от остальных по цвету: они еще не приобрели окраску, свойственную взрослым животным.



РАЗМНОЖЕНИЕ у однополых ящериц-бегунов идет быстрее — в этом одно из их преимуществ. На рисунке показан рост численности популяции однополого вида (цветная кривая) и двуполого (черная кривая). В основу положены данные об интенсивности откладки яиц *C. exsanguis* в лабораторных условиях. Точка «0» на графике соответствует откладке одного яйца. В момент «1» двуполым ящерицам нужен самец для оплодотворения. В конце первого года (при условии, что выводится и выживает 100% особей) в обеих популяциях будет по девять особей, однако к концу третьего года число однополых ящериц уже более чем вдвое превышает число двуполых, так как у однополого вида все особи откладывают яйца, а у двуполого — только половина.

виях смешанного пустынно-лугового ландшафта эти гибриды, видимо, имели преимущество в конкуренции с исходными видами. Гибридные самцы первого поколения в конце концов все умерли, но среди самок нашлись способные к партеногенетическому размножению — они и дали начало клону и таким образом успешно продолжили свой род.

ОБЫЧНО считается, что стерильность межвидовых гибридов — пример действия естественного отбора: те особи, которые скрещиваются в пределах своего вида, оставляют жизнеспособное потомство, а гибридизация не дает адаптивных преимуществ, так как ей сопутствует стерильность. Однополые ящерицы, будучи гибридного происхождения, тем не менее с успехом продолжают свой род благодаря партеногенетическому размножению. Имеют ли эти ящерицы какие-либо адаптивные преимущества?

Первым и очевидным преимуществом, конечно же, является сам партеногенетический способ размножения, так как он позволяет обойти проблему стерильности гибридов. Кроме того, при клональном наследовании в поколениях, видимо, сохраняется так называемая гибридная сила, т.е. явление повышенной жизнеспособности гибридов по сравнению с родителями. Иными словами, благодаря клонированию у ящериц не изменяются те комбинации генов, которые оказались удачными в данных конкретных условиях обитания. Третьим преимуществом можно считать усиление интенсивности размножения. Так как популяция однополых ящериц состоит только из самок, плодящих только самок, однополый вид при той же численности может воспроизводить себя эффективнее, чем двуполый, в котором половина особей яиц не откладывает.

Стоит отметить и некоторые преимущества однополых видов при заселении новых местообитаний или даже новых местностей. Например, для создания популяции на ранее не занятой данным видом территории достаточно одной-единственной ящерицы, способной к партеногенетическому размножению. Кстати сказать, партеногенез может возникнуть и в результате мутаций, а поскольку он выгоден, то в такой ситуации он закрепится, и образуется новый вид, родоначальницей которого послужила мутантная особь.

Похоже, что именно так возник южноамериканский вид ящериц-бегунов *C. lemniscatus* (его изучал П. Ванзолини из Университета в Сан-Паулу, Бразилия).

Вообще-то (или по крайней мере в принципе) партеногенетический вид имеет преимущество не всегда. Клональная наследственность выгодна в

постоянных условиях существования, поскольку она сохраняет оптимальную комбинацию генов, делающую особь хорошо приспособленной к данному местообитанию. На деле, однако, условия среды редко бывают постоянными. Если же они быстро меняются (а это скорее правило, чем исключение), то двуполый вид имеет больше шансов дать разновидность, лучше приспособленную к новым условиям, чем однополый. «Срок жизни» вида, размножающегося партеногенетически и образующего клон, может быть поэтому меньше, чем у вида с половым размножением и менделевским типом наследования.

Однако не все козыри отбора играют против партеногенетически размножающегося вида. Удобная для него среда обитания обычно не исчезает полностью, а так сказать, перемещается, и ящерицам, чтобы оставаться в привычных им условиях, нужно лишь следовать за нею. Кроме того, если в каком-либо из поколений однополых ящериц однажды произойдет удачная мутация, партеногенетическое размножение обеспечит ее передачу последующим поколениям. Этот способ размножения может обеспечить популяции даже защиту от неблагоприятных мутаций, например если мутация рецессивна и возникла у триплоидной особи.

ДВАДЦАТЬ пять лет назад, когда было высказано смелое предположение о существовании однополых ящериц, никто и не думал, что их изучение приведет к открытию удивительных явлений у позвоночных животных: партеногенетического клонообразования, полиплоидии и видообразования путем гибридизации. Сегодня интересующиеся этими проблемами ученые имеют возможность не только задавать новые вопросы или задумывать новые опыты, но и использовать этих необычных животных для целей, которые всего несколько лет назад и представить было трудно. Назовем хотя бы изучение роли спермиев при оплодотворении; выяснение причин, по которым одни животные прекрасно существуют со многими копиями генов в клетках, а другим это идет во вред; исследование механизмов, регулирующих эмбриональное развитие; получение клонов животных с известным генотипом, так нужных биологам для опытов. Заманчиво было бы индуцировать образование клонов у обычных двуполых видов и увеличить таким путем продуктивность животноводства.

И если изучение однополых рептилий действительно поможет достигнуть успеха в одном из этих направлений, не будем забывать, что все началось с немногих наблюдений над одним из тех видов животных, которым мало кто придавал значение.

Издательство
МИР
предлагает:

М. Лонгейр
АСТРОФИЗИКА
ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

Перевод с английского

Видный английский астрофизик на основе курса лекций, прочитанных в Кембриджском университете, подробно рассмотрел процессы во Вселенной, происходящие с участием частиц и фотонов высокой и сверхвысокой энергии. Автор затрагивает протонную и электронную компоненты космических лучей, космическое рентгеновское и гамма-излучение, а также такие экзотические объекты, как пульсары, квазары, активные ядра галактик — наглядные свидетельства взрывных процессов чудовищной интенсивности.

Для астрономов и физиков — теоретиков и экспериментаторов, как специалистов, так и интересующихся новой проблематикой студентов.

1984, 26 л. Цена 4 р. 20 к.

ОСНОВЫ СЕНСОРНОЙ ФИЗИОЛОГИИ

Перевод с английского

Книга специалистов из ФРГ, выдержавшая 3 издания на немецком языке и 2 на английском, посвященная одному из самых интересных разделов нейрофизиологии. Рассмотрены общие вопросы сенсорной физиологии, строение и функции соматовисцеральной, зрительной, слуховой, вкусовой, обонятельной систем, механизмы, лежащие в основе чувств равновесия, голода и жажды. Материал изложен на вполне современном уровне, компактно и четко.

Для студентов и аспирантов университетов и медицинских институтов, а также для специалистов в области нейрофизиологии.

1984, 23 л. Цена 3 р. 80 к.



Наука и общество

Отбор из генофондов природных популяций

НЕБЫВАЛЫЙ рост продуктивности сельского хозяйства, наблюдающийся в последние десятилетия, во многом объясняется применением достижений современной генетики, благодаря которым выведены элитарные зерновые культуры и породы животных. До недавнего времени успехи селекции были связаны преимущественно с использованием генетического разнообразия древних пород домашних животных и сортов культурных растений. Теперь же стало ясно, что для дальнейшего роста производства сельскохозяйственных продуктов и повышения их качества необходимо привнесение генов из природных популяций растений и животных. Кстати сказать, это заставит уделять больше внимания сохранению генетических ресурсов как в естественной среде обитания организмов, так и в искусственных условиях.

Яркий пример тому — пшеница. С 1930 по 1975 г. ее урожай в США возрос на 115%, причем наполовину этот прирост достигнут благодаря успехам генетики. Но на сегодняшний день разнообразие генетического материала культурных разновидностей пшеницы практически полностью исчерпано. Более того, одним из непредвиденных последствий успешной селекции как раз и оказалось катастрофическое сужение диапазона генетической изменчивости культурных пшениц.

В целом культурные растения уже удалось существенно улучшить за счет генетических ресурсов природных популяций (в животноводстве, правда, успехов пока нет). Наиболее выгодным признаком из тех, что удалось позаимствовать у диких растений, оказалась устойчивость к заболеваниям. Например, некоторые коммерческие сорта обыкновенной пшеницы *Triticum aestivum vulgare* весьма выиграли от того, что приобрели у отдаленно родственных диких видов гены устойчивости к определенным штаммам паразитических грибов. Очень многие сорта азиатского риса своей устойчивостью к возбудителям двух наиболее распространенных заболеваний (пирикулярриоза и карликовости) также обязаны генам дикого вида риса *Oryza nivara* (см. статью М. С. Свамнатана «Рис», с. 4). Однако потребность в устойчивых сортах существует постоянно, так как большинство фитопатогенов очень быстро эволюционирует.

В опубликованном Международным институтом окружающей среды и развития обзоре, посвященном глобальному положению в отношении исполь-

зования генетических ресурсов природных популяций, помимо риса и пшеницы рассматриваются еще 22 основные сельскохозяйственные культуры, которые уже удалось усовершенствовать путем введения генетического материала диких растений. Среди них кукуруза, ячмень, овес, картофель, маниок, батат, подсолнечник, масличные пальмы, кунжут, томаты, горох, морковь, виноград, яблоня, груша, земляника, сахарный тростник, сахарная свекла, табак, каучуковое дерево, шоколадное дерево и хлопок. Подчеркивается, что некоторые виды, например томаты *Lycopersicon esculentum*, уже, по видимому, не могут играть роль коммерческих сортов без генетического «подкрепления» со стороны своих диких родственников.

По мнению авторов обзора Кристины и Роберта Прескотт-Аллен, достигнутые в этом направлении результаты достаточно весомы и наглядно демонстрируют огромный потенциал генетического разнообразия диких растений и животных в смысле улучшения существующих и создания новых культурных растений и домашних животных. Подчеркивается, что использование генетических ресурсов природных популяций — это путь получения материальной выгоды от дикой природы, не наносящий ей ущерба. Главными факторами, угрожающими природному видовому разнообразию, считаются уничтожение местообитаний видов, прямое истребление диких видов вследствие чрезмерного их промысла, а также интродукция видов-конкурентов и хищников. Однако влияние этих факторов на природные генетические ресурсы обнаружить не просто. Ценные гены широко распространенных видов могут исчезать незаметно, поскольку, с одной стороны, еще мало известно о внутривидовом распределении генетических вариаций, а с другой — сама численность вида может маскировать исчезновение гена из генофонда.

Единственно приемлемым следует считать двойной подход: генофонды природных популяций необходимо сохранять как в естественных условиях, т.е. в природе, так и в искусственных — в зоопарках, ботанических садах и генетических банках. «К счастью, — отмечают авторы обзора, — взгляды и интересы тех, кто непосредственно использует генетические ресурсы для селекции, и тех, кто посвятил себя делу охраны природы, сближаются... Методы сохранения и методы использования генофондов развиваются бок о бок — и это естественно».

Издательство
МИР
предлагает:

Б. Шутц

ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

Перевод с английского

Введение в геометрические методы математической физики, содержит основные сведения по дифференциальной геометрии вплоть до понятий римановой геометрии и теории связностей в расслоениях, а также некоторые физические приложения — в частности из общей теории относительности и теории калибровочных полей.

Для математиков и физиков, желающих ознакомиться с приложениями геометрии в математической физике.

1984, 18 л. Цена 1 р. 60 к.

ТРЕБОВАНИЯ И СПЕЦИФИКАЦИИ В РАЗРАБОТКЕ ПРОГРАММ

Серия

«Математическое
обеспечение ЭВМ»

Перевод с английского

Сборник посвящен важному этапу разработки программ — определению общих требований к программе и точному описанию задачи, которую она должна решать. Он содержит работы по универсальным языкам спецификаций, языкам описания систем баз данных и методологии разработки спецификаций. Представлены как широко признанные методики, так и новые экспериментальные. В числе авторов — известные американские специалисты Д. Росс, К. Хеннингер, Ф. Бауэр и др.

Для программистов и математиков, интересующихся проблемами программирования.

1984, 20 л. Цена 1 р. 60 к.



Регуляция биосинтеза рибосом

Клеточные органеллы, на которых происходит синтез белка, построены из трех разных РНК и пятидесяти двух белков.

Каким образом регулируется сборка рибосом в соответствии с нуждами клетки?

МАСАЯСУ НОМУРА

РИБОСОМЫ — это клеточные органеллы, осуществляющие синтез белков в клетке. На них происходит последовательное присоединение аминокислот к растущей полипептидной (белковой) цепи. Завершенная белковая цепь может сама сворачиваться в пространстве, становясь функционально активной молекулой, которая либо выполняет в клетке структурную функцию, либо служит ферментом, т.е. катализирует ту или иную биохимическую реакцию. Так как все реакции обмена веществ протекают при участии ферментов, для того чтобы быстро расти, клетке необходимо ускорять биосинтез белков. Однако на рибосоме скорость присоединения новых аминокислот к растущей цепи белка ограничена. К примеру, у бактерий *Escherichia coli* при 37°C на одной рибосоме может происходить присоединение не более 15 аминокислот в секунду. Если температура остается постоянной, а среда, в которой живет *E. coli*, обогащается питательными веществами, бактерии начинают делиться значительно быстрее. Поскольку возможности отдельной рибосомы ограничены, клетке для ускорения синтеза белка необходимо иметь больше рибосом. Но на их биосинтез расходуется довольно много энергии, и, следовательно, иметь большой избыток рибосом для клетки тоже невыгодно. Значит, бактерии должны иметь достаточно тонкие механизмы контроля числа рибосом.

Рибосома устроена довольно сложно: в ее состав входят 52 различных белка и 3 разные РНК, так что и регуляция ее биосинтеза далеко не проста. Информация о структуре рибосомных белков и рибосомных РНК (рРНК) бактериальной клетки закодирована в ДНК ее единственной хромосомы. При синтезе белков эта информация сначала «переписывается» (транскрибируется) в РНК, которая далее на рибосоме служит матрицей для сборки белков. рРНК же образуется непосредственно в результате транскрипции с хромосомной ДНК. Для обеспечения нормальной скорости биосинтеза рибосом необходимо, чтобы скорость синтеза каждого компонента определялась по отношению к скоростям синтеза

остальных 54 компонентов, точно так же, как для сборки автомобиля необходимо наличие всех деталей на складе и их своевременное поступление на конвейер. Регуляция сборки рибосом может, очевидно, осуществляться по крайней мере на двух уровнях — при транскрипции всех 55 рибосомных компонентов и при трансляции мРНК 52 рибосомных белков.

Наиболее естественно было бы предположить, что транскрипция рибосомных генов управляется по механизму прямой (позитивной) регуляции. Действительно, в 70-х годах, когда изучение биогенеза рибосом еще только начиналось, такая модель генетической регуляции была общепринятой. Очень скоро, однако, стало ясно, что прямая регуляция не может объяснить всех особенностей изменения скорости сборки рибосом. Дальнейшие работы, результаты которых и обсуждаются в этой статье, показали, что синтез рибосом контролируется механизмом, основой которого являются две системы обратной (негативной) регуляции. Пока в клетке есть свободные рибосомные РНК, в ней продолжается синтез рибосомных белков, которые сразу связываются с рРНК, и происходит сборка рибосом. Когда свободных рРНК не остается, некоторые рибосомные белки начинают играть роль репрессоров трансляции: связываясь с мРНК, они прерывают трансляцию всех рибосомных белков. Это — первая система обратной регуляции. Вторая система управляет транскрипцией рРНК и некоторых других генов. В этом случае негативная регуляция осуществляется свободными рибосомами, т.е. рибосомами, не вовлеченными в данный момент в синтез белка. Если в клетке появляются такие «безработные» рибосомы, они «выключают» гены рРНК. Когда в среде появляется много питательных веществ, на свободных рибосомах начинается синтез белка и гены рРНК «включаются» опять. Взаимодействие этих двух систем дает клетке возможность очень точно регулировать скорость сборки рибосом.

Как и в случае многих других фундаментальных научных открытий, оказа-

лось, что принцип системы, существующей в клетке для контроля активности рибосомных генов, имеет и более общее значение. Репрессия трансляции по механизму обратной связи может использоваться для регуляции биосинтеза и других бактериальных органелл, для сборки которых нужны несколько разных молекул. Не исключено также, что результаты, полученные на *E. coli*, применимы к биосинтезу рибосом в клетках многоклеточных организмов, включая человека. Наконец, понимание столь сложного и в то же время элегантно механизма биологической регуляции приносит чисто эстетическое наслаждение, что вовсе не мало важно в научной работе.

СТРУКТУРА, функции и способ сборки рибосом настолько тесно связаны с экспрессией генетической информации, что необходимо сначала разобраться в генетическом кодировании, чтобы понять, как регулируется биогенез рибосом. ДНК — первичный носитель генетической информации — представляет собой линейный полимер, в состав которого входят нуклеотиды четырех типов: аденин (А), цитозин (С), гуанин (G) и тимин (Т). Вследствие своей химической природы А обычно может соединяться водородными связями только с Т, а С — только с G. Благодаря этой избирательности, или, как ее называют, комплементарности, две цепи ДНК соединяются в двунитевую спираль, такую, например, как единственная хромосома *E. coli*, несущая всю генетическую информацию о бактериальной клетке.

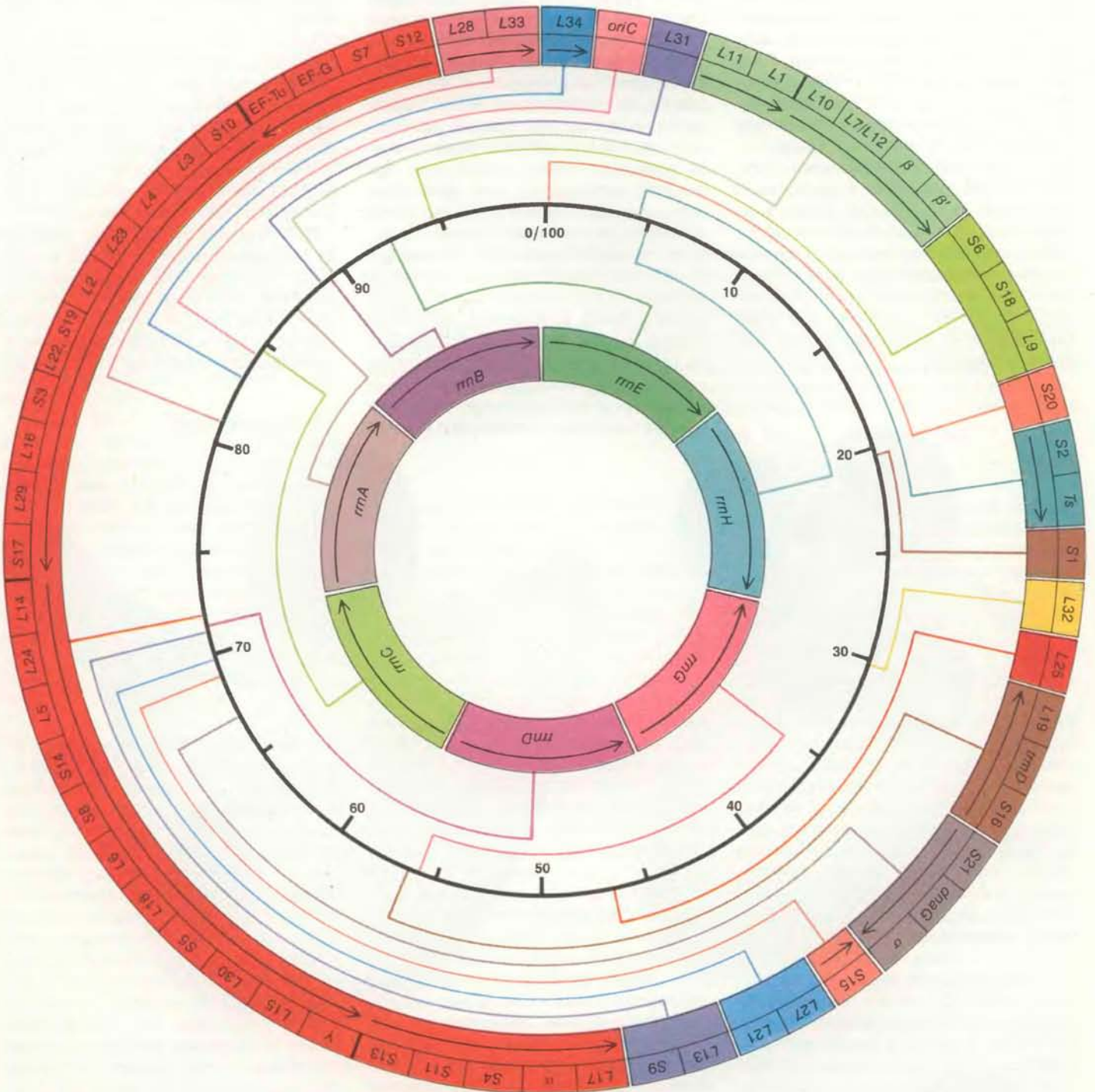
Хромосома *E. coli* представляет собой двуспиральную ДНК длиной около 4 млн. нуклеотидов, замкнутую в кольцо. В последовательности нуклеотидов закодирована информация о структуре всех белков, необходимых для бактерии, и некоторых ее РНК. Участок ДНК, несущий информацию о каком-то одном продукте — белке или рибосомной РНК, называется геном. На гены 55 компонентов рибосомы приходится около 5% всей информации, заключенной в ДНК *E. coli*. Последовательность нуклеотидов гена транскрибируется в последовательность нуклеотидов мат-

ричной РНК с помощью специальных ферментов — РНК-полимераз. РНК-полимераза связывается в определенном участке с ДНК и дальше движется по ней, синтезируя цепь РНК. РНК состоит из тех же нуклеотидов, что и ДНК, за исключением того, что вместо тимина в нее входит урацил (U), кото-

рый, так же как и тимин, комплементарен аденину. РНК-полимераза присоединяет к растущей цепи РНК нуклеотиды, комплементарные нуклеотидам в ДНК. Синтезированная РНК является, таким образом, «негативом» данного участка бактериальной хромосомы и, следовательно, несет ту же генетиче-

скую информацию, что закодирована в этом гене. По завершении транскрипции образовавшаяся молекула РНК отделяется от ДНК.

Если в результате транскрипции образовалась матричная РНК (мРНК), то к ней быстро присоединяются рибосомы и начинается трансляция, т.е.



ГЕНЫ РИБОСОМНЫХ КОМПОНЕНТОВ на карте хромосомы *Escherichia coli*. Бактериальная хромосома — это двуспиральная кольцевая ДНК длиной примерно 4 млн. нуклеотидов. Среднее кольцо (черное) — карта, каждая единица которой соответствует 40 тыс. нуклеотидов. Рибосомные гены — это участки нуклеотидной последовательности, кодирующие компоненты рибосом (белки и РНК). Гены 52 рибосомных белков показаны на внешнем кольце. Символ S означает, что продукт гена входит в состав малой субчастицы

рибосомы; символ L — в состав большой. Между рибосомными генами расположено несколько нерибосомных. *oriC* — точка, с которой начинается репликация хромосомы. Каждая единица транскрипции раскрашена в свой цвет. Гены рРНК показаны на внутреннем кольце; их три, но каждый ген представлен семью копиями, так что имеется 7 повторов по три гена в каждом. Синтез каждого компонента рибосомы регулируется в соответствии с синтезом остальных 54 ее компонентов.

синтез закодированного в мРНК белка. Особые короткие нуклеотидные последовательности мРНК служат сигналами начала и окончания трансляции. После того как рибосома связалась с мРНК, последовательность нуклеотидов мРНК «считывается» по три нуклеотида. Каждая тройка нуклеотидов (кодон) кодирует одну аминокислоту в цепи белка. Молекулы транспортных РНК (в отличие от мРНК они сравнительно короткие) выполняют роль крючка при присоединении аминокислот к растущей цепи белка. Каждая транспортная РНК (тРНК) специфична только для одной аминокислоты. Три последовательных нуклеотида в тРНК комплементарны кодону — они «узнают» его и связываются с ним, когда мРНК находится в комплексе с рибосомой. В то же самое время аминокислота, имевшаяся на другом конце тРНК, присоединяется к концу удлиняющейся полипептидной цепи. Когда рибосома сдвигается к следующему кодону, эта тРНК отделяется и ее заменяет другая — комплементарная следующему кодону.

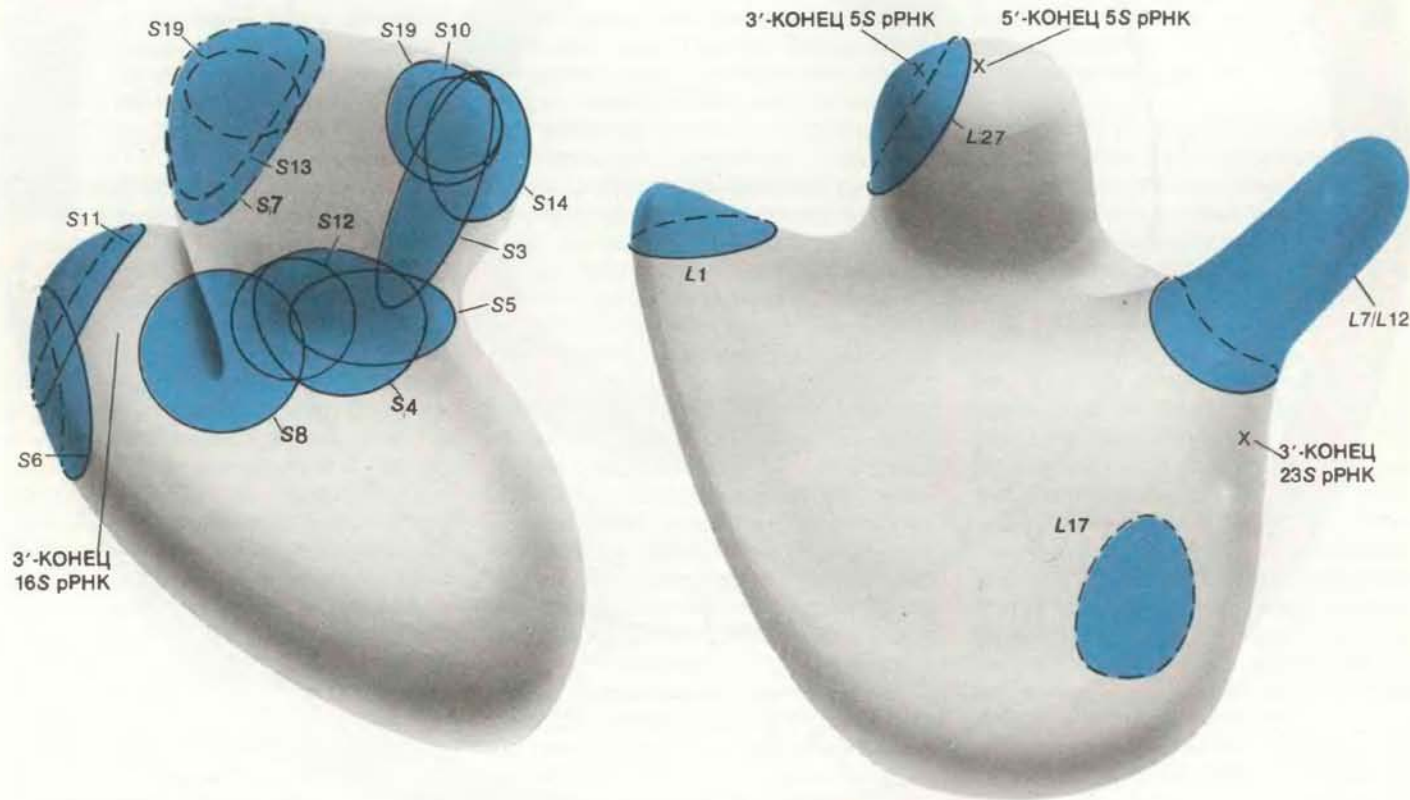
КАКИЕ же генетические процессы управляют синтезом рибосом в бактериальной клетке? Лучше всего изучены на сегодняшний день рибосомы *E. coli*, и в отношении них картина в целом уже довольно ясная.

Как и другие бактерии, *E. coli* относится к прокариотам; это означает, что у нее нет четко выраженного ядра. В прокариотических клетках транскрипция и трансляция тесно сопряжены. Очень часто рибосомы начинают транслировать мРНК еще до того, как завершится ее транскрипция и она высвободится из комплекса с ДНК. По окончании транскрипции мРНК трансляция продолжается. Однако, как правило, срок жизни мРНК невелик — всего несколько минут, после чего она быстро деградирует под действием определенных ферментов. За это время кодирующая последовательность успевает протранслироваться в среднем 10—20 раз. Таким образом, на одной молекуле мРНК образуется несколько молекул белка. Количество синтезированных полипептидных цепей зависит от времени жизни мРНК и скорости

трансляции. Многоклеточные организмы, в том числе и человек, относятся к эукариотам: их клетки имеют четко выраженное ядро, отделенное от окружающей цитоплазмы ядерной мембраной. В эукариотических клетках транскрипция происходит в ядре, а затем мРНК транспортируется в цитоплазму, где и осуществляется трансляция; сборка рибосом происходит в ядрышках — особых органеллах, расположенных в ядре клетки.

Каждая рибосома *E. coli* состоит из двух субчастиц разной формы и размера: 30S- и 50S-субчастицы. (S — это сокращенное обозначение единиц Сведберга, в которых выражают коэффициент седиментации, являющийся мерой скорости оседания частиц при высокоскоростном центрифугировании и характеризующий размер частиц.)

В состав 30S-субчастицы, меньшей из двух рибосомных субчастиц, входит одна молекула РНК — 16S-рибосомная РНК, состоящая из 1542 нуклеотидов. Кроме РНК, в состав субчастицы входят белки — по одной молекуле 21 типа. Белки обозначают S1, S2, ..., S21



СУБЧАСТИЦЫ РИБОСОМЫ. Каждая субчастица состоит из белков и РНК. Слева малая субчастица 30S, в нее входит по одной копии 21 разного белка. Справа большая субчастица 50S; она содержит 34 белковые молекулы: по одной копии 30 белков и 1 белок в четырех копиях. Цветом отмечены места связывания антител против того или иного рибосомного белка, т.е. в этих участках белки выходят на поверхность рибосомы. В состав малой субчастицы входит одна молекула РНК, в состав большой — две. Крестиками обозначена локализация концов рРНК на поверхности субчастиц. Слева внизу изображена целая рибосома. (По данным М. Номуры, Л. Кахана, У. Стричарза и Дж. Лейка, Калифорнийский университет.)

(здесь S обозначает уже не единицы Сведберга, а принадлежность белка малой субчастице — от английского «small» — малая). Одна молекула РНК и 21 молекула белков образуют частицу сложной формы с молекулярной массой 900 тыс. дальтон.

В большой 50S-субчастице содержатся две разные РНК: 23S рРНК и 5S рРНК, которые состоят соответственно из 2904 и 120 нуклеотидов. Кроме них в состав большой субчастицы входят 34 молекулы белка, которые обозначаются L1, L2, ..., L34 (L — от английского «large» — большая). Среди этих 34 белков не все разные, а только 31: один из белков присутствует в количестве четырех копий, а остальные представлены только одной копией. Однако по традиции, начавшейся с не совсем точных ранних работ, рибосомные белки нумеруются от L1 до L34. При ассоциации белков и двух рРНК образуется большая субчастица рибосомы, имеющая форму сплюснутой сферы с несколькими нерегулярными выступами на поверхности. Молекулярная масса большой субчастицы равна 1,6 млн. дальтон.

Вместе 30S- и 50S-субчастицы составляют функционально активную рибосому, молекулярная масса которой 2,5 млн. дальтон, а коэффициент седиментации 70S (коэффициент седиментации целой рибосомы не равен сумме коэффициентов седиментации ее субчастиц, так как скорость оседания частицы при центрифугировании зависит от ее формы). В функционирующей рибосоме между большой и малой субчастицами имеется своего рода щель, в которой во время трансляции располагаются мРНК и ферменты.

ПЕРВЫЕ измерения содержания рибосом в клетке основывались на определении количества РНК на разных стадиях роста и деления клеток. В конце 50-х годов О. Маалу, Н. Кьельдгаад и их коллеги в Государственном институте сывороток (Дания) и позже в Институте микробиологии Копенгагенского университета изучали клеточное содержимое бактерий *Salmonella typhimurium* — близких родственников *E. coli*. Выращивая сальмонеллу на различных питательных средах, они обнаружили, что существует прямая пропорциональная зависимость между скоростью деления клеток и количеством РНК в них. К этому времени уже было известно, что большая часть клеточной РНК приходится на долю рибосомной РНК, так что, измеряя содержание РНК, эти исследователи практически определяли концентрацию рибосом в бактериальной клетке.

Последующие работы подтвердили существование прямой зависимости между скоростью роста и количеством рибосом в клетке: чем быстрее делятся



КОНЦЕНТРАЦИЯ РИБОСОМ в клетках *E. coli* (цветная кривая) увеличивается при ускорении роста и деления клеток. Чем быстрее растут бактерии, тем быстрее должны синтезироваться в них белки. А так как возможности каждой отдельной рибосомы ограничены, клетке необходимо больше рибосом. Держать постоянный запас рибосом, однако, невыгодно, поэтому нужна надежная система регуляции внутриклеточной концентрации рибосом. Концентрация белков (черная кривая) при ускорении роста клеток не увеличивается. На графике концентрации рибосом и белков даны на единицу массы бактериального генома. У быстро растущих клеток объем больше, но отношение содержания белка к ДНК остается таким же, как и в медленно растущих клетках.

бактерии, тем больше в их клетках рибосом (следует, однако, отметить, что такая пропорциональность не соблюдается при очень низких скоростях роста). На основании этого было высказано предположение, что регуляция синтеза рибосом играет ключевую роль в регуляции клеточного роста и деления. Некоторые исследователи считали даже, что скорость синтеза рибосом в бактериальной клетке — это главный лимитирующий фактор скорости роста. Как мы увидим ниже, новые факты свидетельствуют против такой гипотезы. Тем не менее работа копенгагенской школы была очень полезна, так как она вызвала интерес к регуляции биогенеза рибосом.

На протяжении 60-х и в начале 70-х годов я занимался структурой и функционированием рибосом, а также процессом их самосборки из компонентов. Обратившись к проблеме сборки, я заинтересовался еще и тем, как осуществляется регуляция синтеза многочисленных рибосомных белков и РНК. При изучении регуляции перед исследователем одновременно стоит целый ряд вопросов. Один из наиболее важных — является ли синтез компонентов сбалансированным и координированным?

Под сбалансированностью синтеза я подразумеваю, что компоненты синтезируются в той же пропорции, в какой они содержатся в конечном продукте. В качестве простой аналогии представьте промышленное производство

некоего изделия, состоящего из двух деталей. Если нужно выпустить 50 изделий, необходимо сначала изготовить по 50 деталей каждого вида, а затем собрать их. Если считать, что по ходу дела детали не портятся, то после сборки 50 изделий процесс остановится из-за отсутствия обеих исходных деталей. Такой путь синтеза я и называю сбалансированным.

Под координированной регуляцией я понимаю такой процесс, когда при уменьшении или увеличении скорости синтеза конечного продукта соотношение синтезируемых компонентов остается постоянным. Вернемся к рассмотренной только что модели сбалансированного производства: координированная регуляция означает, что при необходимости выпуска не 50, а 100 изделий должно быть произведено ровно по 100 штук его деталей.

Итак, насколько сбалансирован и координирован синтез 52 рибосомных белков: пропорционально ли содержание этих белков в клетке в любой момент времени их содержанию в рибосоме? Не менее важен вопрос о координированности и сбалансированности синтеза рибосомных РНК и синтеза рибосомных белков. Эти вопросы вовсе не бессмысленны, так как нельзя заранее исключить и возможность несбалансированного пути синтеза, когда один или несколько компонентов производятся в избытке и избыточные молекулы подвергаются ферментативной деградаци.

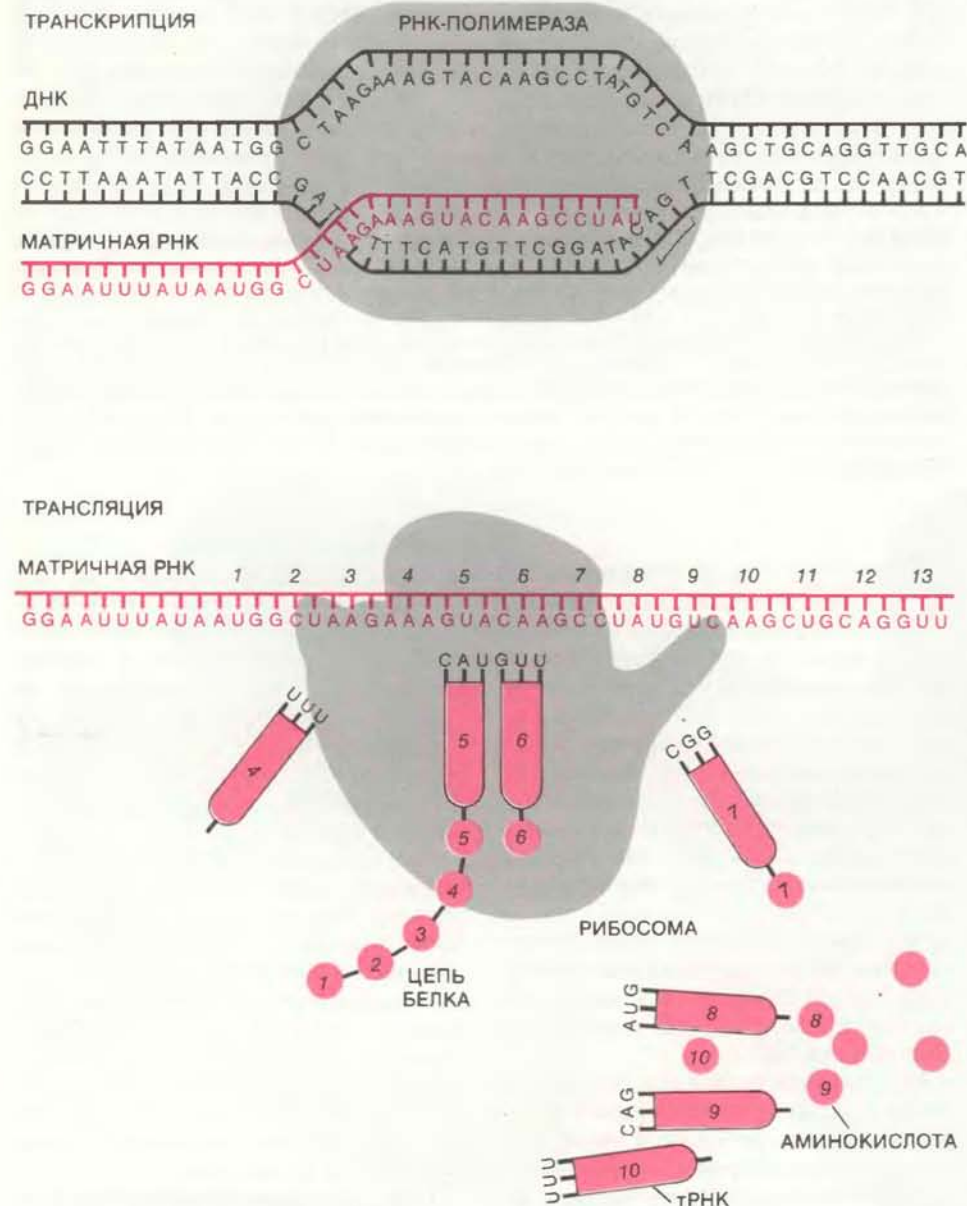
ПЕРВЫМ объектом исследования стали рибосомные белки. Примерно в то время, когда началось изучение проблемы регуляции, Е. Кальтшмидт и Х.-Г. Виттман из Института молекулярной генетики им. Макса Планка в Западном Берлине разработали простой метод разделения практически всех рибосомных белков. Этот метод, а также другие, предложенные позже, позволили исследовать синтез индивидуальных рибосомных белков при различных скоростях роста клетки.

В 1974 г. П. Деннис в моей лаборатории в Висконсинском университете в Мадисоне применил новые методы разделения рибосомных белков для изучения их биосинтеза. Он показал, что скорости синтеза большинства белков сбалансированы между собой и что регуляция скоростей синтеза осуществляется координированно в ответ на изменение состава питательной среды, в которой росли клетки. Зная это, мы могли уже впрямую заняться проблемой регуляции.

С самого начала для меня было очевидно, что изучение биосинтеза рибосом на молекулярном уровне малопродуктивно без выявления генов рибосомных белков и рибосомных РНК. Выделив эти гены, их можно было бы использовать для синтеза рРНК и рибосомных белков *in vitro* (т.е. «в пробирке») в бесклеточной системе. Имея такую систему искусственного синтеза, вполне реально с помощью биохимических методов определить степень экспрессии индивидуальных генов и понять механизм ее регуляции. Однако выделение генов 55 рибосомных компонентов оказалось довольно сложной задачей и заняло много времени. Методы рекомбинантных ДНК тогда еще не были разработаны, и приходилось опираться только на методы классической генетики.

Работа строилась в основном на манипулировании с бактериофагом λ — вирусом, заражающим бактерии. При инфекции вирусная ДНК встраивается в хромосому клетки, после чего фаг может мирно сосуществовать с бактерией довольно долго. Однако под влиянием некоторых факторов, например при повреждении клеточной ДНК вследствие облучения ультрафиолетом, фаг подавляет нормальную деятельность генетического аппарата клетки и начинается воспроизведение вирусных частиц.

Прежде всего ферменты вырезают фаговую ДНК из хромосомы. Иногда этот процесс протекает недостаточно точно и вместе с фаговой ДНК вырезаются куски бактериальной хромосомы, непосредственно прилежащие к ней. Вырезанная ДНК далее включается в новые фаговые частицы. Если в вирусную частицу попала фаговая ДНК, «прихватившая» хромосомные участки, то фаг может перенести (транслировать) эти куски бактериальной ДНК в другие клетки. К тому времени, как начались исследования рибосомных генов, уже были получены данные о том, что гены многих рибосомных белков сгруппированы в одном определенном участке бактериальной хромосомы. Заманчиво было попытаться транслировать этот участок с помощью фага.



ТРАНСКРИПЦИЯ И ТРАНСЛЯЦИЯ — основные биосинтетические процессы. При транскрипции (*вверху*) образуется РНК — копия генетической информации, хранящейся в ДНК. В состав ДНК входят четыре типа нуклеотидов: аденин, гуанин, цитозин и тимин (А, G, C, T). В РНК вместо тимина содержится урацил (U). А комплементарен (т.е. может образовывать связь) только Т или U, а G — только C. При транскрипции фермент РНК-полимераза связывается с бактериальной хромосомой и временно разъединяет цепи двойной спирали ДНК. Одна из цепей служит ферменту матрицей, по которой он строит комплементарную ей цепь РНК — матричную или рибосомную. Трансляция (*внизу*) — это последовательное соединение аминокислот в молекулу белка согласно информации, закодированной в мРНК. Каждая тройка нуклеотидов мРНК (кодон) кодирует одну аминокислоту. В молекуле транспортной РНК (тРНК) имеется антикодон — тройка нуклеотидов, комплементарная кодону. Каждая тРНК специфична только для одной аминокислоты. Рибосома движется по мРНК, «считывая» один за другим кодоны. Антикодон тРНК связывается с кодоном мРНК, а аминокислота, которую несет тРНК, присоединяется к растущей цепи белка. Когда рибосома сдвигается к следующему кодону, эта тРНК выбрасывается, а ее место занимает следующая.

В 1974 г. С. Яскунасу, Л. Линдалю и мне удалось встроить фаг в бактериальную хромосому вблизи кластера генов рибосомных белков. Затем мы выделили несколько фагов, содержащих один или несколько из этих генов. Число рибосомных генов в фаговых частицах сильно варьировало; один из фагов содержал гены целых 27 рибосомных белков — более половины полного белкового набора. Важность нашей работы, ставшей первым большим успехом в изучении регуляции биосинтеза рибосомы, заключалась в

том, что она открывала возможность иметь «в пробирке» систему для изучения регуляции синтеза отдельных компонентов рибосомы. С тех пор в моей и других лабораториях были выделены гены рибосомных белков и из иных участков бактериальной хромосомы.

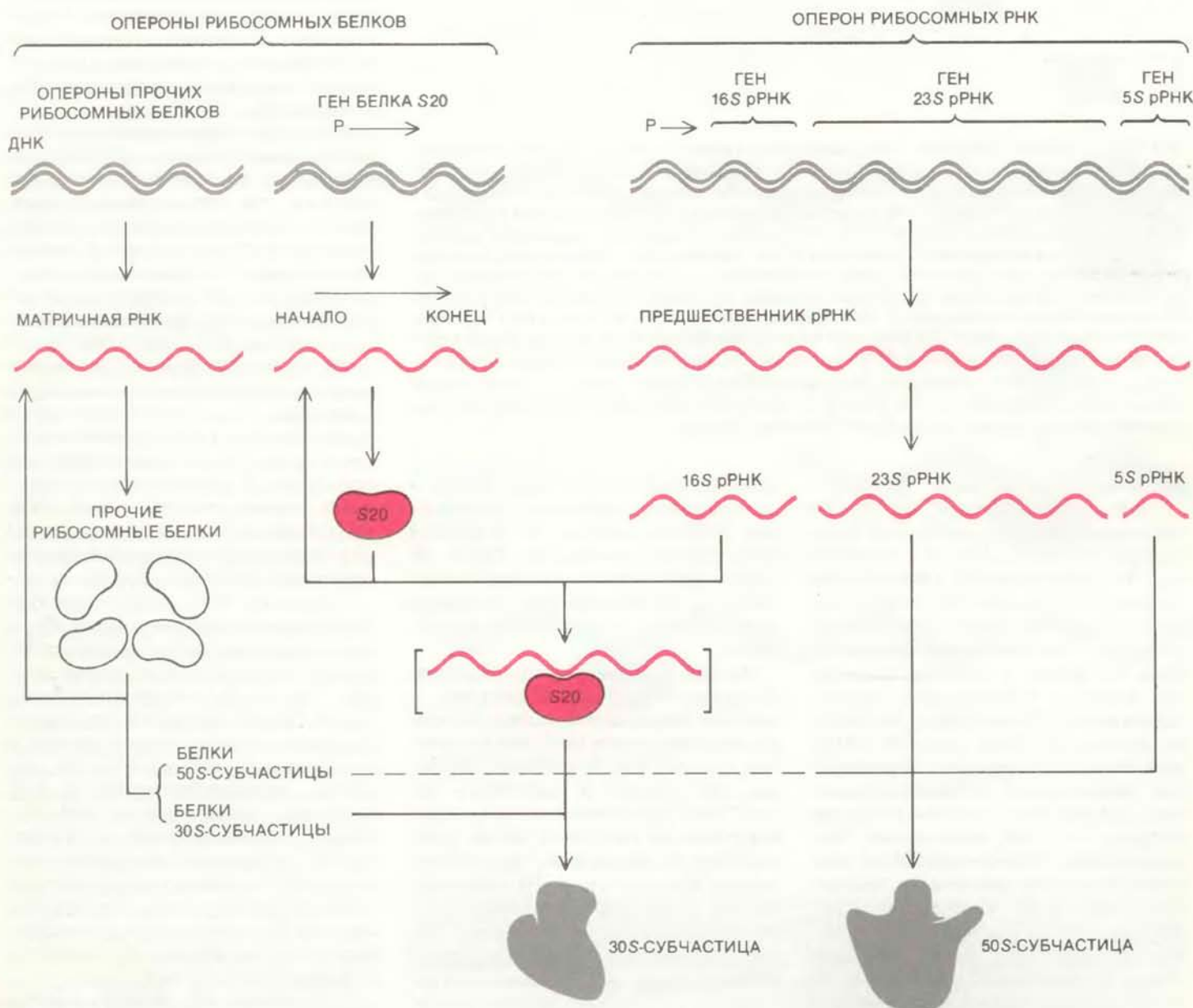
Пока полным ходом шло изучение генов рибосомных белков, не были забыты также гены рибосомных РНК. Ими занялись Н. Дэвидсон и его сотрудники в Калифорнийском технологическом институте, а также исследователи из ряда других лабораторий, в том числе моей. В отличие от генов рибосомных белков, которые имеются в клетке в единственном экземпляре, набор генов для трех рибосомных РНК

представлен на бактериальной хромосоме в семи копиях. В каждый такой набор входят гены всех трех рРНК, которые сначала транскрибируются в виде единой молекулы РНК, из которой потом вырезаются последовательно субстраты 16S, 23S и 5S рРНК. К 1977 г. были выделены все семь повторов генов рРНК и велась работа по определению их нуклеотидной последовательности.

После того как удалось выделить гены рибосомных РНК и большинства рибосомных белков, можно было уже напрямую заняться вопросом о том, как осуществляется сбалансированная и координированная регуляция синтеза всех рибосомных компонентов. Тогда наиболее общепринятым представле-

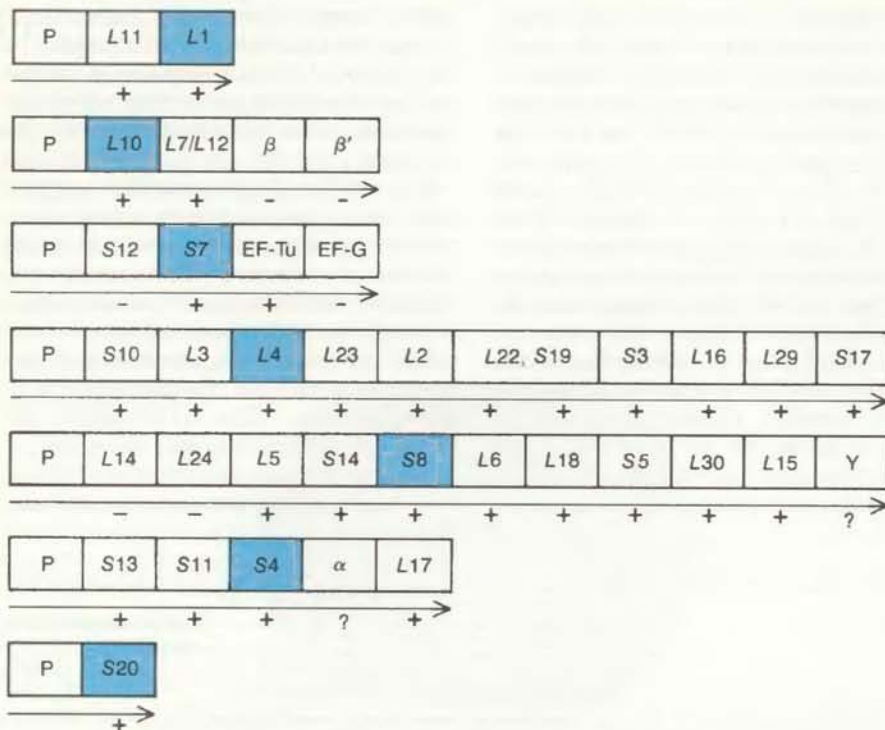
нием о генетической регуляции была теория, разработанная в начале 60-х годов Жаком Моно и Франсуа Жакобом из Пастеровского института в Париже для объяснения метаболизма лактозы у *E. coli*.

Клетки *E. coli* могут использовать в качестве источника углерода несколько различных веществ, в том числе сахара лактозу и глюкозу. Для утилизации лактозы необходима активность фермента β -галактозидазы. Если *E. coli* выращивать на среде, содержащей лактозу, то в клетках обнаруживается β -галактозидаза. Для утилизации же глюкозы β -галактозидаза не нужна, и при выращивании бактерий на среде с глюкозой β -галактозидазы в клетках



СИСТЕМА ОБРАТНОЙ РЕГУЛЯЦИИ позволяет рибосомному белку S20 регулировать синтез самого себя. Гены рибосомных белков транскрибируются группами — оперонами. Оперон — это участок ДНК, включающий в себя один или несколько генов и транскрибирующийся как одно целое. В опероне есть промотор — последовательность нуклеотидов, с которой начинается транскрипция. Ген белка S20 представляет собой оперон и имеет свой промотор (обозначен

буквой P). Набор из генов трех рибосомных РНК также является опероном; все три рРНК синтезируются в виде единого предшественника, который потом разрезается на отдельные рРНК. Белок S20 при сборке рибосомы связывается с 16S рРНК и включается в 30S-субчастицу. Пока есть свободные 16S рРНК, синтез S20 продолжается. Когда запас 16S рРНК исчерпан, избыточные молекулы S20 взаимодействуют с собственной мРНК и ее трансляция прекращается.



РЕПРЕССОР ТРАНСЛЯЦИИ — это рибосомный белок, который может останавливать синтез самого себя, а в некоторых случаях и других рибосомных белков. Он может связываться с мРНК — копией своего собственного оперона, что приводит к прекращению трансляции. На рисунке каждый ряд прямоугольников изображает один оперон рибосомных белков. Репрессоры трансляции выделены цветом. Транскрипция начинается с промотора (P), ее направление обозначено стрелкой. Синтез белков, гены которых отмечены знаком «+», ингибируется репрессором. Не все рибосомные белки регулируются таким способом. Например, синтез белка S12 не ингибируется белком S7. По-видимому, белки S12, L14 и L24 могут останавливать свой синтез сами. То есть внутри оперона может быть больше одной группы регуляции. В рибосомные опероны входит также несколько генов, продукты которых не являются рибосомными компонентами. Белки α , β и β' — это субъединицы РНК-полимеразы, EF-Tu и EF-G — факторы элонгации, необходимые при синтезе белков, белок Y важен для секреции белков.

синтезируется очень мало.

Моно и Жакоб показали, что для метаболизма лактозы важны три гена, один из которых — ген β -галактозидазы. Эти гены образуют генетическую единицу, называемую лактозным опероном, или *lac*-опероном. Они расположены на бактериальной хромосоме один за другим и транскрибируются все вместе с образованием единого транскрипта. Транскрипция *lac*-оперона начинается после того, как РНК-полимераза связывается с определенной нуклеотидной последовательностью, находящейся на одном из концов оперона, — с так называемым *lac*-промотором. Вблизи промотора расположена группа нуклеотидов, называемая оператором. С оператором может связываться белок, носящий название *lac*-репрессора. Когда репрессор связан с оператором, полимеразы не может присоединиться к промотору и транскрипция *lac*-оперона не происходит. Такая ситуация имеет место, когда в клетке нет лактозы. Стоит появиться молекулам лактозы, они быстро модифицируются, и одна из модифицированных форм лактозы выступает как индуктор: взаимодействуя с репрессором, она делает невозможным

его связывание с оператором. В результате промотор становится доступным для РНК-полимеразы и начинается транскрипция *lac*-оперона. Таким образом, присутствие лактозы служит сигналом для включения *lac*-оперона, а ее отсутствие — сигналом для выключения.

Модель оперона хорошо объясняла регуляцию метаболизма лактозы, и поэтому большинство исследователей сосредоточили свое внимание на изучении прямой, или позитивной, регуляции транскрипции. К концу 60-х — началу 70-х годов большинство моделей изученных регуляторных систем основывалось на механизмах, аналогичных модели Жакоба и Моно. Не удивительно, что, когда началось изучение системы контроля рибосомных генов, к ним тоже попытались применить теорию оперона.

ПЕРВЫМ шагом в решении вопроса о том, в какой мере модель оперона применима к рибосомным генам, было выявление в них единиц транскрипции и промоторов. Было уже установлено, что гены рибосомных РНК собраны в семь групп, каждая из которых представляет собой оперон, или транскрип-

ционную единицу. В моей лаборатории исследования сосредоточились на генах рибосомных белков. Вскоре мы обнаружили, что в основном кластере генов рибосомных белков они организованы в несколько оперонов. В состав каждого оперона входят гены одного или более рибосомных белков, которые транскрибируются совместно с одного промотора. Каждый оперон транскрибируется независимо от других.

Знание функциональной организации генов рибосомных белков позволило сформулировать гипотезу об их регуляции. Эта гипотеза следовала модели оперона и основывалась на позитивном контроле транскрипции. Предполагалось, что все опероны рибосомных белков могут регулироваться одними и теми же химическими соединениями — индукторами и репрессорами. В присутствии индуктора одновременно «включаются» все опероны, а в его отсутствие они также одновременно «выключаются».

Если верно предположение, что все рибосомные опероны отвечают на один и тот же сигнал, то следовало ожидать, что промоторные и операторные последовательности разных оперонов довольно похожи. Сходство промоторов и одновременность их ответа на действие универсального индуктора объясняли бы координированность синтеза рибосомных белков.

Теория оперона была сформулирована для нескольких прилегающих друг к другу генов, но в принципе она годится и для объяснения работы генов, отстоящих друг от друга на бактериальной хромосоме. И действительно, впоследствии нашлись примеры такой сложной оперонной системы, в частности для генов, активизирующихся при повреждении хромосомы *E. coli*.

Однако для того, чтобы экспрессию рибосомных генов можно было объяснить с помощью теории оперона, необходимо было принять некоторые условия. Так, чтобы синтез рибосомных белков был сбалансирован, транскрипция всех их оперонов должна протекать с одинаковой эффективностью; все мРНК, транскрибированные с этих оперонов, должны иметь приблизительно одинаковое среднее время жизни; все кодирующие последовательности в мРНК должны транслироваться с одинаковой скоростью. При нарушении хотя бы одного из этих условий рибосомные белки будут синтезироваться в разных количествах.

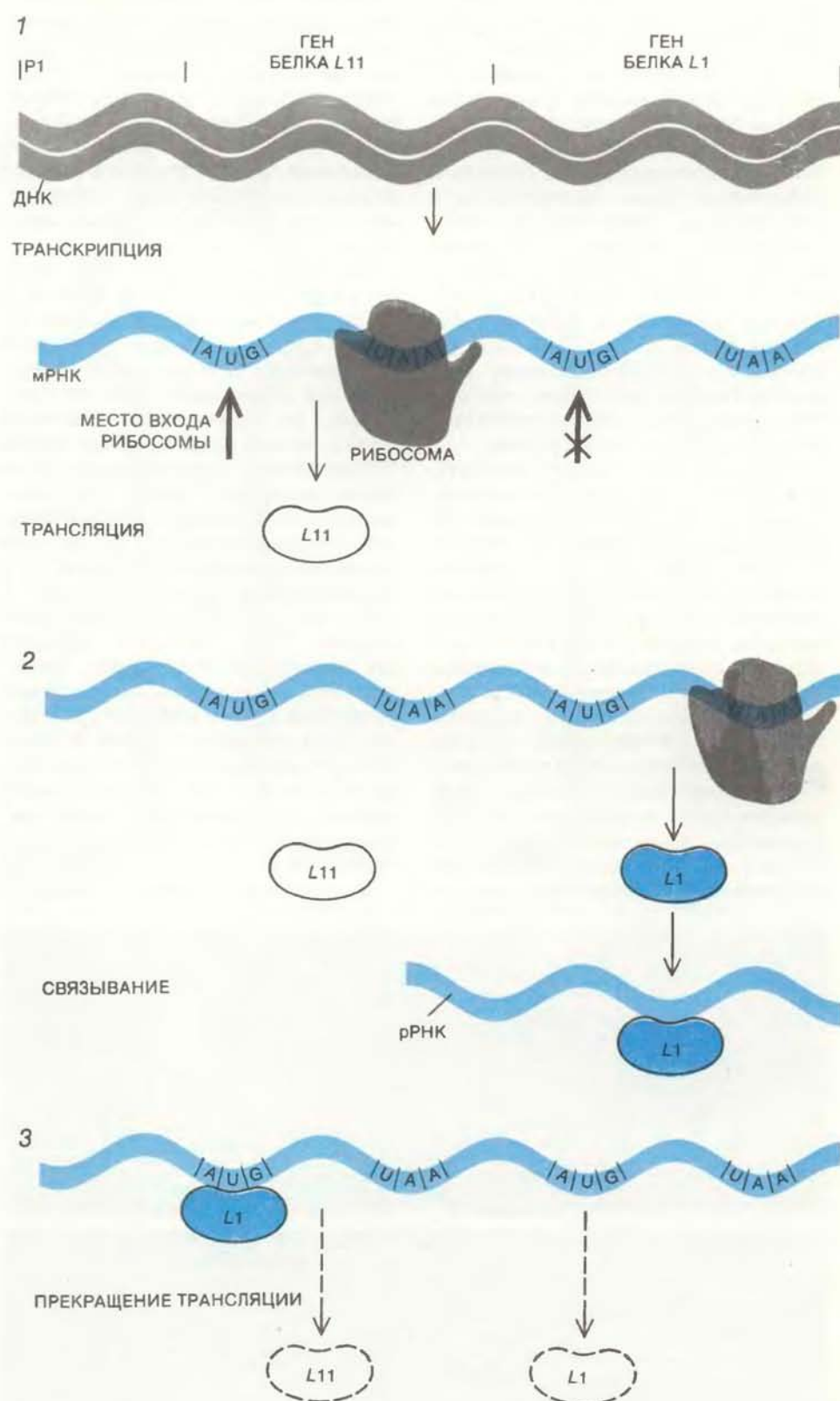
Есть данные, что скорость синтеза рРНК и рибосомных белков примерно одинакова, по крайней мере в здоровых, быстро растущих клетках. В свете модели оперона следовало предположить, что промоторы оперонов рРНК должны быть похожи на промоторы оперонов рибосомных белков, иначе невозможна регуляция одними и теми

же эффекторами и, следовательно, координированность их работы. Кроме того, так как рРНК транскрибируется непосредственно с ДНК, а белки образуются при трансляции матричных РНК, могущих транслироваться многократно, эффективность промоторов оперонов рРНК должна быть выше эффективности белковых промоторов настолько, чтобы обеспечивать в клетке эквивалентные количества обоих рибосомных компонентов. Несмотря на сложность, эти теоретические условия представлялись выполнимыми. В любом случае модель оперона была хорошей отправной точкой.

Указанием на справедливость теории оперона в применении к рибосомным генам было бы сходство между собой промоторов всех рибосомных оперонов при их отличии от остальных клеточных промоторов. К счастью, к тому времени, когда удалось выделить рибосомные гены и их промоторы, в руках исследователей уже были две новые мощные методики для определения нуклеотидной последовательности ДНК: одна из них была разработана под руководством Ф. Сэнгера в Лаборатории молекулярной биологии Комитета по медицинским исследованиям (Кембридж), а вторая была предложена А. Максамом и У. Гилбертом из Гарвардского университета. В моей лаборатории с помощью этих новых методов были определены полные нуклеотидные последовательности пяти промоторов оперонов рибосомных белков (это сделал выпускник университета Л. Пост), а также промоторов двух разных оперонов рибосомных РНК (работа Г. де Боера и С. Гилберта). В других лабораториях установили последовательности промоторов остальных оперонов рРНК.

ОКАЗАЛОСЬ, однако, что по первичной структуре рибосомные промоторы не имеют общих черт, отличающих их от остальных промоторов прокариот. Это открытие шло вразрез с предположением о том, что координированность и сбалансированность экспрессии рибосомных генов достигается по оперонному механизму. Поскольку позитивная регуляция рибосомных генов оказалась под сомнением, оставались возможными два альтернативных механизма: либо в клетке синтез рибосомной РНК регулируется непосредственно, а синтез рибосомных белков контролируется уже содержанием рРНК в клетке, либо имеет место обратная ситуация — непосредственная регуляция синтеза рибосомных белков, от содержания которых зависит синтез рРНК.

Оперонов рибосомных белков в клетке много, поэтому второй вариант имел те же недостатки, что и теория оперона: необходимо было предпола-



ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНАЯ ТРАНСЛЯЦИЯ и обратная регуляция на уровне трансляции обеспечивают сбалансированность синтеза рибосомных белков. В оперон L11—L1 входят промотор, ген белка L11 и ген белка L1 (1). Каждая кодирующая последовательность на мРНК начинается тройкой нуклеотидов AUG, которая служит сигналом начала трансляции. На конце кодирующей последовательности всегда имеется тройка UAA — сигнал остановки трансляции. Трансляция матричной РНК L11—L1 может начаться только с иницирующего кодона последовательности L11, перед которой есть место входа рибосомы, и лишь по завершении трансляции участка L11 начинается трансляция L1, так что на одну молекулу белка L11 образуется одна молекула L1 (2). Белок L1 связывается со свободной 23S рРНК. Когда запас 23S рРНК кончается, белок L1, являющийся репрессором трансляции, связывается с мРНК L11—L1 около места входа рибосомы и трансляция мРНК прекращается (3). Таким образом, пока идет трансляция, белки L11 и L1 образуются в эквивалентном количестве, а репрессия трансляции приводит к остановке синтеза обоих белков.

гать существование множества промоторов с одинаковой структурой, что, как уже отмечалось, было маловероятно. Первый путь казался больше похожим на правду. В самом деле, складывалась довольно простая картина регуляции биосинтеза рибосом. Допустим, рибосомные белки синтезируются в чуть большем количестве, чем рибосомная РНК. Тогда скорость синтеза рибосом будет определяться количеством в клетке рибосомных РНК. Находящиеся в некотором избытке рибосомные белки могли бы служить репрессорами, ограничивающими свой синтез. Разумно было думать, что контроль синтеза рибосомных белков происходит на уровне транскрипции.

Первыми попытались выяснить, действительно ли синтез рибосомных белков регулируется по принципу обратной связи, мои коллеги А. Фэллон, С. Джинкс-Робертсон, Дж. Стричарз и я. Целью было более строго проверить оперонную гипотезу. Если сбалансированность синтеза рибосомных белков основана на идентичности рибосомных промоторов и индукторов (или репрессоров), то введение в клетку дополнительных копий какого-либо оперона рибосомного белка вместе с его промотором должно вывести систему из равновесия: белок, кодируемый дополнительно введенным геном, будет синтезироваться в большем количестве, чем остальные рибосомные белки. Если же

сбалансированность и координированность синтеза обеспечиваются механизмом обратной регуляции, то увеличение «дозы гена» не должно существенно влиять, так как избыточный продукт будет «выключать» дополнительный ген и его промотор наравне со своим клеточным геном; в этом случае синтез рибосомных белков останется сбалансированным.

Дополнительные копии генов некоторых рибосомных белков вводили в клетку *E. coli* в составе бактериофага λ либо в составе плазмиды — короткой кольцевой ДНК, не связанной с бактериальной хромосомой. Как уже говорилось, фаг, попав в бактериальную клетку, может какое-то время мирно сосуществовать с ней; плазмиду также можно внедрить в клетку. При этом дополнительные копии генов рибосомных белков, находящиеся на фаге или на плазмиде, экспрессируются наряду с хромосомными генами. «Поселив» в клетку фаг или плазмиду с геном рибосомного белка, измеряли скорости транскрипции и трансляции. Оказалось, что, хотя скорость транскрипции матричной РНК для данного рибосомного белка возрастала пропорционально числу введенных копий его гена, скорость синтеза самого белка не изменялась: он образовывался в количестве, эквивалентном всем остальным рибосомным белкам.

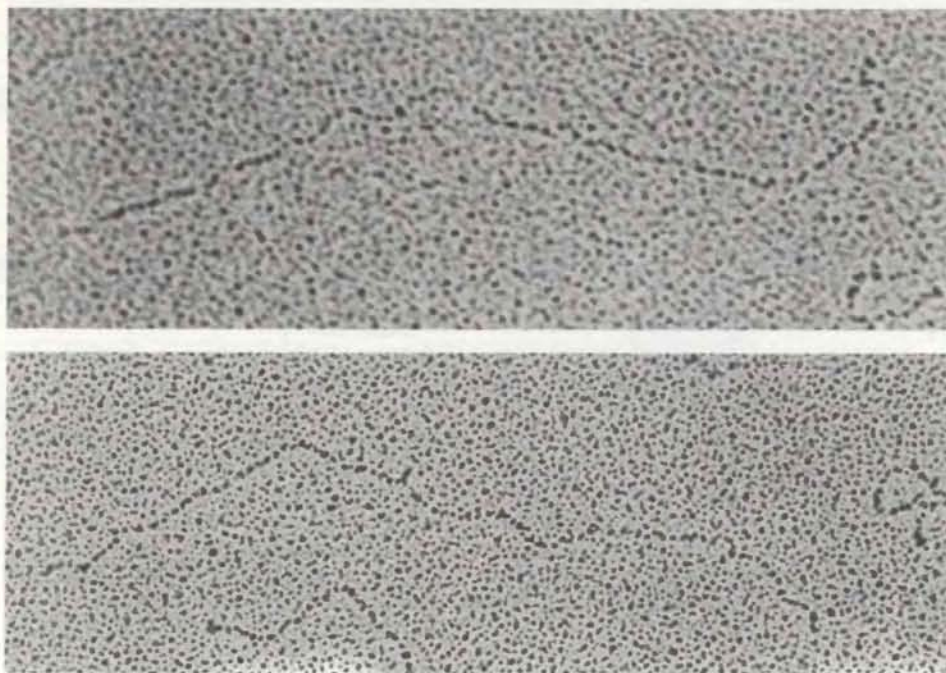
Эти результаты свидетельствовали в

пользу механизма регуляции по принципу обратной связи. Но действовал этот механизм не на уровне транскрипции, как предполагалось, а на уровне трансляции. Вообще-то уже были данные о возможности генетической регуляции на уровне трансляции. Но для приверженцев теории регуляции транскрипции наши результаты оказались полной неожиданностью. Многократно повторив эти эксперименты и убедившись в верности выводов, мы предложили для объяснения сбалансированности синтеза рибосомных белков модель обратной регуляции на уровне трансляции. Сходную работу одновременно с нами проделали Д. Гейл и А. Бёк в Регенсбургском университете, а также Н. Финл и П. Деннис в Институте микробиологии Копенгагенского университета (в настоящее время Деннис — сотрудник Университета Британской Колумбии). Их результаты также укладывались в гипотезу об обратной регуляции на уровне трансляции.

По этой гипотезе свободные (т.е. не связанные с рибосомной РНК) рибосомные белки служат ингибиторами трансляции собственной мРНК. Таким образом, синтез рибосомных белков сопряжен со сборкой рибосом. Пока идет сборка рибосом, т.е. пока рибосомные белки связываются с рибосомной РНК, свободных рибосомных белков в клетке нет и мРНК продолжает транслироваться. Когда в клетке не остается свободной рРНК, рибосомные белки накапливаются и останавливают трансляцию своих собственных мРНК.

Прямое подтверждение справедливости такого механизма было получено в опытах *in vitro* Дж. Йетсом в моей лаборатории в 1979 г. Йетс смешивал ДНК, кодирующую рибосомные белки, с рибосомами, РНК-полимеразой и другими ферментами, необходимыми для транскрипции и трансляции, добавлял в эту систему меченные радиоактивным изотопом аминокислоты и наблюдал за синтезом белков (новосинтезированные белки выявлялись благодаря тому, что именно в них включалась радиоактивная метка).

Большинство рибосомных белков уже было выделено в индивидуальном состоянии, что позволяло проверить, какой эффект они имеют. Оказалось, что, если добавить к реакционной смеси небольшое количество того или иного рибосомного белка, действительно наблюдается ингибирование трансляции мРНК рибосомных белков. Не все рибосомные белки обладали этим свойством, однако если белок имел ингибирующий эффект, то он прекращал не только свой синтез, но и синтез нескольких других рибосомных белков. Причем всегда репрессия затрагивала те белки, гены которых находились в том же опероне, что и ген белка-



МОЛЕКУЛЫ РНК в условиях, препятствующих образованию двуспиральных структур. Вверху электронная микрофотография 16S рРНК. Если к 16S рРНК был добавлен белок S8, который является репрессором трансляции, то примерно в середине цепи РНК остается короткий двуспиральный участок (внизу). Белок S8 (его не видно) связан с этим участком. Благодаря тому что белок S8 способен образовывать комплекс с 16S рРНК и с мРНК своего собственного оперона, работает механизм обратной регуляции. (Электронные микрофотографии получены М. Биром из Университета Джона Гопкинса, Т. Коллером из Швейцарского государственного технологического института и сотрудниками лаборатории автора в Висконсинском университете в Мадисоне.)

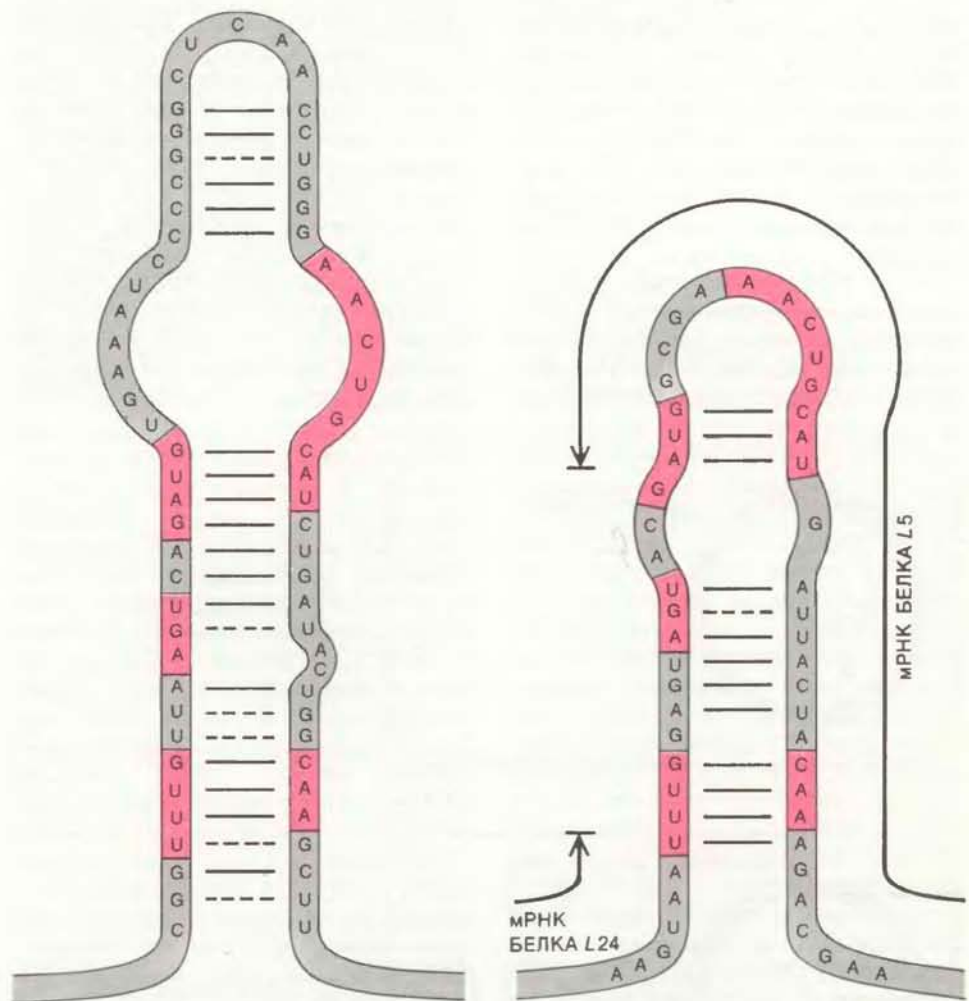
ингибитора. (Такой белок-ингибитор называют репрессором трансляции в отличие от репрессора транскрипции в классической модели оперона.) Так, например, если в реакционную смесь добавляли белок S4, то он останавливал не только свою собственную трансляцию, но также трансляцию белков S13 и S11, а эти три белка находятся в одном опероне. Белок L1 ингибирует не только свой синтез, но и синтез белка L11, который входит в ту же транскрипционную единицу. В то же время присутствие белка L1 никак не влияет на синтез белков S4, S11 и S13, а S4 не влияет на трансляцию белков L1 и L11.

Было сразу однозначно доказано, что белки S8, S4 и L1 следует считать репрессорами трансляции. Вскоре в моей лаборатории было обнаружено, что этим свойством обладают также белки S7 и L4. Практически одновременно Р. Фукуда в Университете г. Киото и независимо Г. Вейсбах с сотрудниками в Институте молекулярной биологии Роша показали, что и белок L10 может останавливать трансляцию собственной мРНК. По данным А. Бёка и Р. Вирта (Регенсбургский университет), белок S20 также является репрессором трансляции.

Как правило, репрессор управляет трансляцией либо всех белков в своем опероне, либо какой-то их частью. Группа белков, регулируемая одним репрессором, называется группой регуляции (или единицей регуляции). Для каждой группы регуляции существует только один репрессор. Было высказано предположение, что белок-репрессор непосредственно связывается с мРНК, транскрибированной с его оперона, и тем самым мешает рибосоме присоединиться к этой мРНК и начать трансляцию.

Одновременное ингибирование сразу нескольких белков, входящих в одну группу регуляции, может протекать по одному из двух механизмов. Либо на мРНК данной группы существует единственное место для взаимодействия с репрессором, связываясь с которым, он ингибирует трансляцию сразу всех кодирующих последовательностей, входящих в эту мРНК. Либо каждой кодирующей последовательности соответствует свой участок, и репрессор взаимодействует с несколькими участками на мРНК.

По данным Дж. Йетса, Д. Дина и Г. Бомана, в каждой группе регуляции есть только один участок для связывания с репрессором и, взаимодействуя с этим участком, репрессор одновременно останавливает трансляцию всех белков этой группы. На рибосоме трансляция мРНК группы регуляции может начаться только с одного места, так называемого места входа рибосомы. Лишь когда закончится трансляция ближайшей к нему гена, может на-



УЧАСТКИ СВЯЗЫВАНИЯ репрессора трансляции на рРНК и на мРНК очень похожи. При сборке рибосомы белок S8 образует комплекс с 16S рРНК. Он может также связываться с собственной мРНК, в этом случае он ингибирует трансляцию белков из своего оперона, начиная с белка L5. В обоих комплексах белок S8 взаимодействует с двуспиральным участком РНК. Слева изображена структура связывающего участка в 16S рРНК, справа — в мРНК. Двуспиральные участки образуются вследствие взаимодействия комплементарных нуклеотидов (сплошные черточки) и нестандартного слабого взаимодействия G и U (пунктирные черточки). Видно, что левая и правая структуры имеют много общего (одинаковые последовательности выделены цветом), благодаря этому репрессор трансляции может связываться как с той, так и с другой РНК.

чаться трансляция следующей кодирующей последовательности.

Тот факт, что трансляция происходит именно последовательно, был впервые продемонстрирован для генов рибосомных белков L1 и L11. В мРНК для группы L11 — L1 место входа рибосомы расположено в начале последовательности, кодирующей белок L11. Белок L1 начинает синтезироваться только после того, как заканчивается трансляция L11. Вероятно, синтез обоих белков осуществляется одной и той же рибосомой: кончив трансляцию первой кодирующей последовательности, она транслирует вторую, так что при движении рибосомы по матрице на каждую синтезированную молекулу белка L11 синтезируется только одна молекула L1.

Скорее всего принцип последовательной трансляции реализуется и в случае остальных групп регуляции в

оперонах рибосомных белков, синтез которых регулируется по типу обратной связи. Более того, есть данные, что этот принцип лежит в основе контроля синтеза не только рибосомных белков, причем всегда группа регуляции состоит из нескольких генов, и на мРНК трансляция кодирующих последовательностей осуществляется только поочередно, т.е. трансляция следующего гена не может начаться до завершения трансляции предыдущего.

Легко видеть, что сочетание принципа последовательной трансляции с репрессией дает возможность клетке синтезировать рибосомные белки сбалансированно и координированно по отношению к рРНК. Репрессия трансляции обеспечивает синтез белков и рРНК в эквимольных количествах: как только вся свободная рРНК исчерпывается, рибосомные белки-репрессоры связываются со своей мРНК и синтез новых

рибосомных белков останавливается. Если скорость синтеза рибосомных РНК возрастает и появляются новые свободные рРНК, то трансляция рибосомных белков «включается» вновь. Последовательность же трансляции обеспечивает то, что все рибосомные белки синтезируются в одинаковых количествах.

Когда открыли репрессию трансляции, внимание ученых, помимо всего прочего, привлекло взаимодействие между репрессором и мРНК. Важность этой проблемы становится по-

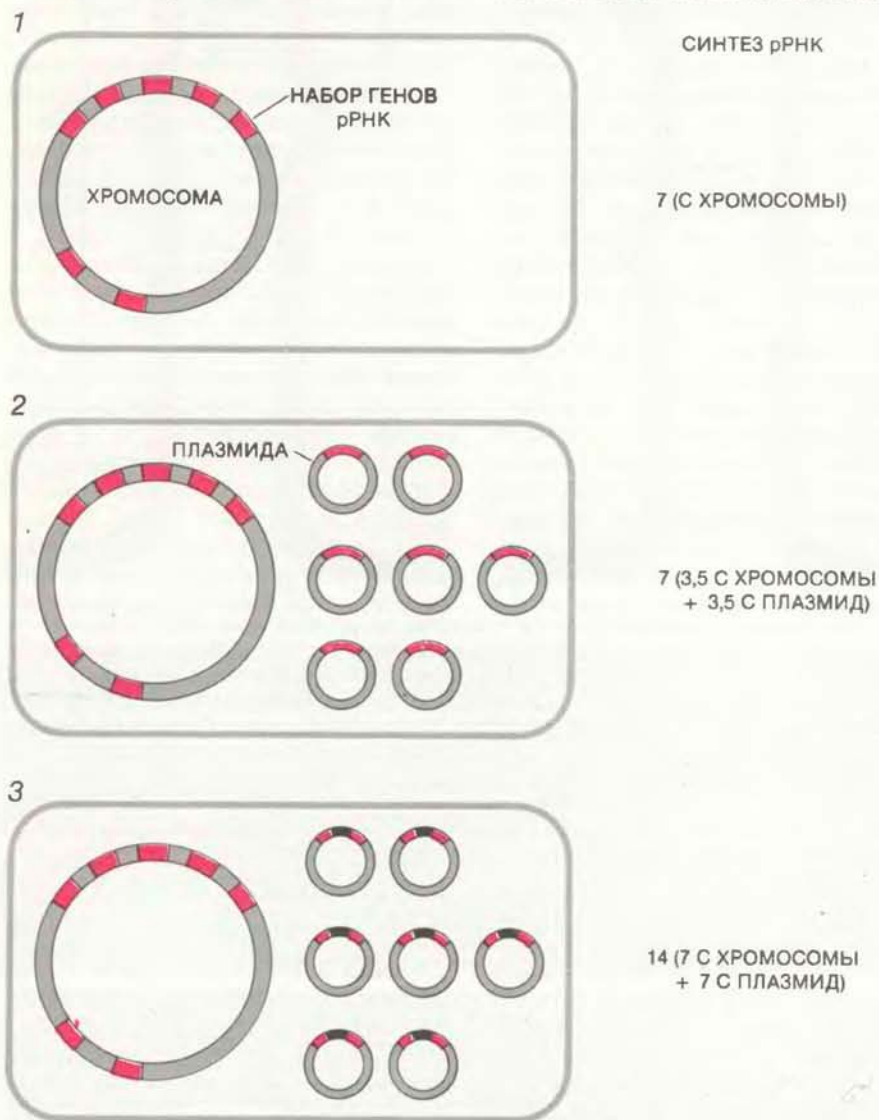
нятной, если вспомнить, что при сборке рибосомы в клетке одновременно присутствуют и свободные рРНК и мРНК рибосомных белков. Один из центральных моментов теории обратной регуляции трансляции состоит в том, что рРНК и мРНК конкурируют при связывании рибосомных белков-репрессоров. Чтобы такая конкуренция была возможна, белок-репрессор должен обладать способностью соединяться и с рРНК, и с мРНК. При исследовании сборки рибосомы стало более или менее понятно, как протекает

связывание белков с рибосомной РНК. О взаимодействии репрессора с мРНК известно было значительно меньше.

Как ни странно, по мере того как накапливались факты, новое значение приобретали и старые данные. Все рибосомные белки-репрессоры, открытые в ранних работах по биосинтезу рибосом, принадлежали к группе так называемых РНК-связывающих белков. Было известно, что *in vitro* они могут образовывать комплекс с рРНК в отсутствие всех остальных рибосомных белков. Такими взаимодействиями много занимались еще до открытия репрессии на уровне трансляции и было обнаружено, что на молекуле рРНК есть участки, которые непосредственно взаимодействуют с РНК-связывающими белками. Данные об этих участках пригодились для понимания конкуренции мРНК и рРНК за связывание рибосомных белков. Наиболее простая картина получается в том случае, если в белке-репрессоре один и тот же участок может связывать и рРНК, и мРНК. Тогда, вероятно, и участки связывания белка на рРНК и мРНК должны иметь сходную структуру.

И действительно, те участки рРНК и мРНК, которые связываются с рибосомным белком-репрессором, по крайней мере в двух отношениях оказались достаточно похожи. Во-первых, близки их нуклеотидные последовательности, а во-вторых, сходна вторичная структура цепей РНК. Между вторичной структурой РНК и ее пространственной укладкой есть соответствие. Трехмерная конфигурация РНК определяется, в частности, наличием комплементарных участков и степенью их спаренности. Те последовательности РНК, которые образуют двуспиральные структуры, могут узнаваться белком-репрессором. Сходство участков узнавания в рибосомной и матричной РНК делает возможной регуляцию по принципу обратной связи. Пока идет транскрипция рибосомных РНК, молекулы рибосомного белка-репрессора находят свое место на молекулах рРНК и связываются с ними. Когда скорость транскрипции рРНК уменьшается, создается избыток белка-репрессора. Некоторым его молекулам уже не хватает рРНК и они образуют комплекс со своей собственной мРНК, тем самым останавливая трансляцию белков, которые в ней закодированы. Так как то же самое происходит одновременно со всеми рибосомными белками-репрессорами, в отсутствие рРНК трансляция всех рибосомных белков останавливается.

Ясно, что, когда в клетке присутствуют одновременно и рРНК, и мРНК, вероятность связывания рибосомного белка с рРНК должна быть гораздо больше, чем вероятность его связывания с мРНК. Другими словами, обра-



ВТОРАЯ СИСТЕМА ОБРАТНОЙ РЕГУЛЯЦИИ у *E. coli* управляет транскрипцией рибосомных РНК. На рисунке изображена схема эксперимента, который позволил обнаружить эту систему. Три группы клеток *E. coli* выращивали на одинаковой среде. Во всех трех группах клетки синтезировали одинаковое количество рибосом. В бактериях первой группы (1) имелся только обычный набор — 7 повторов трех генов рРНК (цветные) на хромосоме. рРНК, транскрибированная с хромосомы, включалась в рибосомы. Свободные рибосомы, не вовлеченные в синтез белка, действовали как репрессоры, подавляя дальнейшую транскрипцию рРНК. В клетки второй группы (2) были введены плазмиды, несшие дополнительные наборы генов рРНК. В клетках второй группы в сумме синтезировалось столько же рРНК, сколько в первой: половина рРНК транскрибировалась с хромосомных генов, и половина — с плазмидных. Все рРНК были активны и включались в рибосомы; свободные рибосомы могли служить репрессорами транскрипции. Клетки третьей группы (3) также содержали плазмиды, но гены рРНК в них были дефектными (черные): рРНК, транскрибированная с этих плазмид, не могла включаться в рибосомы и, следовательно, не влияла на регуляцию синтеза рРНК. В результате в таких клетках синтезировалось рРНК вдвое больше, чем в клетках первой и второй групп, и лишь половина ее была активна.

зование комплекса рибосомного белка-репрессора с рРНК должно быть энергетически выгоднее, чем его связывание с мРНК. В противном случае соединение белка-репрессора со своей мРНК оставило бы сборку новых рибосом независимо от наличия в клетке свободных рРНК и обратная регуляция системы, состоящей из белка-репрессора и двух рРНК, с которыми он может взаимодействовать, была бы невозможна. То, что такая регуляция действительно имеет место, подтверждается экспериментальными данными. *In vitro* ингибирующее влияние белка L1 на синтез белков L11 и L1 можно снять, добавив в реакционную смесь некоторое количество 23S рРНК. Известно, что при сборке рибосомы белок L1 образует комплекс с 23S рРНК, а как уже говорилось, белок L1 является репрессором трансляции своего собственного оперона. Очевидно, связывание белка L1 с 23S рРНК преобладает над образованием комплекса между L1 и мРНК оперона L11 — L1.

Не исключено, что система обратной регуляции, основанная на конкуренции при образовании одного из двух возможных однотипных комплексов, — это универсальный механизм контроля синтеза тех белков, которые служат компонентами каких-либо клеточных структур или белково-нуклеиновых ассоциатов. Известен еще по крайней мере один пример регуляции такого рода.

ТАК КАК репрессия трансляции рибосомных белков зависит от присутствия в клетке рРНК, естественно поинтересоваться, как же регулируется синтез самой рибосомной РНК. Поразительной особенностью биогенеза рибосом является то, что скорость синтеза рибосом практически не зависит от состава питательной среды, на которой выращивают клетки. К примеру, клетки, растущие на среде, в которой много источников азота, но мало источников углерода, могут содержать столько же рибосом, что и клетки, выращенные на среде с большим количеством источников углерода и малым количеством источников азота. Иначе говоря, состав среды в данном случае на росте клеток не сказывается. То же самое справедливо и для многих других веществ, необходимых для роста и деления клеток.

Как уже отмечалось выше, в модели оперона предполагается, что существует некий эффектор — химический сигнал, — который может «включать» или «выключать» экспрессию генов. Эффекторами служат производные какого-либо соединения, поступающего в клетку из внешней среды. Так как на питательных средах с разным химическим составом скорость синтеза рибосом одинакова, то, считая, что биосинтез рибосомной РНК регулируется

механизмом оперонного типа, следовало предположить, что в совершенно разных средах образуется одно и то же химическое соединение, которое служит эффектором. Это маловероятно, но в принципе возможно.

Более вероятно, что синтез рРНК в клетке контролируется по типу обратной связи. Для этого требуется, чтобы потенциальная способность клетки синтезировать рибосомы превышала фактический их синтез в тот или иной момент времени и чтобы свободные рибосомы, т.е. те, которые не участвуют в синтезе белка, могли ингибировать транскрипцию рРНК и, следовательно, сборку новых рибосом. Для проверки этой гипотезы С. Джинкс-Робертсон, Р. Гурс и я поставили эксперимент, который должен был показать, какой эффект имеет изменение дозы гена рибосомной РНК в клетке. В клетку *E. coli* ввели плазмиды, несшие полный набор генов рРНК. Обычно в клетке плазмиды существуют в виде нескольких копий. В нашем эксперименте в каждой клетке находилось по 7 плазмид. Таким образом, каждая трансформированная клетка имела в сумме 14 оперонов рРНК — 7 собственных на хромосоме и 7 на плаزمиде.

Удвоение количества генов рРНК практически не повлияло на общую скорость синтеза рРНК, хотя гены, внесенные на плазмиде, наверняка были активны — было показано, что рРНК на них синтезируется приблизительно с такой же скоростью, что и на хромосомных генах. Следовательно, все 14 промоторов оперонов рРНК функционировали в два раза менее эффективно, чем обычно, в результате чего содержание рибосомной РНК в клетке оставалось на том же уровне, что и в бактериях, не содержащих плазмид.

Результаты наших экспериментов согласовались с моделью обратной регуляции биосинтеза рРНК. При таком механизме общая скорость синтеза рРНК не должна значительно превышать скорость, необходимую для синтеза оптимального количества рибосом. Если образуется избыток рибосомной РНК, она накапливается в виде свободных рибосом, которые ингибируют дальнейший синтез рРНК одновременно как с хромосомных, так и с плазмидных оперонов. Однако эти данные не противоречили и другой гипотезе, согласно которой существует некий фактор, необходимый для транскрипции рРНК. Его количество определяется средой, в которой растут бактерии, и, следовательно, не зависит от числа генов рРНК в клетке.

Чтобы сделать выбор между этими двумя гипотезами, мы проделали следующий эксперимент. Из генов рибосомной РНК вырезали некоторые нуклеотидные последовательности и та-

кие дефектные гены вставили в плазмиды, а плазмиды ввели в клетки *E. coli*. В результате транскрипции этих генов образовывалась дефектная рРНК, которая не могла включаться в рибосому. Таким образом, в бактериях «доза» генов и промоторов рРНК была увеличена, но число тех генов, с которых могла синтезироваться полноценная (т.е. способная стать частью рибосомы) рРНК, осталось прежним.

Если работает механизм, основанный на действии лимитирующего фактора, то на одинаковой среде и при одинаковой скорости роста в клетках с плазмидами должно образовываться такое же количество рРНК (суммарно — нормальной и дефектной), что и в обычных клетках, содержащих только хромосомные опероны рРНК, так как на те и другие будет действовать одно и то же количество лимитирующего фактора. Если же имеет место регуляция по типу обратной связи, следует ожидать совершенно иных результатов. Дефектные рибосомные РНК, транскрибированные с плазмид, не могут включаться в рибосому и, следовательно, не могут участвовать ни в стимулировании синтеза рибосомных белков, ни в ингибировании транскрипции новых рРНК. Только функционально полноценная рРНК в составе рибосом служит репрессором транскрипции. Следовательно, в клетках, содержащих дефектные гены рРНК, должно синтезироваться больше суммарной рРНК (нормальной и дефектной), чем в не трансформированных бактериях.

Эксперименты показали, что в клетках, содержащих дефектные гены, синтезируется заметно больше рРНК. Это свидетельствует в пользу гипотезы об обратной регуляции. Осуществляется ли контроль биосинтеза рРНК непосредственно свободными рибосомами или же в клетке в ответ на появление свободных рибосом образуются какие-то молекулы-посредники, пока что не известно.

ХОТЯ некоторые детали еще предстоит выяснить, в целом регуляция биосинтеза рибосом в клетке *E. coli* сейчас выглядит более или менее понятной. Представим себе клетку, растущую в среде, содержащей все необходимое для ее роста. В таких условиях рибосом в клетке много, однако все они участвуют в синтезе белка и «безработных» почти нет. Если теперь клетки перенести в среду, небогатую питательными веществами, скорость синтеза белков уменьшится и в результате в клетке станет больше свободных рибосом. Свободные рибосомы прямо или опосредованно ингибируют синтез рибосомных и некоторых других РНК (например, транспортных, которые мы здесь не рассматривали). Из-за отсутствия новых рРНК синтез рибосом-

Новый международный атлас мира; история интегральных схем

ФИЛИП MORRISON

НОВЫЙ МЕЖДУНАРОДНЫЙ АТЛАС
THE NEW INTERNATIONAL ATLAS. Rand
McNally and Company (\$100)

ных белков останавливается по механизму обратной регуляции. Сборка рибосом прекращается, их концентрация постепенно падает и в конце концов устанавливается другая, низкая скорость роста клетки.

Если же бактерии, росшие на бедной среде, перенести в среду более благоприятного состава, то скорость синтеза белка значительно возрастет. Причем сначала скорость увеличивается медленно, так как в клетке обычно довольно мало незанятых рибосом, которые могли бы сразу включиться в работу. Однако даже небольшое усиление синтеза белка значительно снижает концентрацию свободных рибосом, что приводит к всплеску синтеза рибосомных РНК и в результате к быстрому появлению новых рибосом.

Такая картина согласуется с наблюдениями: при переносе клеток в среду, богатую питательными веществами, скорость синтеза рибосом возрастает быстрее, чем скорость синтеза белка. В первый момент синтез белка может усиливаться только за счет свободных рибосом, которые уже есть в клетке; для дальнейшего его прироста необходима сборка новых рибосом. Постепенно достигается положение равновесия: скорость синтеза рибосом оказывается сбалансирована с той скоростью синтеза белка, которая нужна в данной среде.

БЛАГОДАря двум взаимодействующим системам обратной регуляции клетка *E. coli* может «подгонять» количество рибосом к требуемой скорости роста. Из того факта, что в медленно растущих клетках сравнительно много свободных рибосом, можно сделать вывод, что в целом рост клетки не лимитируется ее способностью синтезировать рибосомы. Наоборот, рибосом, по-видимому, всегда синтезируется достаточно, чтобы обеспечить максимальную в данных конкретных условиях скорость роста. Однажды возникнув, такой механизм регулировки скорости синтеза рибосом, вероятно, дал предшественникам современных *E. coli* большие преимущества в борьбе за существование.

Поняв в общих чертах, как регулируется биосинтез рибосом у бактерий, надо сделать следующий шаг: разобраться, как обстоит дело у эукариот. Из-за того, что в эукариотической клетке ядро отделено от цитоплазмы, регуляция биосинтеза рибосом в ней, вероятно, сложнее, чем в бактериальной клетке. Впрочем, природа нашла способ преодолеть трудности. И хотя, как она это сделала, пока что остается загадкой, успех исследований с *E. coli* дает основания думать, что в недалеком будущем мы узнаем, какие механизмы управляют биосинтезом рибосом в эукариотических клетках.

«МЕЖДУНАРОДНЫЙ АТЛАС» издания 1969 г. получил в свое время самую высокую оценку на страницах журнала "Scientific American". Атлас последнего (1982 г.) издания, называющийся «Новый международный атлас», по-прежнему остается лучшим атласом мира. Следует остановиться на происшедших за это время изменениях. Добавлено около десяти новых карт, изображающих главным образом различные районы Западной Европы в масштабе одной миллионной. Обновлены карты шестидесяти крупнейших городов мира, выполненные в едином масштабе; обозначены вновь разбитые парки, новые аэропорты, выросшие пригороды и недавно проложенные дороги (например, шоссе, связывающее центр Нью-Йорка с островом Файр, или автострада на юге Риоде-Жанейро). Однако список этих городов не пополнился другими городами. Зато в атласе появился раздел тематических карт объемом в тридцать страниц, источником для которого послужила *Encyclopaedia Britannica*. Сюда включены исторические, политические, экономические и климатические карты, карты распространения языков, карты транспортных сетей и т.п. Большая часть этих данных ранее содержалась во вступительной статье к изданию 1969 г., которая теперь опущена. В новом издании атласа приводятся также оценки численности населения на 1982 г. для всех государств мира, городских центров с населением более 50 тыс. человек, а также небольших, но чем-либо знаменитых городов.

Основной любого атласа мира, однако, являются карты общего характера. В «Новом международном атласе» они выполнены с использованием самых современных картографических методов. Так, рельеф очень наглядно показан способом «отмывки». Необычайно высокое качество этих карт ставит атлас на особое место среди других атласов мира. Во все его карты внесены необходимые дополнения и изменения, происшедшие с 1969 г. Атлас снабжен списком этих изменений, а также подробным и удобным указателем. Среди прочих новшеств следует отметить замену неудобных раскладных страниц

обычными, что упростило пользование атласом. В работе по его подготовке с самого начала приняли участие специалисты из нескольких стран. Правила пользования атласом составлялись прежде на четырех языках, чем объясняется его название «международный», в новом издании они дополнены правилами на пятом языке — португальском. Атлас, несомненно, будет ценным приобретением для любой семьи или библиотеки, однако выход его в свет отнюдь не умаляет достоинств издания 1969 г.

Стен Огартен. ТЕХНИКА СОВРЕМЕННОСТИ: ИСТОРИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ В ФОТОГРАФИЯХ. Предисловие Рэя Бредбери

STATE OF THE ART: A PHOTOGRAPHIC HISTORY OF THE INTEGRATED CIRCUIT, by Stan Augarten. Foreword by Ray Bradbury. Ticknor and Fields, 52 Vanderbilt Avenue, New York, N.Y. 10017 (\$19.95)

ЧТО НАИБОЛЕЕ емко отражает уровень технического прогресса нынешнего века? Это — двигатель внутреннего сгорания, грибовидное облако атомного взрыва и электронная интегральная схема. В книге в хронологическом порядке приведены 36 фотографий таких схем, по которым в общих чертах можно проследить историю развития этой удивительной области техники. Каждая фотография сопровождается страницей краткого пояснительного текста, написанного доступным языком и содержащего практически все необходимые сведения. Изображения на фотографиях можно принять скорее за иллюстрации какой-то иной формы жизни, нежели за еще одно творение рук человеческих. Большинство фотографий выполнено с увеличением в 40 раз и представляет собой как бы цветной анатомический атлас неизвестных нам «организмов». Псевдонейронные сети на 24 снимках напоминают мелкомасштабные планы городов с хорошо продуманным размещением всего многообразия элементов городской застройки: здесь парки, там небоскребы, на окраинах локомотивные депо. Эти изображения относятся к совсем недавнему прошлому — 1970 г. Гораздо более простые структуры представлены на фотографиях 60-х годов — 10-кратно увеличенные

узоры на чистой гладкой поверхности, напоминающие скорее рисунок персидских ковров или изысканных старинных обоев. Лишь немногие из самых первых образцов схем выглядят трехмерными; видны проводники и капельки компаунда или припоя — следы человеческого труда, — и вся эта миниатюрная структура имеет пространственную конфигурацию. Первая, по праву названная интегральной, схема, изготовленная Джеком Килби в 1958 г., больше всего напоминает микроскопический сэндвич.

Эпоха современной стремительно развивающейся планарной полупроводниковой технологии началась в 1959 г. Перед нами фотография одного из первых планарных транзисторов в том виде, в каком он был изготовлен Джином Хорни и Робертом Нойсом, сотрудниками фирмы Fairchild. Хорни и Нойс совместно разработали технологию диффузии примесей в монокристаллическую кремниевую подложку для получения функциональных зон и переходов транзистора, способы нанесения изолирующего слоя двуокиси кремния на полученную диффузионную структуру и наконец методы размещения на ней внешних выводов из напыленного алюминия. Хотя этот прибор и выглядит плоским, на самом деле он имеет четко выраженную многослойную конфигурацию. Дальнейшее развитие полупроводниковой техники проиллюстрировано наиболее интересными примерами; год за годом растет точность соблюдения размеров функциональных элементов интегральных схем, и в результате расширяются перспективы создания все более сложных и вместе с тем надежных изделий. Емкость запоминающих устройств с произвольной выборкой увеличивается с 256 бит до 1К бит и сейчас, спустя десятилетие, достигает 288К бит. Продемонстрирован также ряд интересных технических решений, иллюстрирующих другие направления развития полупроводниковой технологии. В частности, здесь представлен первый 8-разрядный прибор с зарядовой связью (ПЗС), где вместо транзисторов используются скоммутированные конденсаторы; такого рода запоминающие устройства емкостью 64К бит на ПЗС-схемах служат в настоящее время для хранения информации, которая поступает с оптических датчиков самых разнообразных устройств: от автоматических кассовых аппаратов до аппаратуры, размещенной в главном фокусе 5-метрового телескопа Паломарской обсерватории.

В книге помещены фотографии наиболее распространенных микропроцессоров, начиная с выпущенного в 1976 г. фирмой Zilog процессора Z80 (одним из его вариантов оснащены многие популярные в США игровые автоматы) и

кончая прибором 68 000 компании Motorola, используемым в ранних моделях ЭВМ корпорации Radio Shack, и 32-разрядным микропроцессором фирмы Hewlett-Packard, соединительные проводники в котором выполнены не из алюминия, а из вольфрама, а кристалл размером 0,4 × 0,4 см этого прибора вмещает 450 тыс. транзисторов. Одно за другим перед нашими глазами проходят удивительные создания как больших, так и малых компаний: синтезаторы речи, аналого-цифровые преобразователи, запоминающие устройства, допускающие стирание записанной информации. Идут годы, меняются конструкции приборов и материалы, из которых они изготавливаются, повышается их быстродействие, «архитектурные» новшества приводят к большей дифференциации функций различных элементов интегральных схем. Однако главное состоит в том, что размеры кристаллов постоянно уменьшаются, и в результате с достаточной высотой выходом годных выпускаются все более сложные и менее дорогостоящие изделия.

Аппаратура, с помощью которой выполнялись фотографии, была американского производства, за исключением микроскопов (чаще всего использовались микроскопы фирмы Zeiss). Фотографии отличаются красочностью и зачастую выглядят как настоящие произведения искусства, что может ввести в заблуждение относительно характера изображаемых объектов. На самом деле здесь использовался метод разностно-интерференционной оптической обработки, когда падающий свет, как правило, сам по себе является интенсивным «красителем». Без такого оптического окрашивания мы увидели бы главным образом гладкую металлическую поверхность.

Книга открывается содержательным введением, понятным даже неспециалисту в области техники. В нем рассказывается о логических вентилях и плоскостных транзисторах, кратко описывается последовательность изготовления типичной интегральной схемы, помещена структурная схема микропроцессора, в которой выделено около десятка функциональных блоков. Заслуживает внимания одна из авторских аналогий: «Компьютеры — это всего лишь нескончаемые цепи логических вентилях, образующие гигантскую вычислительную «ирригационную» систему». Однако наиболее ценные сведения содержатся в пояснительных текстах к фотографиям, где даже информированный читатель, возможно, почерпнет для себя нечто интересное о каждом изделии: истоках его создания, разработчиках, применениях, наконец о его будущем.

Одним из удачных мест в книге является рассказ о фирме Zilog: «История

создания фирмы Zilog типична для Кремниевой долины. Ее основали несколько предприимчивых инженеров, которые уволились со своего прежнего места работы». Прежде они работали в компании Intel, которая в свою очередь была организована тремя специалистами, оставившими фирму Fairchild. Начало же последней положили 12 инженеров из компании Shockley Transistor, а ее основал Уильям Шокли, который ради «золотого» Запада США покинул фирму Bell Laboratories, где его группа из трех человек разработала первый в мире транзистор. В книге продемонстрированы также и приборы будущего — арсенид-галлиевые кристаллы и сверхбыстродействующие криогенные переключатели на переходах Джозефсона, созданные не честолюбивыми новичками, а гигантскими корпорациями Rockwell и IBM.

Сложность полупроводниковых кристаллов в перспективе можно увеличить еще на два-три порядка, человеческий мозг, по всей видимости, все равно останется по крайней мере на пять порядков сложнее таких приборов, однако, будучи в своей основе жидкой средой, он функционирует крайне медленно и обеспечивает низкий уровень сигнальных потенциалов.

Автор книги — журналист, специализирующийся в области техники, живет в самой Кремниевой долине. Он знал ее еще в те бурные годы — шесть-восемь лет назад, — когда только начинал создаваться нынешний облик этого региона, средоточия передовой технологии. Судя по приведенным в книге фотографиям, автор не только журналист, но и прекрасный фотокорреспондент, умело демонстрирующий историю развития техники с помощью иллюстраций.

Упаковка шаров

Как плотнее всего уложить в пространстве одинаковые шары?

В решении этой задачи достигнуты большие успехи, особенно для 24-мерного пространства.

Полученные результаты могут найти применение в области передачи цифровых сигналов

Н. ДЖ. А. СЛОЭН

ПРЕДСТАВИМ, что некая фирма по производству шарикоподшипников получила заказ: отправить в иностранный порт столько одинаковых шариков для подшипников, сколько удастся погрузить на зафрахтованные суда в условленный день. Шарикоподшипники приготовлены к отправке, однако в назначенный день в порту оказалось лишь одно судно, готовое принять груз. Член команды, ответственный за погрузку, объяснил представителю фирмы, что во избежание чрезмерной осадки судна шарики не должны занимать более трех четвертей объема трюма. Это замечание не смутило отправителя. «Вашему судну ничто не грозит, — ответил он уверенно, — заполняйте трюм доверху». Что делать ответственному за погрузку — верить или не верить клиенту?

Для решения этой задачи необходимо выяснить, насколько плотно можно уложить в пространстве большое количество одинаковых шаров. Если бы вместо шариков нужно было загрузить трюм судна одинаковыми кубиками, найти ответ было бы легко. Поскольку кубики плотно прилегают друг к другу и между ними не остается пустого места, они займут практически весь трюм (не считая небольших просветов вдоль

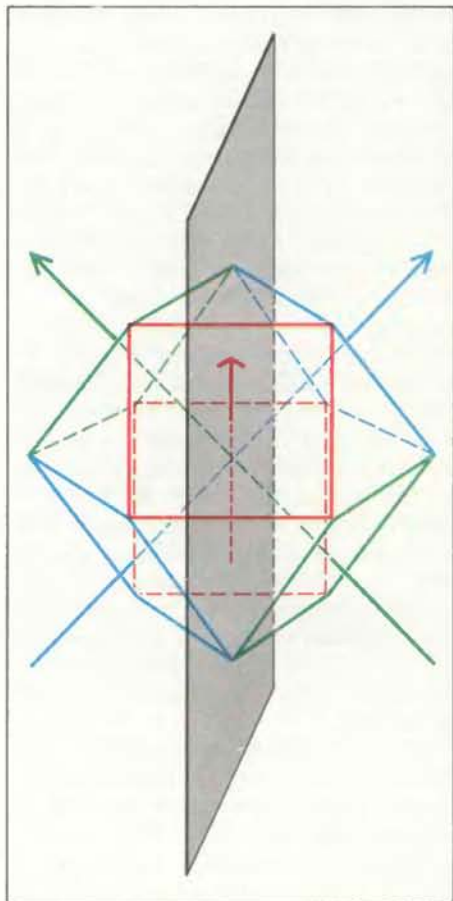
стен и потолка), и в этом случае заверения клиента оказались бы неправдой. Однако шары нельзя упаковать так же плотно, как кубики: между ними всегда остается свободное место, и, если, несмотря на самую плотную упаковку, объем свободного пространства превысит четверть объема трюма, его смело можно заполнить шариками и без риска выйти из гавани.

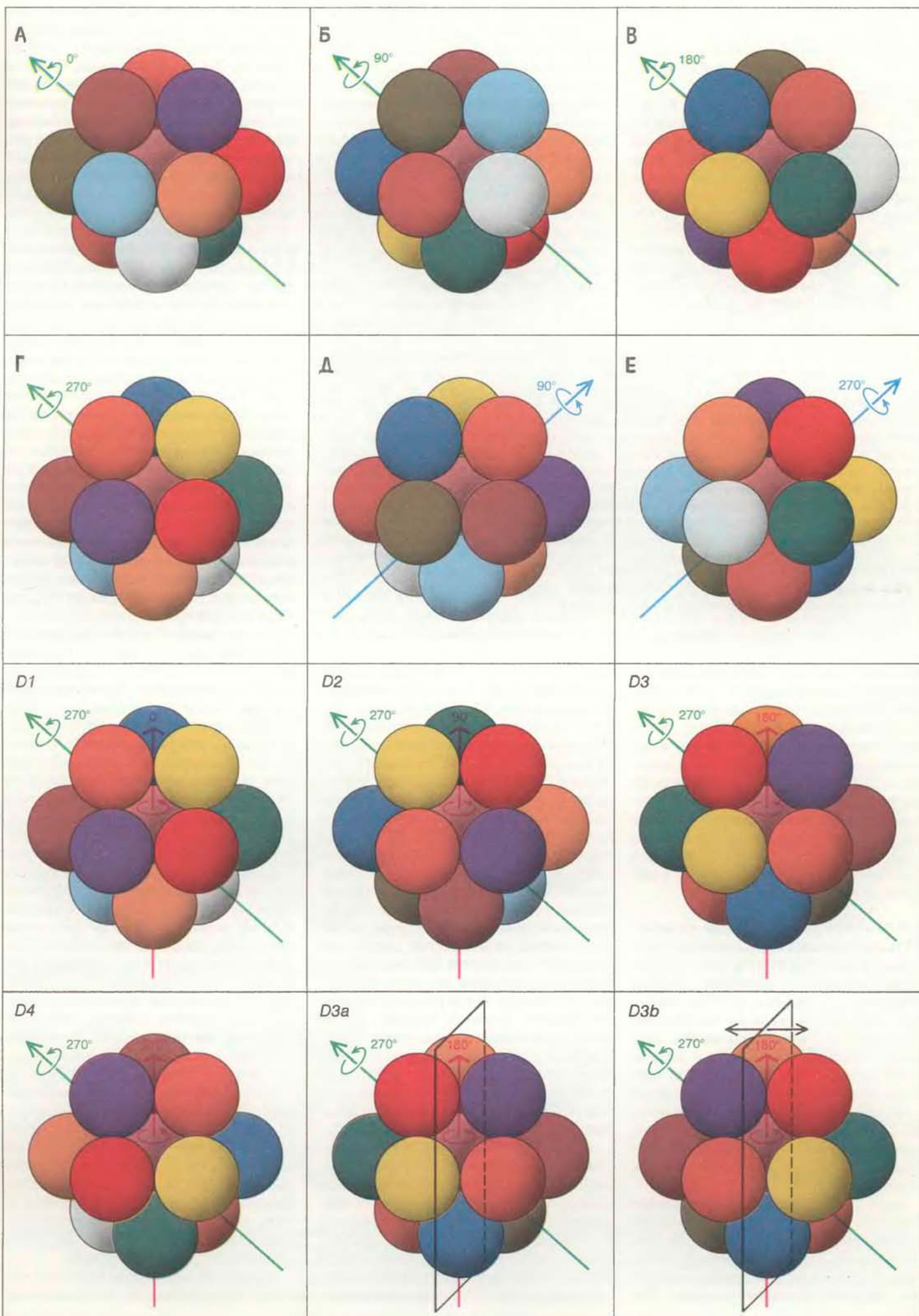
Многие люди, потратив несколько минут на эксперименты с апельсинами или бильярдными шарами, приходят к ошибочному выводу, что проблема тривиальна. Уложим три шара на плоской поверхности так, чтобы их центры образовали равносторонний треугольник, а сами они касались друг друга. Затем будем подкладывать к ним другие шары так, чтобы каждый новый касался двух уже уложенных. Так получится первый слой шаров. Затем уложим второй слой, помещая каждый новый шар в «глубокую яму», или углубление, образовавшееся в центре каждой треугольной группы шаров первого слоя. В законченном виде второй слой не отличается от первого, он только сдвинут в горизонтальной плоскости. Если и следующие слои строить таким же способом, то получится так называемая гранецентриро-

ванная кубическая упаковка шаров, хорошо знакомая химикам и кристаллографам. При этом шары заполняют чуть больше 74% объема пространства и каждому ясно, что уложить шары плотнее невозможно.

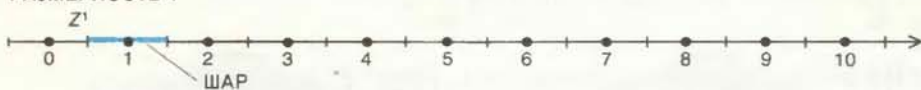
К сожалению, математически не доказано, что это максимально достижимая плотность. Из полученных до сих пор верхних оценок плотности наименьшая была найдена в 1958 г. К. А. Роджерсом из Бирмингемского университета; он доказал, что никакая упаковка шаров не может иметь плотность большую чем $\sim 0,7796$. Однако этот результат не слишком поможет тому, кто ищет оптимальный способ упаковки шариков для подшипников. Дело в том, что в доказательстве Роджерса не предлагается никакой упаков-

ГРАНЕЦЕНТРИРОВАННАЯ КУБИЧЕСКАЯ упаковка шаров, которую можно часто увидеть на прилавках фруктовых магазинов или в пирамидах пушечных ядер на военных мемориалах, считается плотнейшей упаковкой шаров в трехмерном пространстве. Однако, несмотря на многие годы усилий, доказать, что ее плотность максимальна, до сих пор не удалось. Каждый шар в этой упаковке касается 12 других; доказательство того, что это максимальное число касаний, было получено лишь в 1874 г. Если центр одного из шаров фиксирован, то множество всевозможных вращений и отражений, меняющих места 12 окружающих шаров, образует группу, которая называется группой симметрии этой упаковки. Группа симметрии гранецентрированной кубической упаковки состоит из 48 элементов. Их легче всего сосчитать, если рассматривать центры шаров как вершины изображенного справа многогранника, который называется кубооктаэдром. Каждая из шести квадратных граней кубооктаэдра может стать передней гранью после подходящего вращения фигуры вокруг зеленой или синей оси (A—E). Каждое множество четырех сфер, образующих квадратную грань (скажем, четвертую), при вращении всей фигуры вокруг красной оси может оказаться в одной из четырех конфигураций (D1—D4). Наконец, каждую конфигурацию (например, третью) можно отразить в вертикальной плоскости и получить новую конфигурацию (D3a, D3b). Следовательно, общее число элементов группы симметрии равно $6 \times 4 \times 2$, т.е. 48. Аналогичная группа симметрии, описывающая вращения и отражения плотной упаковки шаров в 24-мерном пространстве, открытой Дж. Личем из Университета г. Глазго, оказалась полезной в математической теории конечных групп.

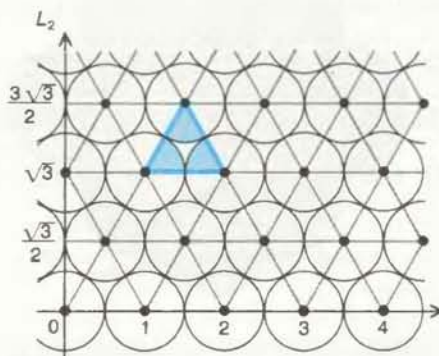
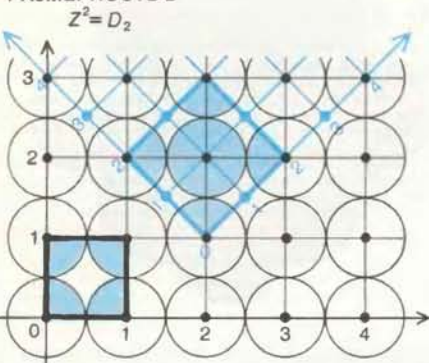




РАЗМЕРНОСТЬ 1



РАЗМЕРНОСТЬ 2



УПАКОВКИ «ШАРОВ» можно рассматривать не только в трехмерном, но также и в одномерном или двумерном пространствах. В размерности 1 шарами являются прямолинейные отрезки единичной длины с центрами в целых точках. Они покрывают 100% прямой, и каждый из них касается двух других. Очевидно, что это наиболее плотная возможная упаковка; она называется Z^1 . На плоскости шарами являются круги; известны три представляющие интерес упаковки. В упаковке Z^2 центры кругов расположены во всех точках с целыми координатами; в упаковке D_2 центры расположены в тех же точках через одну в шахматном порядке. Если изменить масштаб на координатных осях и повернуть их на 45° , то упаковка Z^2 перейдет в D_2 , следовательно, эти упаковки эквивалентны. Чтобы найти их плотность, нужно вычислить, какую долю площади квадрата покрывают круги или их части (т.е. сосчитать площадь закрашенной части квадрата); она равна $\pi/4$, или примерно 0,7854 (слева). Плотнейшей упаковкой кругов на плоскости является гексагональная решетчатая упаковка L_2 . Круговые секторы в этой упаковке покрывают $\pi\sqrt{3}/6$ каждого равностороннего треугольника; следовательно, плотность этой упаковки равна приблизительно 0,9069 (справа).

ки шаров, плотность которой была бы близка к найденной оценке. Более того, сам Роджерс в статье, где сообщалось о полученном доказательстве, заметил: «многие математики верят, а все физики знают», что правильный ответ составляет около 74%. За четверть века, прошедшие с тех пор, ничего не изменилось, и задача о плотной упаковке шаров, такая простая на вид и столь трудная по существу, остается одной из важных нерешенных проблем в математике.

КОНФИГУРАЦИИ плотной упаковки шаров изучаются уже многие годы. Отчасти это объясняется тем, что они тесно связаны с изучением свойств твердых тел и жидкостей. Так, например, физические свойства многих кристаллических материалов можно описывать, по крайней мере в первом приближении, исходя из модели кристалла как системы огромного числа твердых шаров (изображающих атомы) в плотной упаковке. Не менее важное применение эта модель находит при исследовании порошков и пористых материалов.

Если экспериментальное изучение упаковок шаров важно для понимания свойств некоторых физических систем, то имеются достаточно веские причины и для чисто математического изучения идеально плотных упаковок. Тот

факт, что до сих пор в отношении ни одной известной упаковки не доказано, что она самая плотная, говорит о том, что математическое исследование обычного трехмерного евклидова пространства еще далеко от завершения. Кроме того, математики обобщили понятие шара и задачу об упаковке шаров на многомерные пространства и рассматривают объекты, называемые n -мерными шарами, алгебраическое описание которых напоминает алгебраическое описание обычных шаров. Оказалось, что поиск плотной упаковки шаров в n -мерном пространстве математически эквивалентен разработке конечного множества закодированных цифрами сообщений, которые допускают их передачу без искажений при минимальных затратах энергии. Более того, найденные в последние годы плотные упаковки в пространствах 24 и более измерений привели к крупным открытиям в самой математике — в той ее области, которая называется теорией групп.

С проблемой упаковки шаров тесно связаны еще две важные геометрические задачи. Одна из них известна как задача о «числе касаний»: сколько одинаковых шаров можно расположить вокруг одного такого же центрального шара, чтобы все они касались его? В 1694 г. эта задача (в случае трехмерного пространства) стала предметом по-

лучившего широкую известность диспута между Исааком Ньютоном и шотландским астрономом Джеймсом Грегори. Ньютон утверждал, что число касаний равно 12, и для описанной выше гранецентрированной кубической упаковки это действительно так (см. рисунок на с. 73). Грегори, по-видимому, не соглашался, настаивая на том, что можно «втиснуть» еще один дополнительный шар, хотя он и не мог это доказать.

ПО МНЕНИЮ Г. С. М. Коксетера из Университета г. Торонто, Грегори, скорее всего, вообразил, что 12 окружающих шаров можно так передвинуть по центральному шару, чтобы все просветы между ними скопились в одном месте и туда вошел бы еще один шар. И действительно, как легко показать, телесный угол, под которым один из окружающих шаров виден из центра центрального шара, составляет меньше $1/13$ полного телесного угла, и, таким образом, если судить только по объему, вокруг центрального шара в самом деле могли бы уместиться 13 шаров. Однако часть полного телесного угла с неизбежностью приходится на просветы между окружающими шарами. Вопрос о числе касаний был разрешен лишь в 1874 г. Как показал Р. Хоппе, прав был Ньютон.

Вторая важная задача, связанная с упаковкой шаров, — это так называемая задача о редчайшем покрытии: как наиболее экономно расположить одинаковые шары в пространстве, чтобы каждая точка пространства оказалась внутри или на границе хотя бы одного из них? В отличие от задачи о плотнейшей упаковке, в которой речь шла о неперекрывающихся шарах, в этой задаче шары обязательно перекрываются. Возможен такой способ покрытия пространства шарами: рассмотрим какую-нибудь упаковку шаров и затем «раздвинем» каждый шар так, чтобы заполнились все пустоты исходной упаковки. Однако оказалось, что в общем случае «раздвигание» шаров самой плотной упаковки не приводит к оптимальному решению задачи о покрытии. Так, например, в трехмерном пространстве наилучшим принято считать покрытие шарами с центрами в узлах так называемой объемноцентрированной кубической решетки. Но если расположить в этих же узлах центры одинаковых неперекрывающихся шаров, то получится упаковка, которая уже не будет столь плотной, как другие известные упаковки шаров, например рассмотренная выше гранецентрированная кубическая. Правда, и сама гипотеза о том, что объемноцентрированная кубическая решетка дает решение задачи о покрытии, тоже не доказана.

Почему же так трудно решить проблему упаковки шаров в трехмерном

пространстве? Рассмотрим снова гранецентрированную кубическую упаковку. Поскольку требуется максимизировать такую величину как плотность, следует считать число шаров неограниченным. Если, скажем, убрать из исходной упаковки миллион шаров, ее плотность фактически не изменится. Но изъятие каждого шара из исходной упаковки приводит к новой упаковке. Таким образом, если бы удалось доказать, что гранецентрированная кубическая упаковка оптимальна (как многие полагают), то одновременно была бы доказана оптимальность бесконечного множества других упаковок!

Есть и еще один путь убедиться в сложности этой задачи для обычного пространства. В трехмерном случае не более четырех шаров могут попарно касаться друг друга. (Не следует связывать это свойство с задачей о числе касаний: в ней не требовалось, чтобы шары, окружающие центральный шар, касались друг друга.) Когда четыре шара попарно касаются, их центры являются вершинами правильной треугольной пирамиды, или правильного тетраэдра. Поскольку четыре шара не могут придвинуться друг к другу еще ближе, эта тетраэдральная конфигурация является плотнейшей упаковкой четырех шаров в пространстве.

Предположим, что к этой конфигурации добавляются по одному новые

шары, причем так, чтобы всегда, когда это возможно, образовалась новая тетраэдральная конфигурация. Если бы эту процедуру можно было продолжать до бесконечности, то полученное в результате расположение шаров имело бы наибольшую возможную плотность, поскольку все тетраэдральные комплекты были бы упакованы плотнейшим образом. Найденная Роджерсом верхняя оценка плотности получена на основе именно таких соображений: прямое вычисление по формулам сферической тригонометрии показывает, что четыре неперекрывающихся шара с центрами в вершинах тетраэдра могут заполнить примерно 0,7796 его объема (точный результат равен $\sqrt{2} [3 \arccos(1/3) - \pi]$). Но, к сожалению, плотно прилегающими друг к другу тетраэдрами нельзя «выложить» все пространство. Стратегия упаковки шаров в тетраэдральные комплекты до тех пор, пока это возможно (такую стратегию можно было бы назвать «жадным» алгоритмом), приводит в конце концов к неудачному ходу. На определенном шаге процедуры возникает такая конфигурация шаров, которая уже неспособна «поглотить» очередной шар без увеличения просвета между ними. Таким образом, хотя «жадный» алгоритм и порождает оптимальную упаковку шаров в небольшой области, размеры которой не пре-

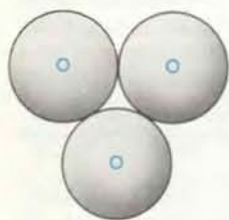
восходят, скажем, нескольких их диаметров, в конечном счете он приводит к менее плотной упаковке, чем гранецентрированная кубическая.

ДЛЯ ТОГО чтобы продвинуться в решении трех указанных задач, математики подкрепляют свою геометрическую интуицию аналитическим представлением шаров в прямоугольной системе координат. Хорошо известно, что любую точку на плоскости можно задать двумя координатами: x — по горизонтальной оси и y — по вертикальной. Обычно точка плоскости записывается в виде упорядоченной пары (x, y) . Так, например, $(3, 4)$ — это точка на плоскости, находящаяся на три единицы правее начала координат вдоль оси x и на четыре единицы выше вдоль оси y .

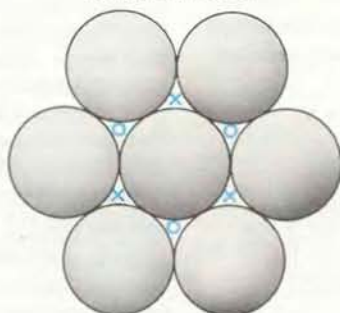
Расстояние между этой точкой $(3, 4)$ и любой другой точкой (x, y) можно сосчитать по теореме Пифагора: квадрат искомого расстояния равен сумме квадратов расстояний вдоль оси x и вдоль оси y , т.е. $(x - 3)^2 + (y - 4)^2$. Так как окружность, по определению, есть множество всех точек на плоскости, равноудаленных от некоторого центра, скажем (a, b) , то любая точка (x, y) окружности должна удовлетворять уравнению $(x - a)^2 + (y - b)^2 = R^2$, где R — радиус этой окружности. Если радиус равен 1, а центр находится в начале координат — точке $(0, 0)$, то уравне-

СЛОЕНАЯ РЕШЕТЧАТАЯ УПАКОВКА L_3

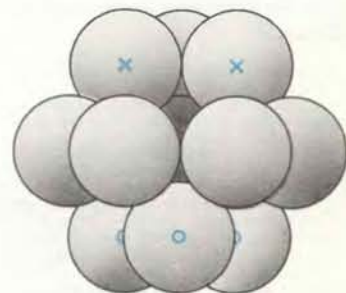
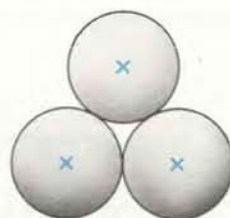
НИЖНИЙ СЛОЙ



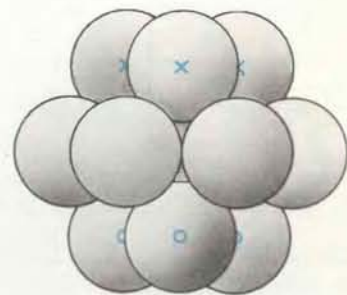
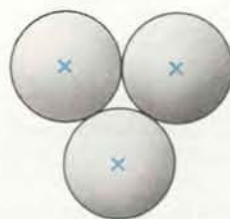
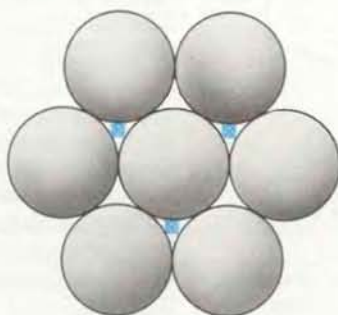
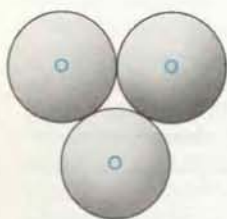
СРЕДНИЙ СЛОЙ



ВЕРХНИЙ СЛОЙ



ГЕКСАГОНАЛЬНАЯ ПЛОТНАЯ УПАКОВКА (НЕРЕШЕТЧАТАЯ)



ПОСТРОЕНИЕ слоеной решетчатой упаковки L_3 , которая эквивалентна гранецентрированной кубической упаковке D_3 , осуществляется наложением друг на друга слоев, в которых центры шаров расположены в соответствии с гексагональной решетчатой упаковкой L_2 . Если уложить слои таким об-

разом, что шары третьего слоя окажутся в точности над шарами первого, то получится упаковка, которая называется гексагональной плотной упаковкой. Эта упаковка столь же плотная, что и L_3 , однако центры шаров в этой упаковке не образуют решетку.

ние упрощается и принимает вид $x^2 + y^2 = 1$.

Подобным же образом любая точка трехмерного пространства задается тремя координатами x , y и z ; в более симметричном виде ее можно представить так: (x_1, x_2, x_3) . Поверхность шара (сфера) радиуса 1 с центром в начале координат состоит из точек вида (x_1, x_2, x_3) , удовлетворяющих уравнению $x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 = 1$, которое, как и в двумерном случае, можно получить из геометрического определения сферы, применяя теорему Пифагора (на этот раз дважды).

В пространстве более трех измерений геометрическая интуиция уже не помогает, и приходится полностью перейти на язык координат. Например, «точкой» четырехмерного пространства является математический объект, для однозначного задания которого требуются четыре числа; такая точка записывается в виде (x_1, x_2, x_3, x_4) . Если у нас есть некий список лиц с указанием сведений о них и если по росту, весу, возрасту и годовому доходу можно однозначно найти по списку соответствующую фамилию, то эти четыре величины задают точку в четырехмерном пространстве.

Четырехмерный шар определяется по аналогии с предыдущими случаями. Все точки (x_1, x_2, x_3, x_4) на его поверхности (сфере) находятся на одном и том же расстоянии R от некоторой точки (a_1, a_2, a_3, a_4) — центра шара. Сумма квадратов расстояний по всем независимым координатным осям между любой точкой сферы (x_1, x_2, x_3, x_4) и центром (a_1, a_2, a_3, a_4) должна равняться R^2 .

В научной фантастике (и не только в ней) написано много всякой чепухи о тайнах четвертого измерения. В отличие от физики, где четвертое измерение обычно представляет время, в математике все четыре координаты равноправны. Более того, следует избегать соблазна овеществлять такие термины, как «точка», «шар», «поверхность» и т.д., которые в четырехмерном пространстве становятся уже несколько метафорическими. Они применяются к объектам со строго определенными алгебраическими свойствами, и их употребление объясняется только тем, что эти объекты построены по аналогии с обычными кругами и шарами. При этом вовсе не предполагается, что им отвечают какие-то реальные геометрические объекты в некотором мире, более широком, чем наш собственный. Итак, я повторяю, что в математике четырехмерное пространство состоит из точек с четырьмя координатами вместо трех (и то же самое относится к пространству с любым другим числом измерений).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ понятия сферы при помощи соотношения между координатами позволяет по-новому посмотреть на некоторые задачи, внешне никак не связанные с упаковкой шаров, и свести их к одной из трех задач, описанных выше. Задачи упаковки шаров в пространствах высокой размерности должны найти свое главное применение при решении проблем цифровой связи, в частности при разработке системы сигналов для передачи по каналу с шумом и при проектировании аналого-цифровых преобразователей.

Однако следует признать, что разговоры о такого рода применениях до сих пор имели в основном теоретический характер; лишь совсем недавно плотные упаковки шаров стали использоваться при практической разработке систем связи. По мере того как будут усложняться эти системы, появятся, вероятно, и новые применения.

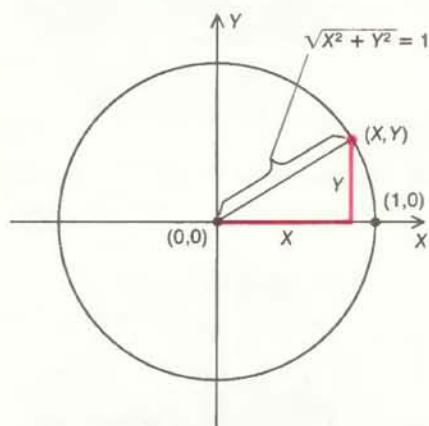
Одна из главных задач при осуществлении цифровой связи заключается в построении набора закодированных символов, или кодовых слов, который можно передать с максимальной надежностью при минимальных затратах энергии. Допустим, что каждое кодовое слово представлено в виде восьмиразрядного символа, в каждом разряде которого стоит одно из пяти различных значений: 0, 1/2, 1, -1/2, -1. На первый взгляд кажется, что такая система обеспечит передачу $5^8 = 390625$ различных кодовых слов. Однако некоторые пары этих слов настолько мало различаются, что при передаче такая система будет слишком подвержена случайным ошибкам или электрическим помехам. Например, кодовые слова (1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1) и (1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1/2) так мало отличаются друг от друга, что если использовать их оба, то часто одно будет принято за другое. Иначе можно сказать, что если два кодовых слова столь же мало различаются, как (1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1) и (1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1/2), то потребуются очень большие затраты энергии, чтобы гарантировать различимость этих слов при наличии фонового шума.

Различимость кодовых слов и количество энергии, необходимое для их надежной передачи, связаны общим математическим соотношением. Оно было впервые сформулировано в 1948 г. Клодом Шенноном, работавшим тогда в фирме Bell Telephone Laboratories, в его статье «Математическая теория связи»^{*}

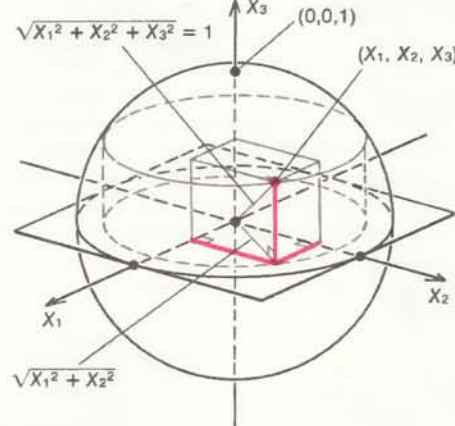
Мой выдающийся коллега Дэвид Слэпьян сказал: «в этом веке больше не было, пожалуй, ни одной работы, которая бы так глубоко изменила наши представления о связи», как эта статья Шеннона. Шеннон показал, что при любом фиксированном количестве энергии всегда существует такая система кодовых слов, которая может быть передана практически без ошибок. При этом появляется лишь ограничение на скорость передачи кодовых слов: она не должна превышать некоторого критического порога, называемого пропускной способностью канала передачи. К сожалению, теорема Шеннона неконструктивна: в ней утверждается только существование таких систем ко-

^{*} Эта статья опубликована в книге: Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике. Пер. с англ. — М.: ИЛ, 1963. — Прим. перев.

РАЗМЕРНОСТЬ 2



РАЗМЕРНОСТЬ 3

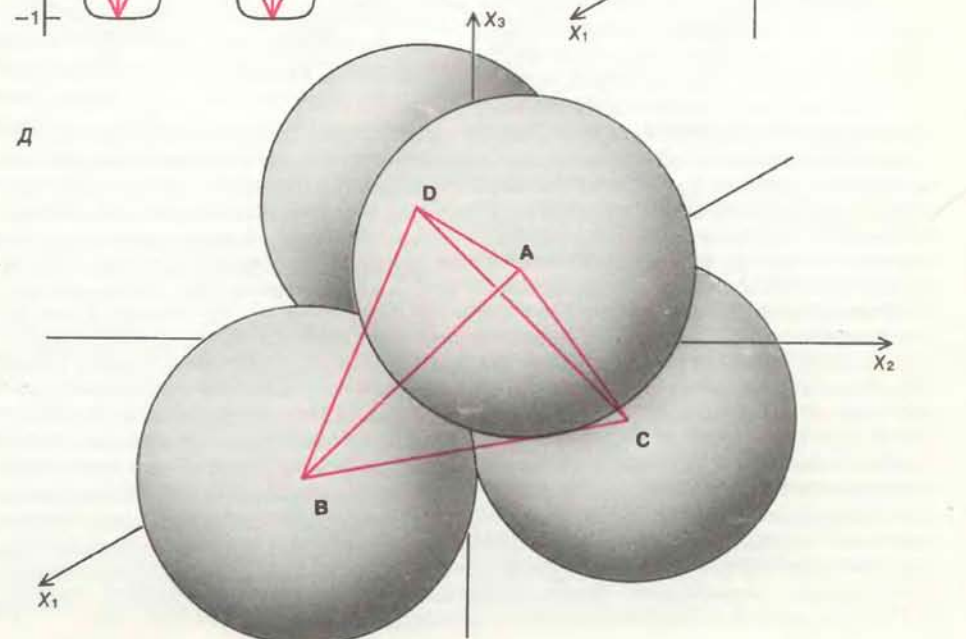
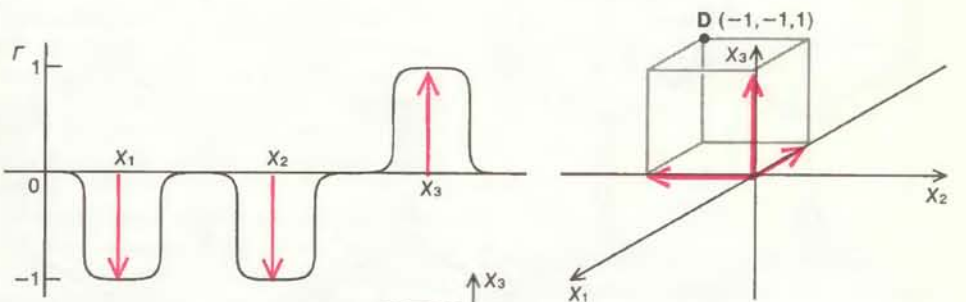
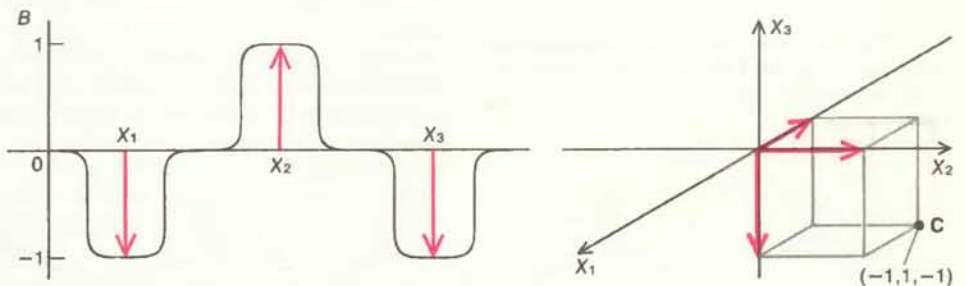
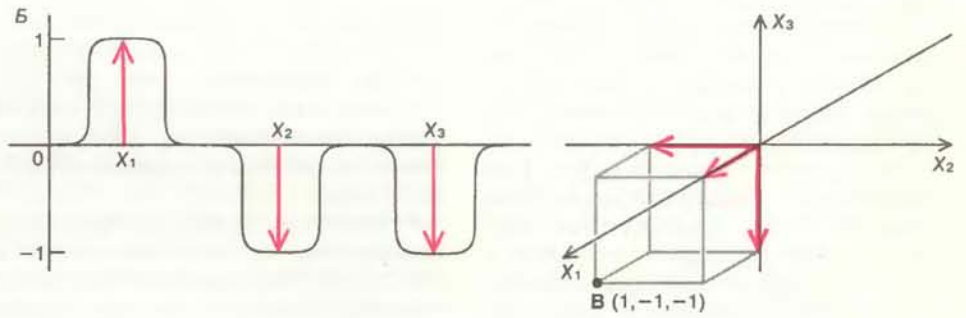
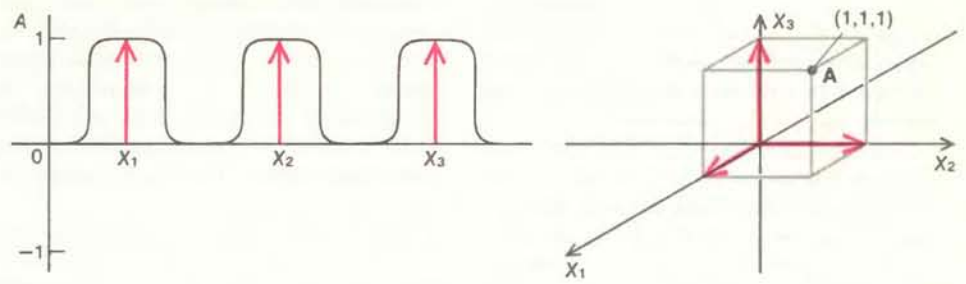


ТОЧКА В ДВУМЕРНОМ ПРОСТРАНСТВЕ задается двумя координатами, скажем x и y . Окружность радиуса 1 с центром в начале координат — точке $(0, 0)$ — это множество всех точек (x, y) , удовлетворяющих уравнению $x^2 + y^2 = 1$ (слева). В трехмерном пространстве для задания точки требуются три координаты, скажем x_1, x_2 и x_3 . Поверхность шара радиуса 1 с центром в точке $(0, 0, 0)$ — это множество всех точек (x_1, x_2, x_3) , удовлетворяющих уравнению $x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 = 1$. В n -мерном пространстве точка задается n координатами x_1, x_2, \dots, x_n , а поверхность n -мерного шара радиуса 1 с центром в точке $(0, 0, \dots, 0)$ есть множество точек (x_1, x_2, \dots, x_n) , удовлетворяющих уравнению $x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2 = 1$.

дирования, но нет и намека на то, как их построить. И хотя с тех пор разработано много различных систем сигналов, ни одна из них не действует так прекрасно, как обещает теорема Шеннона.

ОДИН ИЗ способов приблизиться к соотношению, указанному теоремой Шеннона, состоит в том, чтобы представить каждый сигнал как некоторую точку n -мерного пространства. Рассмотрим, например, произвольную последовательность из восьми чисел, принадлежащую системе сигналов. Физически каждому из этих чисел соответствует некоторый уровень напряжения в линии передачи, поэтому каждое кодовое слово можно графически представить на плоскости в виде набора из восьми отдельных импульсов заданной высоты на восьми интервалах временной оси. Ту же информацию можно выразить математически при помощи одной точки восьмимерного пространства: возьмем первое число каждой последовательности в качестве первой координаты такой точки, второе — в качестве второй координаты и т.д. Поскольку задание восьми координат

РАЗРАБОТКА КОДА для эффективной передачи информации тесно связана с задачей об упаковке шаров. Такой код представляет собой конечное множество сигналов, называемых кодовыми словами, которые должны быть легко различимы при минимальных затратах электроэнергии. Если каждое кодовое слово есть последовательность трех дискретных уровней напряжения, то эту последовательность можно представить точкой трехмерного пространства: первая координата этой точки равна численному значению первого уровня напряжения, вторая — значению второго уровня и т.д. (А—Г). Энергия, требуемая для передачи каждого импульса, пропорциональна квадрату напряжения, поэтому полная энергия, необходимая для передачи одного кодового слова, равна сумме квадратов трех дискретных напряжений, составляющих это кодовое слово. Эта сумма равна квадрату расстояния от начала координат точки трехмерного пространства, которая представляет это кодовое слово. Таким образом, проблема минимизации затрат энергии эквивалентна задаче размещения всех точек, представляющих кодовые слова, как можно ближе к началу координат. С другой стороны, необходимость отчетливой различимости кодовых слов можно рассматривать как требование, чтобы соответствующие им точки в пространстве не подходили друг к другу ближе, чем на некоторое минимальное расстояние d . Сочетание двух этих требований геометрически эквивалентно поиску наиболее плотной упаковки неперекрывающихся твердых шаров радиуса $d/2$ вокруг начала координат (Д).



определяет точку восьмимерного пространства, каждое кодовое слово нашей системы будет представлено определенной точкой восьмимерного пространства.

Превратив кодовые слова в точки, можно поискать геометрическую интерпретацию двух важных условий, которым должна удовлетворять система кодовых слов. Во-первых, вспомним, что кодовые слова должны быть надежно различимы. На геометрическом языке это означает, что соответствующие точки восьмимерного пространства должны быть разделены некоторым минимальным «расстоянием». Можно ли считать пифагорово расстояние * между двумя точками восьмимерного пространства мерой различимости соответствующих кодовых слов? При определении пифагорова расстояния разности между координатами двух рассматриваемых точек возводятся в квадрат. Следовательно, малые разности (скажем, меньше 1) при этом уменьшаются, а большие (больше 1)

увеличиваются. Поскольку при малой разнице в величине напряжения для двух сигналов опасность перепутать соответствующие кодовые слова гораздо более вероятна, чем при большой, пифагорово расстояние можно считать разумной мерой различимости.

Рассмотрим, например, два кодовых слова: (1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1) и (1/2, 1/2, 1/2, 1/2, 1/2, 1/2, 1/2, 1/2). Квадрат расстояния между соответствующими точками равен сумме восьми квадратов вида $(1 - 1/2)^2$, и, значит, само расстояние равно $\sqrt{2}$. Кодовые слова (1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1) и (0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1), хотя у них все координаты, кроме двух первых, совпадают, тоже удалены друг от друга на расстояние $\sqrt{2}$, и потому их так же легко различить, как и предыдущие слова.

Вторая важная характеристика хорошей системы кодовых слов состоит в том, что энергия, затрачиваемая на их передачу, должна быть минимальной. Из элементарных определений энергии и напряжения следует, что энергия прямо пропорциональна квадрату напряжения: для простой электрической цепи энергия равна квадрату напряжения, деленному на сопротивление этой цепи. Следовательно, суммарная энер-

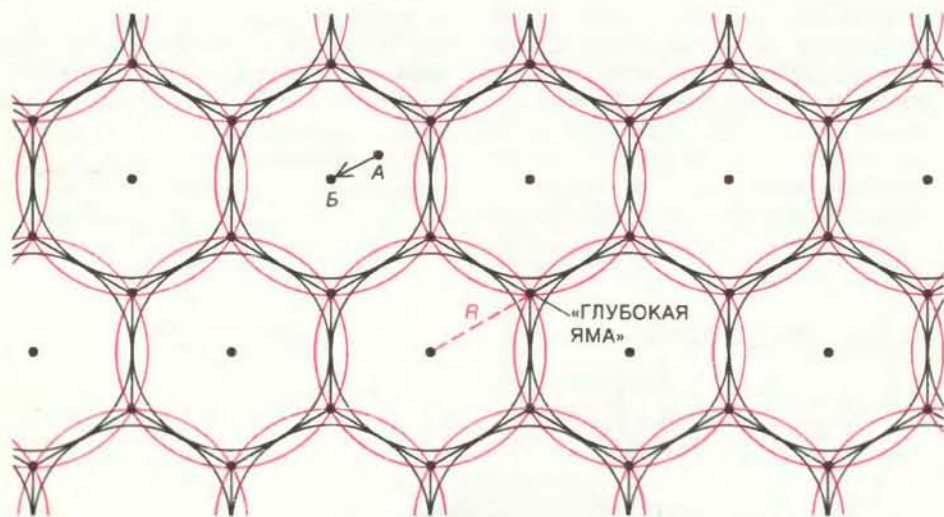
гия, необходимая для передачи восьмизначного кодового слова, равна сумме квадратов восьми составляющих его чисел. А эта сумма есть не что иное, как квадрат расстояния от точки, представляющей это кодовое слово в восьмимерном пространстве, до начала координат (0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0).

ТАКИМ образом, задача разработки надежной системы сигналов, обеспечивающей к тому же эффективное использование энергии, сводится к геометрической задаче размещения точек внутри некоторой области пространства при дополнительном условии, что они не должны находиться слишком близко друг к другу. Если требуется, чтобы расстояние между этими точками было, скажем, не меньше $\sqrt{2}$, то задача эквивалентна построению плотнейшей упаковки шаров, радиус которых равен половине этого расстояния, т.е. $\sqrt{2}/2$. Другая задача, тесно связанная с предыдущей, заключается в том, чтобы найти множество кодовых слов, требующих одинаковой энергии. Она эквивалентна задаче размещения на поверхности n -мерного шара максимального количества точек, подчиненных дополнительному условию — не подходить слишком близко друг к другу. А это в свою очередь есть не что иное, как обобщенный вариант задачи о числе касаний.

Оказывается, в восьмимерном пространстве существует особенно плотная упаковка шаров, называемая E_8 . Она была открыта в последней трети XIX в. русскими математиками А. Н. Коркиным и Е. И. Золотаревым, а также английским юристом и математиком-любителем Торолдом Госсетом. Центры шаров в упаковке E_8 лежат в точках, все координаты которых — только целые числа или только целые числа, сложенные с $1/2$. При этом сумма координат каждой точки должна быть четным числом. Имеется 240 таких точек на расстоянии $\sqrt{2}$ от начала координат: 112 точек вида $(\pm 1, \pm 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0)$, где две единицы с произвольной комбинацией знаков могут стоять на любом месте, и 128 точек вида $(\pm 1/2, \pm 1/2, \pm 1/2, \pm 1/2, \pm 1/2, \pm 1/2, \pm 1/2, \pm 1/2)$ с четным числом минусов.

Упаковка E_8 могла бы стать основой практичной и эффективной схемы сигналов. Если бы схема включала в себя ровно 240 кодовых слов, то в качестве представляющих эти слова точек можно было бы выбрать 240 равноудаленных от начала координат точек упаковки E_8 . Однако для большинства применяемых на практике систем требуется число кодовых слов, равное некоторой целой степени двойки. Так, например, в телефонной связи на средние расстояния сейчас широко применяется система цифровой передачи, называемая

* То есть расстояние, определяемое при помощи теоремы Пифагора. В математике оно называется евклидовым. — Прим. перев.



КВАНТОВАНИЕ ДАННЫХ, полученных от непрерывно изменяющегося источника, тесно связано с задачей о редчайшем покрытии пространства перекрывающимися шарами. Например, чтобы выполнять квантование в двумерном пространстве, входные данные объединяют в пары и каждую пару рассматривают как координаты точки на плоскости. Затем каждую точку, скажем А, отвечающую паре данных, округляют до ближайшей отмеченной точки (В), лежащей в той же заранее выбранной области плоскости, что и А. Проблема состоит в том, чтобы выбрать разбиение плоскости и отмеченные точки таким способом, при котором была бы минимальной средняя ошибка квантования. Если данные распределены равномерно, а отмеченные точки лежат в центрах квадратов, то средняя ошибка равна $1/12$. При помощи редчайшего покрытия плоскости кругами можно получить лучший способ квантования. Такое покрытие порождается гексагональной упаковкой (черные круги), если радиусы кругов немного увеличить — ровно настолько, чтобы каждая точка плоскости оказалась внутри или на границе хотя бы одного круга (цветные круги). Радиус R кругов покрытия равен расстоянию от центра до самой «глубокой ямы» в соответствующей упаковке. Если соединить эти «глубокие ямы» подходящими прямыми, то плоскость разобьется на правильные шестиугольники; выбор отмеченных точек в центрах правильных шестиугольников при квантовании равномерно распределенных данных дает среднюю ошибку $5\sqrt{3}/108$, т.е. около 0,0802, что немного меньше, чем $1/12$.

импульсно-кодовой модуляцией. Напряжение, отвечающее речевому сигналу, измеряется через каждые $1/8000$ с, и эти выборочные измеренные значения затем квантуются, т.е. заменяются одним из $2^8 = 256$ дискретных значений. Затем каждое такое значение выражается в виде восьмиразрядного двоичного числа, и эти двоичные числа образуют так называемый код источника.

То, что речевой сигнал можно реконструировать по одним только выборочным значениям, известно со времени появления в 20-х годах нашего века работ Гарри Найквиста, сотрудника фирмы Bell Laboratories. Речевой сигнал можно рассматривать как некую величину, которая, подобно давлению воздуха или напряжению, меняется непрерывно в зависимости от времени. В самом начале XIX в. Жан Батист Жозеф Фурье доказал, что график любой такой величины можно с любой требуемой точностью аппроксимировать при помощи наложения синусоид и косинусоид подходящих амплитуды и частоты. Эти синусоиды и косинусоиды (в случае произвольной кривой их может оказаться бесконечное множество) называются компонентами Фурье рассматриваемой кривой.

Допустим, что график некоторой величины получается наложением конечного числа компонент Фурье, частоты которых не превышают $W/2$. Результат Найквиста состоял в том, что этот график можно восстановить по значениям, которые он принимает через каждые $1/2W$ с. Так, например, речевой сигнал, не имеющий компонент с частотой выше 4000 Гц, может быть полностью восстановлен по выборочным значениям, измеренным через каждые $1/8000$ с. Таким образом, вместо полного речевого сигнала можно передавать только выборочные значения, которые представлены кодовыми словами в коде источника. Если бы эти выборочные значения передавались без округления, то теорема Найквиста показывала бы, что длящийся целую секунду речевой сигнал, которому соответствуют 8000 выборочных значений, может быть представлен всего одной точкой 8000-мерного пространства. Вот такая мощная штука математика!

ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ эффективной передачи чисел в коде источника, представляющих выборочные значения, их нужно преобразовать еще раз при помощи кода канала; именно эта стадия процесса имеет отношение к задаче упаковки шаров. Прекрасный способ получить код канала при помощи упаковки E_8 состоит в следующем. Каждая пара последовательных восьмиразрядных двоичных чисел в коде источника объединяется в одно 16-разрядное число, которое приписывается центру одного из $2^{16} = 65\,536$ ша-

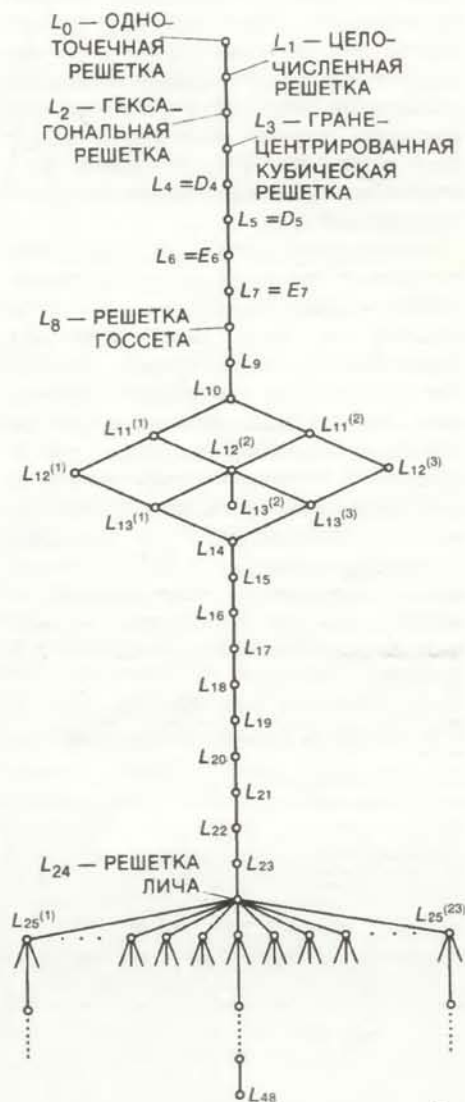
ров упаковки E_8 , ближайших к началу координат. На приемном конце телефонной линии кодовые слова, отвечающие координатам каждого такого центра, преобразуются в двоичные числа кода источника, и по ним реконструируется исходный речевой сигнал.

Кратко рассмотрим еще одно важное применение упаковок шаров в проблемах цифровой связи. Вспомним, что, прежде чем получить из речевого сигнала в телефоне двоичные числа кода источника, нужно свести точную величину интенсивности сигнала к одному из 256 дискретных уровней. Реальный мир полон несуразных чисел вроде 0,7913. . ., но мир компьютеров и цифровых систем в конечном счете имеет дело только с «круглыми» числами наподобие 0 и 1. Устройство, которое приводит непрерывную переменную величину к некоторому множеству дискретных значений, называется аналого-цифровым преобразователем или устройством для квантования.

Квантование можно выполнять не только вдоль одной координатной оси, а сразу в двух и более измерениях. Допустим, что плоскость разбита на некоторые области, конгруэнтные или нет, и в каждой области отмечена одна точка. Любой такой массив точек и областей может функционировать как двумерный преобразователь: вместо пары вещественных чисел на входе, задающей некоторую произвольную точку плоскости, он выдает на выходе координаты отмеченной точки, лежащей в той же области, что и эта произвольная точка. Таким способом каждая точка плоскости «округляется» до одной из отмеченных точек. Этот процесс сжимает входные данные: вместо точных значений координат заданной точки можно передавать один только индекс соответствующей отмеченной точки.

Однако квантование вносит ошибки, поэтому обычно стараются так выбрать отмеченные точки, чтобы свести среднюю ошибку к минимуму. Если, например, входные данные распределены равномерно, т.е. все входные значения равновероятны, то нетрудно вычислить среднюю ошибку для разных схем квантования. Допустим, что одна координатная ось разбивается на равные отрезки единичной длины и в качестве отмеченных точек берутся середины этих отрезков; тогда средняя ошибка равна $1/12$, или около 0,0833. Те же данные можно проквантовать в двух измерениях: поступающие значения объединяются в пары и каждая пара рассматривается как точка на плоскости. Если затем разбить плоскость на квадраты и выбрать отмеченную точку в центре каждого квадрата, то средняя ошибка будет по-прежнему равна $1/12$. С другой стороны, если разбить плоскость на правильные шестиу-

гольники той же площади, что и квадраты, и выбрать в качестве отмеченных точек центры этих шестиугольников, то средняя ошибка квантования немного уменьшится и станет равной $5\sqrt{3}/108$, т.е. примерно 0,0802.



«СЛОЕННЫЕ» решетчатые упаковки шаров в n -мерном пространстве строятся путем прикладывания друг к другу слоев, образованных при помощи подходящей слоистой решетчатой упаковки в пространстве предыдущей размерности $n - 1$. Так, двумерную гексагональную упаковку L_2 можно построить, прикладывая друг к другу ряды кругов с центрами в точках решетки Z^1 . Подобным же образом слои из шаров, уложенные в соответствии с гексагональной решеткой, кладутся друг на друга и образуют решетчатую упаковку L_3 , плотнейшую известную упаковку в трехмерном пространстве. Джон Х. Конвей из Кембриджского университета и автор продолжили это построение и нашли все слоистые решетки в размерностях вплоть до 25. Оказалось, что в размерностях 1—10 и 14—24 слоистые решетки единственны, в размерности 11 их две, в размерности 12 и 13 по три. В размерности 25 их уже 23, а в размерности 26 — по крайней мере 75 000.

ЗАМЕЧАТЕЛЬНО, что такого улучшения всегда можно добиться, даже если исходные данные не являются равномерно распределенными. В 1963 г. П. Л. Задор из Станфордского университета в своей докторской диссертации показал, что среднюю ошибку всегда можно уменьшить, выполняя квантование в пространстве более высокой размерности. Таким образом, вместо того чтобы квантовать данные по мере их поступления вдоль одной оси, лучше подождать, пока соберется несколько значений, и затем квантовать их все вместе как одну точку в n -мерном пространстве. При квантовании не стоит торопиться!

К сожалению, результат Задора, как и теорема Шеннона, неконструктивен. Проблема нахождения хороших многомерных схем квантования даже для равномерно распределенных данных все еще остается нерешенной. Однако известно несколько упаковок шаров, на основе которых, как оказалось, можно построить отличные схемы квантования. Рассмотрим упаковку шаров в двумерном пространстве, т.е. упаковку кругов на плоскости. С 1940 г. известно, что плотнейшей упаковкой кругов является такая, при которой каждый круг опоясан шестью другими (см. рисунок на с. 78).

Допустим теперь, что каждый из этих кругов ограничен тонкой эластич-

ной пленкой и внутренность круга начинает раздуваться. По мере увеличения кругов пленки смыкаются друг с другом и свободное пространство на плоскости заполняется. Если «раздувание» происходит равномерно на всей плоскости, то круги превращаются в правильные шестиугольники. Как уже говорилось, схема квантования равномерно распределенных данных, основанная на шестиугольниках, приводит к минимальной средней ошибке. Подобное же «раздувание» восьмимерных шаров упаковки E_8 также дает малую ошибку квантования, даже еще меньшую, чем в двумерном случае. Общая проблема квантования, в которой требуется, чтобы пространство было разбито на конечные области, или иначе говоря, покрыто такими областями, тесно связана с задачей нахождения редчайшего покрытия пространства шарами.

Поиск плотнейших упаковок шаров в многомерных пространствах сильно упрощается, если сосредоточить внимание лишь на самых регулярных конфигурациях — так называемых решетчатых упаковках. Вернемся к шестиугольной, или гексагональной, упаковке кругов, о которой только что говорилось. Центры любых двух соседних опоясывающих кругов вместе с центром среднего круга образуют равнос-торонний треугольник. Чтобы вычис-

лить плотность такой упаковки, достаточно подсчитать, какая доля каждого треугольника покрыта кругами или их частями. Поскольку эти треугольники заполняют плоскость, а конфигурация кругов внутри каждого треугольника всегда одна и та же, то плотность кругов в одном треугольнике равна плотности всей упаковки в целом. Пользуясь формулами элементарной геометрии, можно убедиться, что эта плотность равна $\pi\sqrt{3}/6$, или приближенно 0,9069.

Провести это вычисление было бы невозможно, если бы не существовало бесконечно повторяющейся ячейки, заполняющей всю плоскость. Тем не менее легко представить себе и такие совсем нерегулярные упаковки, для которых подобной ячейки не существует. Такие упаковки гораздо труднее поддаются изучению: мало того, что трудно или вообще невозможно вычислить их плотность, иногда не удается даже описать координаты центров. От этих неприятностей нас гарантирует определение решетчатой упаковки. Упаковка шаров называется решетчатой, если для любых двух шаров с центрами в точках (u_1, u_2, \dots, u_n) и (v_1, v_2, \dots, v_n) этой упаковке принадлежит и все шары с центрами в точках вида $(au_1 + bv_1, au_2 + bv_2, \dots, au_n + bv_n)$, где a и b — произвольные целые числа. Про координаты центров последних шаров говорят, что они порождаются координатами центров двух первых шаров.

Простейшей решетчатой упаковкой является кубическая; в этой упаковке центры шаров находятся в точках с целочисленными координатами. Кубическая решетка (или упаковка) в пространстве произвольной размерности n обозначается Z^n . Одномерная «кубическая» упаковка Z^1 состоит из отрезков единичной длины с центрами в целых точках на прямой. Эти «шары» покрывают 100% прямой, и каждый из них касается двух других. Следовательно, упаковка Z^1 решает в одномерном пространстве обе задачи: о плотнейшей упаковке и о числе касаний.

ОДНАКО в двумерном случае квадратная упаковка Z^2 не является плотнейшей. Ее плотность равна $\pi/4$, или примерно 0,7854, т.е. намного меньше, чем для гексагональной упаковки кругов (см. рисунок на с. 74). Упаковка, соответствующая кубической решетке Z^3 , также имеет низкую плотность, и равна $\pi/6$, т.е. около 0,5236. Значительно более плотное семейство решетчатых упаковок можно получить при помощи кубических решеток, если располагать центры шаров поочередно в шахматном порядке. Чтобы построить новое семейство решеток, покрасим узлы кубической решетки попеременно в красный и черный цвета и расположим центры ша-

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	1	1	0	1	1
0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	1	1	0	1
0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	1	1	1
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	0	1	1	1
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0	1	0	0	0	1	1
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0	1	0	0	0	1
0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0	1	0	0	1
0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	0	1	0	1
0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	0	1	0	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	1	1	0	1	1	0	1	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0

ПОСТРОЕНИЕ РЕШЕТКИ ЛИЧА, самой плотной известной упаковки шаров в 24-мерном пространстве, основано на показанных выше 24-разрядных двоичных последовательностях. Множество всевозможных сумм по модулю 2 этих 12 последовательностей состоит из 2^{12} , или 4096, двоичных последовательностей, называемых кодовыми словами (при сложении по модулю 2 сумма $1 + 1$ равна 0; цифры, которые при обычном сложении держат в уме и переносят в следующий разряд, в двоичной арифметике игнорируются). Эти 2^{12} кодовых слов образуют эффективный код для передачи информации, разработанный в 1949 г. Марселем Дж. Э. Голеем из US Army Signal Corps. Engineering Laboratories. Центры всех шаров в упаковке Лича находятся в точках вида $2C + 4X$ или $1 + 2C + 4Y$, где C — кодовое слово кода Голея, 1 — и точка $(1, 1, \dots, 1)$ в 24-мерном пространстве, а X и Y пробегает все точки 24-мерного пространства с целочисленными координатами. Сумма координат каждой точки X должна быть четной, а точки Y — нечетной. Радиус каждого шара равен $2\sqrt{2}$, центры шаров, ближайших к началу координат, находятся в точках вида $(\pm 4, \pm 4, 0, 0, \dots, 0)$, $(\pm 2, \pm 2, \pm 2, \pm 2, \pm 2, \pm 2, \pm 2, \pm 2, \pm 2, 0, 0, \dots, 0)$ и $(\pm 3, \pm 1, \pm 1, \dots, \pm 1)$. Каждый шар касается 196 560 других шаров.

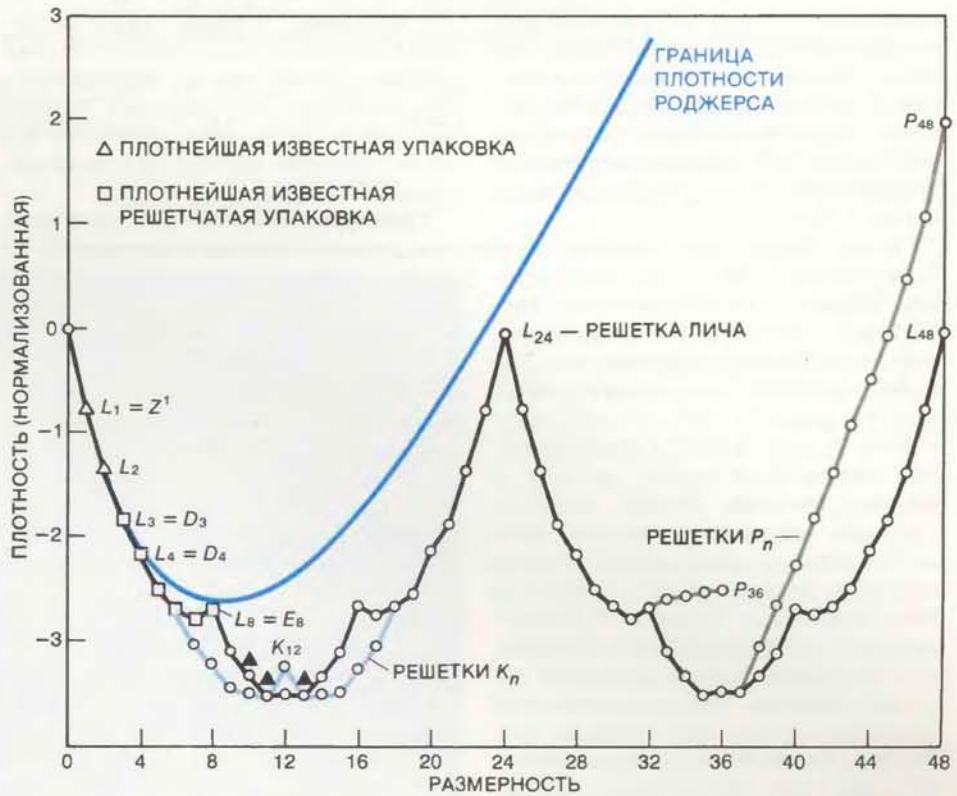
ров в черных точках. Это эквивалентно тому, что центрами шаров новой упаковки будут точки, координаты которых — целые числа с четной суммой. В пространстве произвольной размерности n такая упаковка обозначается D_n . Так, например, в упаковке D_3 начало координат $(0, 0, 0)$ и точка $(1, 1, 0)$ — «законные» центры шаров, а точка $(1, 0, 0)$ — нет, потому что $1 + 0 + 0$ — нечетное число.

Последовательность решетчатых упаковок D_3, D_4, D_5 имеет важное значение для решения проблемы упаковки шаров.

Решетка D_3 — это гранецентрированная кубическая решетка. Построив модель из шариков для пинг-понга, можно убедиться в том, что повторяющейся элементарной ячейкой этой решетки служит куб со стороной 2 с шаром в центре; радиус каждого шара равен $\sqrt{2}/2$. Плотность этой упаковки можно вычислить, подсчитав, какую долю объема куба заполняют шары; она равна $\sqrt{2}\pi/6$, или примерно 0,7405. Хотя не исключено, что в трехмерном пространстве существуют и более плотные упаковки шаров, среди решетчатых упаковок D_3 является плотнейшей: это доказал Карл Фридрих Гаусс в 1831 г. Известно, что в четырех и пяти измерениях D_4 и D_5 также являются плотнейшими решетчатыми упаковками.

Однако в размерностях выше пяти упаковки D_n уже не обладают этим свойством, а в случае D_8 пробелы между шарами так велики, что в эти пробелы можно втиснуть еще один экземпляр такой же упаковки, так что шары останутся неперекрывающимися. В результате получится упаковка E_8 . В 1934 г. Г. Ф. Блехфельдт из Станфордского университета доказал, что E_8 — плотнейшая решетчатая упаковка в восьмимерном пространстве и, более того, что некоторые сечения упаковки E_8 , названные E_6 и E_7 , являются плотнейшими решетчатыми упаковками в шести и семи измерениях. Никаких более плотных упаковок (заведомо нерешетчатых) в пространствах этих размерностей не обнаружено.

В 1965 г. Джон Лич, работавший тогда в Университете г. Глазго, построил замечательную решетчатую упаковку шаров в 24-мерном пространстве. Его построение кратко описано под рисунком на странице 80. Изучение решетки Лича привело к более глубокому пониманию свойств других многомерных решеток и к получению важных результатов в теории групп. Эта решетка почти наверняка дает плотнейшую упаковку в 24-мерном пространстве. К. А. Роджерс, рассуждая по аналогии с трехмерным пространством, нашел верхнюю оценку максимальной плотности упаковки в пространстве произвольной размерности n . В случае $n =$



САМЫЕ ПЛОТНЫЕ ИЗВЕСТНЫЕ УПАКОВКИ шаров в пространствах вплоть до размерности 48 изображены на этом графике, построенном по методу, предложенному Джоном Личем; показана зависимость «нормализованной» плотности упаковки от размерности пространства. Определение нормализованной плотности основано на том факте, что отношение плотности 24-мерной решетки Лича к объёму 24-мерного шара единичного радиуса равно 1. (Объём n -мерного шара радиуса 1 равен $\pi^{n/2}/(1 \times 2 \times 3 \times \dots \times n/2)$ при чётном n и $2(2\pi)^{(n-1)/2}/(1 \times 3 \times 5 \times \dots \times n)$ при нечётном n). Такое отношение в пространстве произвольной размерности n называется плотностью центров D . Нормализованная плотность, показанная на графике, по определению равна $\log_2 D + n(24 - n)/96$; для слоёных решетчатых упаковок график симметричен относительно нормализованной плотности решетки Лича. На графике видно, что плотности упаковок L_3, L_8 и L_{24} очень близки к наилучшей известной верхней границе плотности произвольной упаковки шаров. Слоёные решетчатые упаковки — самые плотные известные упаковки шаров во всех размерностях вплоть до 32, кроме 10—13. Имеется еще одно семейство решеток, обозначенных K_n , которое начинается в L_6 и возвращается к слоеному семейству в L_{18} . В размерностях 11, 12 и 13 упаковки K_n плотнее, чем L_n . Показаны еще упаковки P_n , тоже решетчатые. Однако плотнейшие известные упаковки в размерностях 10, 11 и 13 нерешетчатые; все эти упаковки построены при помощи кодов для передачи цифровой информации.

24 его оценка лишь чуть-чуть больше плотности упаковки Лича. Каждый шар в этой упаковке касается 196 560 других шаров, и в 1979 г. А. М. Одлижко из фирмы Bell Laboratories и я доказали, что это число решает задачу о числе касаний в 24-мерном пространстве. Тем же методом решается эта задача в восьмимерном случае: здесь ответ равен 240 и совпадает с числом шаров, касающихся одного шара в упаковке E_8 . Оба этих результата были независимо получены В. И. Левенштейном из Института прикладной математики им. М. В. Келдыша в Москве. Заметим, что эта задача остается нерешенной во всех других размерностях, кроме 1, 2 и 3 (где ответ равен соответственно 2, 6 и 12).

Решетка Лича оказала неоценимую помощь специалистам по теории групп в построении некоторых конечных про-

стых групп. Эти группы являются «строительными блоками», из которых можно «собрать» любую группу, состоящую из конечного числа элементов. Классификация конечных простых групп, которая только что завершена*, занимала умы многих математиков более полувека. Простые группы играют в теории групп такую же роль, как простые числа в теории чисел или химические элементы в химии. Недавно удалось построить несколько важных простых групп, рассматривая множество всех жестких вращений и отражений решетки Лича, оставляющих непод-

* Читатель, желающий узнать об этом подробнее, может обратиться к книге Gorenstein D. Finite simple groups. — New York: Plenum Press, 1982, перевод которой готовится в издательстве «Мир». — Прим. пер.

вижным некоторый центральный шар и переставляющих окружающие его шары. Это множество операций называется группой симметрии данной упаковки. Аналогичная группа симметрии для трехмерной гранецентрированной кубической решетки показана на рисунках на с. 72 и 73.

Группа симметрии решетки Лича была найдена в 1968 г. Джоном Хортоном Конвеем из Кембриджского университета. Ее порядок, т.е. число элементов этой группы, огромен, хотя для теории групп в этом нет ничего особенного. Он равен $2^{22} \times 3^9 \times 5^4 \times 7^2 \times 11 \times 13 \times 23$, или 8315553613086720000. При помощи этой группы, которая не является простой, Конвей построил три ранее неизвестные простые группы, порядки которых являются делителями ее порядка. В 1981 г. решетка Лича позволила Роберту Л. Гриссу-младшему из Мичиганского университета построить одну из последних конечных простых групп, которые еще оставалось найти. Она оказалась еще больше группы Конвея и была прозвана «монстром». Число элементов этой группы равно $2^{46} \times 3^{20} \times 5^9 \times 7^6 \times 11^2 \times 13^3 \times 17 \times 19 \times 23 \times 29 \times 31 \times 41 \times 47 \times 59 \times 71$, или 80801742479451287588645990496171075700575436800000000. Однако конструкция Грисса отнюдь не является непосредственной, и одна из прелестей решетки Лича в том, что кажется, будто должна существовать более прямая связь между ней и простой группой-монстром.

РЕШЕТКА Лича приводит к такой плотной упаковке, что ее влияние ощущается во всех меньших размерностях. Нет ничего удивительного в том, что «срез» хорошей упаковки дает хорошую упаковку в пространстве предыдущей размерности: например, в одном из «срезов» упаковки D_3 обнаруживается плоскость с гексагонально упакованными кругами. Но подходящие сечения решетки Лича приводят к плотнейшим известным упаковкам во всех размерностях, меньших 24, кроме 10, 11 и 13. Например, в одном ее восьмерном «срезе» получается решетка E_8 .

Если при помощи решетки Лича можно строить плотные упаковки, двигаясь, так сказать, сверху вниз, то соблазнительно узнать, нельзя ли построить решетку Лича снизу вверх, т.е. исходя из плотных упаковок в низших размерностях. Оказывается, это построение возможно, причем есть очень простой способ. Начнем с плотнейшей одномерной упаковки Z^1 . В центре каждого одномерного шара из Z^1 построим двумерный шар радиусом $\frac{1}{2}$. Затем построим второй слой двумерных шаров, идентичный первому, и вставим его в углубления между шарами первого слоя настолько плотно, насколько

это возможно. Уложив таким способом бесконечное множество слоев, мы получим в результате плотную двумерную гексагональную упаковку. Учитывая способ построения, ее можно назвать «слоеной» двумерной упаковкой. Она обозначается L_2 .

Теперь уже ясно, как перейти к трем измерениям: помещаем шар радиуса $\frac{1}{2}$ в центр каждого круга из L_2 , а затем строим идентичные слои и располагаем их над предыдущими так, чтобы заполнить углубления и получить решетку. Поскольку эта упаковка эквивалентна D_3 , «послойная» процедура дает самую плотную известную упаковку и в трехмерном случае. Продолжая действовать таким же способом и дальше и прибавляя каждый раз по одному измерению, мы будем получать очень плотные решетчатые упаковки. Уже давно известно, что L_4 и L_5 эквивалентны D_4 и D_5 , а L_6 , L_7 и L_8 — соответственно E_6 , E_7 и E_8 . Таким образом, слоеные решетки приводят к плотнейшим возможным упаковкам вплоть до размерности 8.

Недавно Конвей и я продвинулись еще дальше: мы нашли все слоеные решетки до размерности 25 включительно и примеры таких решеток в каждой размерности вплоть до 48. Оказалось, что в размерностях до 10 слоеные решетки единственны, а укладывать слои, построенные на решетке L_{10} , можно уже двумя способами. Две 11-мерные слоеные решетки имеют одну и ту же плотность, но разное число касаний. В размерностях 12 и 13 слоеных решеток по три, а в каждой размерности от 14 до 24 — по одной. Слоеная 24-мерная решетка L_{24} — это решетка Лича. При этом только в 11-, 12- и 13-мерных пространствах известны сечения решетки Лича, имеющие большую плотность, чем соответствующие слоеные решетки.

Слоеные решетки строятся слой за слоем, причем каждый новый слой как можно «уютнее» закладывается в углубления предыдущего. Поэтому исследование слоеных решеток тесно связано с задачей о покрытии: увеличим каждый шар упаковки так, чтобы заполнились углубления, и эта упаковка по определению превратится в покрытие. В 1966 г. Лич высказал гипотезу, что если радиус всех шаров упаковки Лича увеличить в $\sqrt{2}$ раз, эти шары покроют все пространство; вполне возможно, что при этом получится оптимальное покрытие 24-мерного пространства. Однако доказать гипотезу Лича было очень трудно, и главным образом из-за сложного характера углублений между шарами в упаковке Лича.

В двумерной решетчатой упаковке L_2 все углубления одинаковые: самая дальняя точка всегда окружена тремя дугами и ни по какому признаку нельзя отличить одно углубление от другого.

В решетке Лича, напротив, имеется 23 различных типа углублений, которые были выделены Конвеем, Ричардом А. Паркером и мною, прежде чем мы смогли доказать гипотезу Лича. Неудивительно, что в 25-мерном пространстве экземпляры решетки Лича можно складывать 23 различными способами: там имеются 23 различные слоеные упаковки. А в 26-мерном пространстве слоеных упаковок уже по крайней мере 75 000.

О размерностях больше 25 известно гораздо меньше. В 1905 г. Герман Минковский доказал, что в пространстве произвольной размерности n существуют решетчатые упаковки плотности большей 2^{-n} . Его доказательство, как и те, которые упоминались раньше, неконструктивно. В низких размерностях это очень грубая оценка: например, для $n = 24$ утверждается только, что существует упаковка с плотностью примерно $6 \cdot 10^{-8}$, в то время как известно, что упаковка Лича более чем в 32 тыс. раз плотнее. С другой стороны, как показано в 1914 г. Блехфельдт, плотность упаковок шаров не может превышать величину, которая при больших n ведет себя примерно как $2^{-0,5n}$. Несмотря на большие усилия, эту оценку не удавалось существенно улучшить. Лишь в 70-х годах советские ученые Г. А. Кабатянский, В. И. Левенштейн и В. М. Сидельников показали, что эта плотность упаковок при очень больших размерностях n не может превышать примерно $2^{-0,599n}$ *

Э. С. Барнс из Аделаидского университета, А. Бос из Эйндховена, Нидерланды (N. V. Philips Gloeilampenfabriek), Конвей, Лич и я построили несколько явных примеров многомерных упаковок, однако ни одна из них не является столь плотной, как обещает теорема Минковского. Недавно Барнсу и мне удалось построить упаковки на основе решетки Лича вплоть до размерности 100 000. Плотность этих упаковок равна, грубо говоря, $2^{-1,25n}$, и на первый взгляд кажется, что эта оценка близка к оценке Минковского. Так, в размерности 65 536 наши упаковки примерно в 10^{40000} раз плотнее, чем любая ранее известная решетчатая упаковка. К сожалению, эта запись в виде степени несколько затемняет тот факт, что мы все еще весьма далеки от намеченной цели. По теореме Минковского существуют упаковки, которые в 10^{40000} раз плотнее наших. Их еще предстоит отыскать.

* Первое продвижение в этом направлении принадлежит В. М. Сидельникову, который получил оценку вида $2^{-0,5096n}$, приведенная ниже более сильная оценка получена позже в совместной работе Г. А. Кабатянского и В. И. Левенштейна. — Прим. ред.

Издательство МИР предлагает:

ИНДУЦИРУЕМЫЕ ЛАЗЕРОМ ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

Под редакцией Дж. Стейнфелда
Перевод с английского



Одна из первых книг по лазерной химии — новому разделу химии высоких энергий, который появился недавно на почве стремительного развития лазерной техники и поиска областей ее применения.

Содержание: Колебательное возбуждение в многоатомных молекулах. Многофотонное инфракрасное возбуждение и реакции органических соедине-

ний. Спекающиеся порошки, получаемые в реакциях, проводимых с помощью лазера. Химические реакции, инициируемые лазером: обзор литературы за 1965—1979 гг.

Для специалистов по лазерной химии и физике, а также для исследователей в области химической физики, электроники, материаловедения.

1984, 22 л. Цена 3 р. 60 к.



Изобретение воздушного шара и рождение современной химии

Первые полеты человека на воздушном шаре, которые состоялись 200 лет назад во Франции, стали возможны благодаря фундаментальным исследованиям свойств газов, выполненным выдающимися химиками того времени

АРТУР Ф. СКОТТ

В ПЕРВЫЕ в свободный полет человек отправился на воздушном шаре, который поднялся из сада замка де ла Мюэт в западном пригороде Парижа 21 ноября 1783 г. Его пассажирами были молодой директор Парижского музея науки Пилатр де Розье и армейский офицер маркиз д'Арланд, имевший широкие связи при дворе Людовика XVI. На наполненном горячим воздухом шаре, построенном братьями Жозефом и Этьеном Монгольфье, они провели в воздухе около 25 мин, пролетев за это время почти 10 км, и благополучно приземлились в открытой местности вблизи дороги на Фонтенбло.

Полет сам по себе был замечательным событием, но помимо этого он как бы подытоживал крупнейшее достижение химии: отказ от флогистонной теории строения вещества, рухнувшей, когда оказалось, что различные газы имеют разный вес. С первыми полетами пилотируемых и беспилотных воздушных шаров тесно связаны имена четырех выдающихся химиков — Жозефа Блэка, Генри Кавендиша, Жозефа Пристли и Антуана Лавуазье, чьи работы открыли путь к ясному пониманию химической природы материи.

Братья Монгольфье жили в Анноне, городке в окрестности Лиона. Они были одержимы идеей полета и пришли к мысли, что если надуть бумажный мешок горячим воздухом, то он может взлететь. В конце 1782 г. братья проделали два предварительных эксперимента, которые показали, что большой мешок, наполненный дымом от костра, должен подняться вверх. Первую публичную демонстрацию братья устроили в Анноне 4 июня 1783 г. Воздушный шар представлял собой сферический льняной мешок, оклеенный бумагой. Он имел в поперечнике 11 м и весил около 227 кг. Шар надули над костром, в котором жгли мелко нарезанную солому. Когда его отпустили, он поднялся довольно высоко и спустился через 10 мин, пролетев за это время около трех километров. Полет произвел на зрителей большое впечатление, и весть об

этом эксперименте облетела Францию и всю Европу.

Спустя два месяца другая группа энтузиастов запустила в Париже шар иного типа. Экспериментом руководил физик Жак Шарль. Зная результаты последних исследований газов, Шарль решил наполнить баллон водородом. Поскольку бумажное покрытие не могло удержать водород, шар был изготовлен из тонкой шелковой ткани, пропитанной латексом. Водород получили, воздействуя серной кислотой на железные опилки. Чтобы полностью надуть шар диаметром 4 м, потребовалось несколько дней и было израсходовано 227 кг кислоты и 454 кг железа. 27 августа посмотреть на запуск шара на Марсовом поле собралась огромная толпа. Шар пробыл в воздухе 45 мин и в конце концов приземлился вблизи местечка Гонесс в 28 км от места старта. Он так напугал местных жителей, что те разорвали его в клочья.

Спустя еще три недели братья Монгольфье повторили свой опыт в Версале, на этот раз в присутствии Людовика XVI и его двора. Наполнить шар горячим воздухом было гораздо проще, чем водородом, и уже через 10 мин он был готов к полету. К нему подвесили небольшую клетку, в которой находились баран, утка и петух. На этот раз шар уже был не просто мешком — его ярко разрисовали масляными красками. Полет закончился в лесу в 3,5 км от места старта. Ни один из первых воздухоплателей не пострадал.

Как только возможность полета на воздушном шаре была доказана, ее практическая реализация не замедлилась осуществиться. В октябре де Розье поднялся на 25 м на привязном монгольфьере и пробыл в воздухе более 4 мин. А месяц спустя он и д'Арланд совершили свой исторический полет над

Парижем. Шарль не хотел уступать и 1 декабря, взяв одного пассажира, отправился из Парижа на шаре, наполненном водородом. Полет продолжался 2 часа и закончился в 50 км от Парижа в маленьком городке Несле. Здесь пассажир сошел, а Шарль продолжил путешествие, поднявшись на высоту более 3,5 км. Всего за какие-то 6 месяцев человек поднялся в воздух и научился летать.

В ПОСЛЕДУЮЩИЕ годы в Европе было совершено множество полетов на воздушных шарах. Особенно замечательный из них принадлежал Жозефу Монгольфье (из двух братьев он один летал на воздушном шаре). Монгольфьер «Флессель» был в то время самым большим воздушным шаром — 55 м в высоту и 30,5 м в окружности. За 17 мин шар наполнили горячим воздухом от костра, и он поднял 7 человек на высоту более 900 м.

Воздухоплавание стремительно развивалось. В августе 1784 г. французский химик Гитон де Моро и сопровождавший его аббат Бертран достигли высоты более 3 км, измеряя по пути температуру и давление воздуха. В январе следующего года французский воздухоплаватель Жан Пьер Бланшар и американский врач Джон Джеффрис впервые пересекли Английский канал, перелетев из Дувра в Кале.

После полета в Анноне Французская академия наук по просьбе правительства создала комиссию, которая должна была подготовить доклад об этом эксперименте и разработать план дальнейших исследований. Видным членом комиссии был Лавуазье — французский химик, чьи научные открытия наряду с открытиями других ученых послужили основой для создания первых воздушных шаров. Правительство Франции,

ПЕРВАЯ ПУБЛИЧНАЯ ДЕМОНСТРАЦИЯ полета воздушного шара, наполненного горячим воздухом, представлена на гравюре в нескольких фантастическом виде. Опыт был проведен братьями Жозефом и Этьеном Монгольфье 4 июня 1783 г. в Анноне (Франция). Шар представлял собой сферический льняной мешок, оклеенный бумагой, имел 11 м в поперечнике и весил 227 кг. Его наполнили горячим воздухом над костром. Полет продолжался 10 мин.





ПЕРВЫЙ ПОЛЕТ ЧЕЛОВЕКА на воздушном шаре, наполненном горячим воздухом, состоялся в Париже 21 ноября 1783 г. Затеяливо разрисованный шар, построенный братьями Монгольфье, имел 14 м в поперечнике и более 21 м в вы-

соту. Корзина с двумя пассажирами, Пилатром де Розье и маркизом д'Арландом, весила около 730 кг. Принято считать, что это вид с террасы дома Бенджамина Франклина в Пасси.

по-видимому, сочло изобретение воздушного шара крупным достижением, так как взяло на себя расходы по проведению ряда последующих полетов, запланированных комиссией.

Реакция английских ученых на изобретение воздушного шара была более сдержанной. В ноябре 1783 г. королю Георгу III и его придворным в Виндзоре был продемонстрирован воздушный шар, наполненный водородом. Шар произвел на короля большое впечатление, и он направил президенту Лондонского Королевского общества сэру Джозефу Бэнксу послание, в котором предлагал финансировать дальнейшие исследования в области воздухоплавания. Однако ответ гласил, что, поскольку от этих экспериментов нельзя ожидать «какой бы то ни было пользы», общество в них не заинтересовано.

В то же время военное значение воздушных шаров оценили быстро. Не прошло и месяца после зрелища в Виндзоре, как был опубликован памфлет, посвященный этому вопросу. Вскоре Бенджамин Франклин высказался в письме следующим образом: «Изобретение воздушного шара, как Вы видите, является открытием первостепенного значения. Одним из его следствий может стать отказ монархов от войн, так как и самые могущественные из них не смогут защищать свои владения. Пять тысяч шаров, способных поднять по два человека каждый, вряд ли будут стоить дороже пяти линейных кораблей, а где найдется властитель, который мог бы покрыть свою страну войсками, способными защитить ее от десятка тысяч воинов, спустившихся с неба во многих местах и готовых нанести государству непоправимый ущерб прежде, чем удастся собрать войска и дать им отпор?»

В ПЕЧАТЛЯЮЩИЕ достижения воздухоплавания были неизбежным следствием глубоких изменений в понимании устройства мира. В то время единственной наукой, достойной претендовать на это понимание, была механика, в частности небесная механика, изучающая движение небесных тел. Химия еще только освобождалась от алхимических догм, а биология и другие естественные науки находились в ранней наблюдательной стадии развития. Это было время, когда ученый еще мог быть специалистом во всех областях знания и по праву именовался натурфилософом. Четыре таких натурфилософа сыграли огромную роль в изобретении воздушного шара. Это Блэк, Кавендиш, Пристли и Лавуазье, которых сегодня назвали бы химиками.

Любого, кто знаком с современной наукой, примитивное состояние знаний в области химии в начале XVIII в. при-



БРАТЯ МОНГОЛЬФЬЕ: слева — Жозеф, справа — Этьен (гравюра XIX в.). Во время первой публичной демонстрации их воздушного шара Жозефу было 43 года, а Этьену — 38 лет. Изображение Этьена скопировано с портрета работы его дочери.

вело бы в замешательство. Основная идея алхимии о том, что вся материя состоит из четырех элементов — воздуха, земли, огня и воды, — все еще оставалась популярной. Это простая мысль, впервые высказанная в «Физике» Аристотеля двадцатью веками раньше, предполагала возможность превращения одних видов материи в другие. Результатом этого были, например, тщетные поиски философского камня, якобы способного превращать железо и свинец в золото. Другим отпрыском аристотелевых идей являлась теория флогистона, которая продолжала туманить и путать мышление химиков в течение большей части XVIII в.

Теория флогистона была призвана объяснить природу огня. Уже на самых ранних стадиях своего развития человек знал, что одни вещества горят, а другие нет. Алхимики заметили, что при достаточно сильном жаре горят даже благородные металлы, причем после них остается окалина, или зола, которую уже никак не удастся сжечь. Почему?

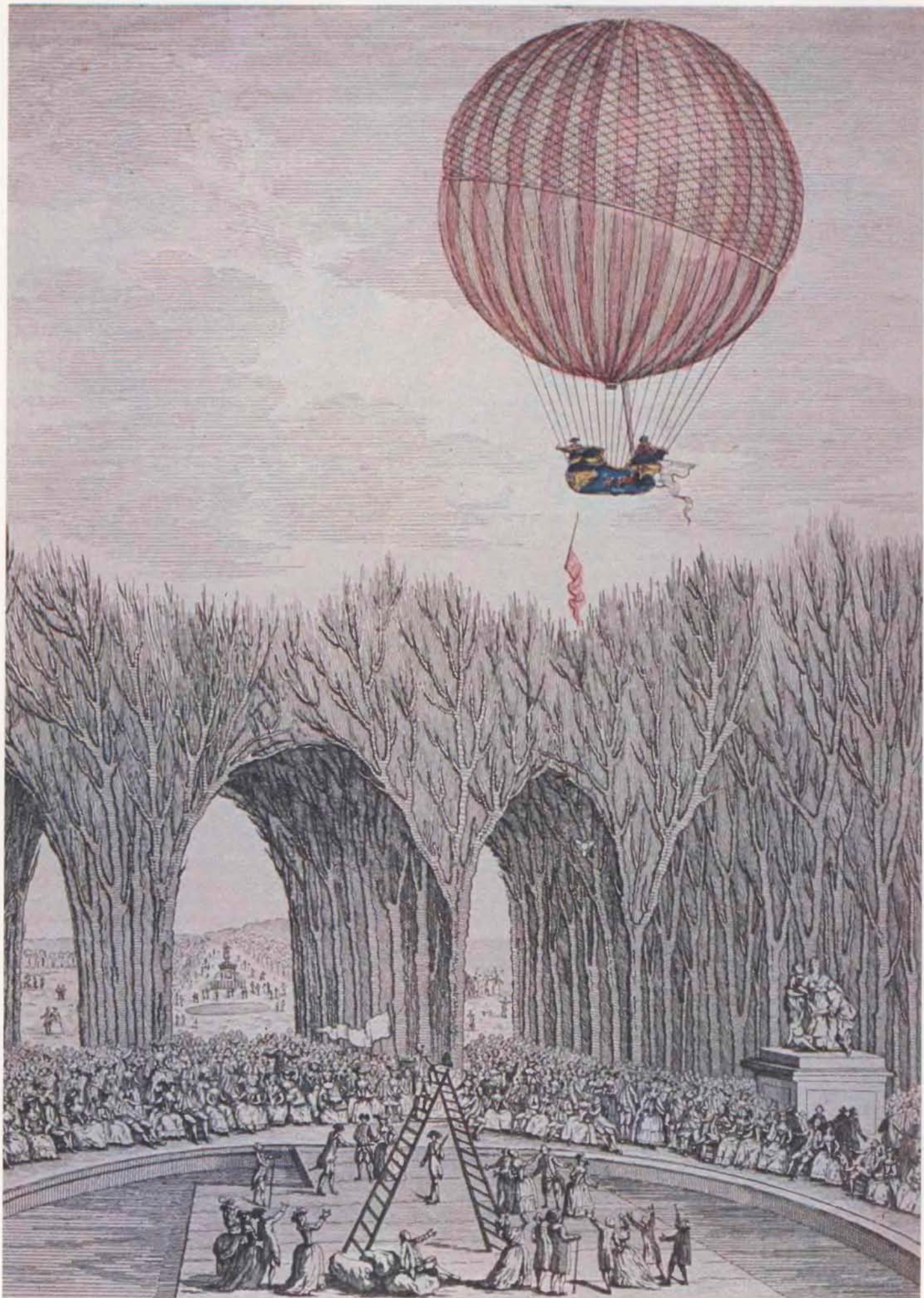
В первой четверти XVIII в. Георг Шталь дал этому объяснение, развил идею, которую ранее выдвинул его учитель Иоганн Бехер. Бехер включил в число аристотелевых элементов *terra pinguis* — «жирную землю», которая, как он предполагал, выделяется из вещества при его горении. Шталь пошел дальше, высказав утверждение, что любой металл не что иное, как соединение окислы с «жирной землей». С этой точки зрения горение представляло собой выделение содержащейся в теле «жирной земли», которую Шталь переименовал во флогистон, что по-гречески значит «горючий».

Теория флогистона была весьма гибкой и могла многое объяснить. Она, например, давала ответ на вопрос, по-

чему окалина, нагретая с древесным углем, вновь превращается в исходный металл: уголь, будучи горючей субстанцией, богат флогистоном, в то время как в окалине, которая не горит, его нет. Следовательно, уголь отдает свой флогистон окалине, делая ее вновь металлом, а сам превращается в золу. Успешные объяснения вроде этого способствовали всеобщему признанию теории флогистона, которая удержала господство в химии на протяжении большей части следующего столетия.

Блэк, Кавендиш, Пристли и Лавуазье были убежденными сторонниками теории флогистона, когда приступали к своим занятиям химией. Однако первые трое в основном занимались экспериментальными исследованиями, результаты которых часто толковали с позиций теории флогистона. И только Лавуазье был достаточно проницателен, чтобы увязать открытия и известные факты в новую систему химических представлений, где не было места флогистону. По иронии судьбы Кавендиш и Пристли, не менее других способствовавшие своими трудами развенчанию теории флогистона, до конца своих дней оставались ее сторонниками. И в 1800 г., когда уже хорошо была известна роль кислорода в горении, Пристли оставался верен этой теории. Свою последнюю книгу он назвал «Доктрина флогистона обоснована».

ПЕРВЫЕ сомнения в правильности химических представлений Аристотеля возникли после опытов Яна Ван-Гельмонта, который опубликовал результаты своих исследований в начале XVII в. Хотя и раньше алхимики знали, что при горении древесного угля или в результате брожения образуются газы, они принимали их за разновидность обычного воздуха. С помощью



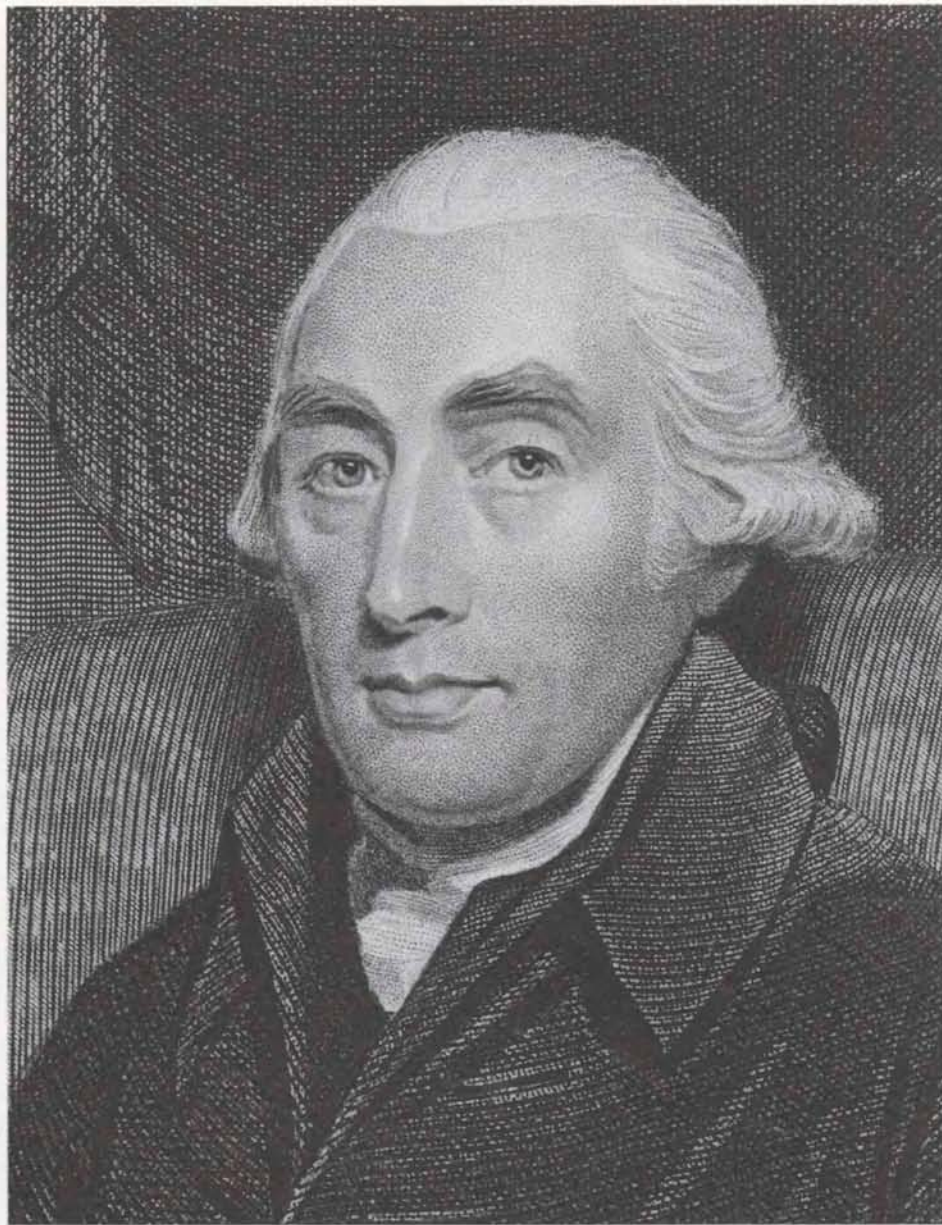
простых химических опытов Ван-Гельмонт получил газы, которые явно отличались от воздуха. Он образно назвал их ветровым, жирным и дымным газами. Ван-Гельмонт не пытался анализировать или выделять эти газы в чистом виде, однако именно он ввел в научный обиход термин «газ». Изучение свойств газов превратилось в самостоятельный раздел химии, получивший название пневматической химии, основоположником которой обычно считают Ван-Гельмонта.

До середины XVIII в. в пневматической химии не было получено каких-либо выдающихся результатов. Затем ее развитие резко ускорилось и пошло в новом направлении, и поразительные результаты стали появляться один за другим. Шведский химик XVIII в. Торберн Бергман писал об этом так: «За последние десять лет химия не только вторглась в область невидимой воздушной материи, но осмелилась изучить ее природу и познать принципы ее строения». Действительно, к 1779 г., когда были написаны эти слова, уже имелись надежные данные о химическом строении восьми газов.

Хотя Блэк, Кавендиш, Пристли и Лавуазье работали независимо, их вклады в науку взаимно дополняли друг друга и вместе составили то, что мы теперь называем научной революцией. Первой в последовательности открытий была работа Блэка. В 50-х годах XVIII в., будучи студентом-медиком в Эдинбурге, он предпринял тщательное изучение газа, выделяющегося при действии кислот на твердую магнезию (карбонат магния). Его главной целью было понять нейтрализующее действие магнезии. Но попутно в ходе работы выяснилось, что выделяющийся газ отнюдь не был атмосферным воздухом.

Новое вещество Блэк назвал «связанным воздухом», поскольку оно казалось связанным, так сказать, запертым внутри магнезии. Никто не знал тогда, что этот газ является соединением химических элементов; лишь через несколько десятков лет в соответствии с составом он был назван двуокисью углерода. Пропуская пузырьки газа через известковую воду и наблюдая образование белого осадка, Блэк показал, что связанный воздух высвобождается при горении древесного угля, дыхании и брожении. (Впоследствии Блэк стал

ПЕРВЫЙ ПОЛЕТ пилотируемого воздушного шара, наполненного водородом. Шар был запущен в саду Тюильри в Париже 1 декабря 1783 г. Пассажирами были Жак Шарль и его помощник М.-Н. Робер. Полет продолжался около 2 ч, после чего Робер сошел на землю, а Шарль, продолжив полет в одиночестве, поднялся на высоту более 3,5 км.



ДЖОЗЕФ БЛЭК (1728—1799). Его работы предварили открытия, которые привели к изобретению воздушного шара. В 50-х годах XVII в., будучи студентом-медиком в Эдинбурге, он показал, что газ, выделяющийся при действии кислот на твердую магнезию, является самостоятельным химическим веществом, отличным от атмосферного воздуха. Новое вещество, которое он назвал «связанным воздухом», впоследствии было переименовано в двуокись углерода. (Гравюра на стали — копия с картины сэра Генри Рэберна.)

одним из ведущих химиков-теоретиков своего времени; был профессором химии в Глазго, а затем вернулся в Эдинбург в той же должности.)

Одним из первых ученых, изучивших свойства связанного воздуха, стал Кавендиш. Это был типичный натурфилософ того времени — богатый и эксцентричный отшельник. Унаследовав огромное состояние (одно время он считался одним из самых богатых людей в Англии), Кавендиш предпочитал жить в одиночестве и заниматься экспериментами. В 1766 г. он опубликовал три работы, озаглавленные «Эксперименты с искусственным воздухом». Так Кавендиш называл любой газ, «заключенный в других телах... и выделяющийся из них при химических превращениях». До Кавендиша был изве-

стен только один искусственный газ — связанный воздух Блэка. Кавендиш добывал связанный воздух методом Блэка, добавляя к магнезии кислоту, и первым стал собирать пробы газов в пузырьки, сделанные из внутренностей животных. Взвешивая пузырь, наполненный сначала атмосферным, а затем связанным воздухом, Кавендиш обнаружил, что последний в 1,47 раза тяжелее первого.

Толкаемый любопытством, он пошел дальше. Что произойдет, если магнезию в опытах Блэка заменить неблагородным металлом, например железом? Как и прежде, в растворе наблюдались пузырьки газа, и Кавендиш собрал их в сосуд. Однако этот искусственный газ не вызывал помутнения известковой воды и оказался в

11 раз легче воздуха. Более того, он не гасил огонь, как связанный воздух, а наоборот, при соприкосновении с ним взрывался. Было совершенно ясно, что открыт новый вид искусственного газа. В соответствии с его особенностями Кавендиш назвал его «горючим воздухом».

Работы Блэка и Кавендиша окончательно доказали, что газы являются самостоятельными химическими веществами. Далее уже нельзя было считать воздух одним из элементов материи. Но как насчет земли, огня и воды?

Приблизительно в то же время молодой французский аристократ Лавуазье решил поставить простой эксперимент, который показал, что и «земля» вовсе не элемент материи. Алхимики обосновывали «элементарность» земли длительным кипячением воды в запаянном «пеликане» (так называли ре-

тORTы за их внешнее сходство с этой птицей). В конце концов на дне сосуда появлялось небольшое количество твердого вещества, что трактовалось как превращение воды в землю.

Лавуазье решил проверить этот вывод с помощью аналитических весов. Он взвесил пустой «пеликан» и влил в него некоторое количество дистиллированной воды. Запаяв сосуд и взвесив его вместе с водой, он путем вычитания получил вес воды. Затем он кипятил в этом сосуде воду на медленном огне в течение 101 дня. По истечении этого срока Лавуазье опять взвесил сосуд с водой и без нее. Общий вес не изменился, однако на дне сосуда появился осадок, вес которого был равен потере веса пустого сосуда. Очевидно, «земля» образовалась вследствие выщелачивания вещества из стекла сосуда, а не из воды. Вместе с работами

Блэка и Кавендиша эксперимент Лавуазье вызвал серьезные сомнения в справедливости алхимической теории Аристотеля.

Последний этап научной революции определился рядом новых открытий в пневматической химии, главную роль в которых сыграл Пристли. Это был талантливый и разносторонний человек. Священник-нонконформист, он сменил ряд профессий: был журналистом, писателем (автором 106 книг) и химиком. В 1772 г. он опубликовал работу под названием «Наблюдение различных видов воздуха», в которой описал способы получения нескольких ранее неизвестных газов. В следующем десятилетии, которое как раз и предшествовало изобретению воздушного шара, к этому списку Пристли добавил еще восемь газов.

ДОСТИЖЕНИЯ Пристли стали возможны благодаря усовершенствованию метода сбора газов. Раньше химики собирали газы в наполненный водой сосуд, который перед этим осторожно переворачивали, не вынимая из другой емкости с водой. По мере того как газ накапливался в верхней части перевернутого сосуда, вода из него вытеснялась в нижний сосуд. Однако растворимые в воде газы таким способом собирать было нельзя. Заменяв воду ртутью, Пристли смог получить и проанализировать многие новые газы.

Свое самое значительное открытие Пристли сделал в 1774 г. Сфокусировав 30-сантиметровой линзой солнечный свет, он нагревал красный осадок ртути — порошкообразное вещество, давно известное алхимикам. Так же как и в опытах Блэка со сжиганием древесного угля, в опытах Пристли выделялся газ, но это был уже не связанный воздух. Газ обладал своими замечательными свойствами: свеча в нем горела ярче, а мышь могла прожить вдвое дольше, чем в таком же количестве атмосферного воздуха.

Будучи убежденным сторонником флогистонной теории горения, Пристли интерпретировал эти результаты как проявление свойств флогистона. Как мы знаем, упомянутая теория предполагала, что при горении вещества из него истекает флогистон. Пристли решил, что он переходит в новый газ. Следовательно, этот газ должен иметь недостаток флогистона, и Пристли назвал его «дефлогированным воздухом». Это название продержалось недолго. Вскоре в лаборатории Лавуазье новый газ был переименован в кислород, который стал центральной фигурой в современной химии.

Примерно в то же время Лавуазье начал серьезно задумываться над правильностью флогистонной теории. В 1772 г. он написал мемуар о горении се-



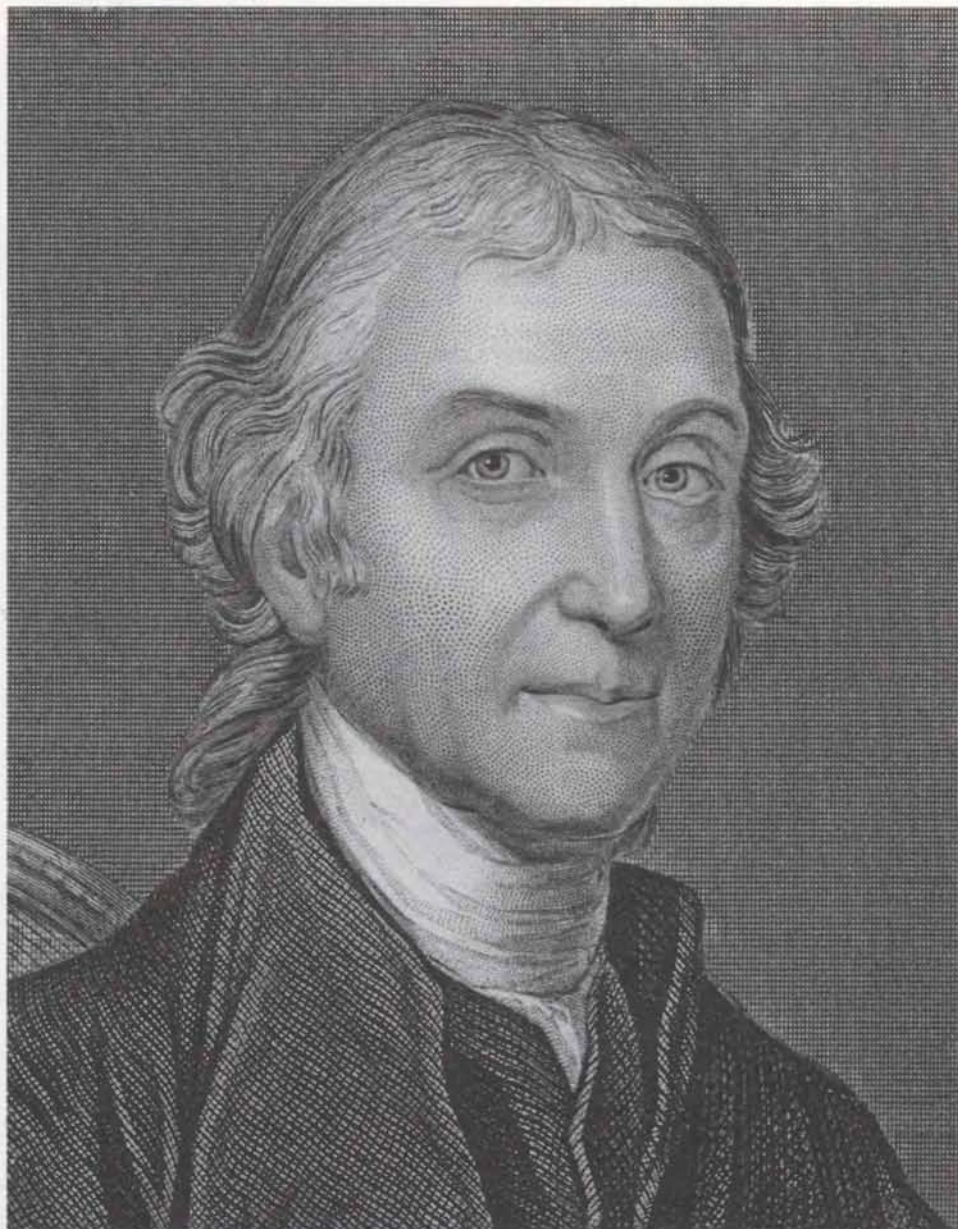
ГЕНРИ КАВЕНДИШ (1731—1810) исследовал свойства связанного воздуха и другого «искусственного воздуха», который он назвал «горючим воздухом». Последний оказался в 11 раз легче атмосферного воздуха и позднее был переименован в водород. (Этот рисунок У. Александера — единственный известный прижизненный портрет Кавендиша. Хранится в Британском музее.)

ры и фосфора на воздухе. Вновь прибегнув к помощи аналитических весов, Лавуазье установил, что вес обоих веществ увеличивается при горении, и объяснил это их соединением с воздухом. В своем мемуаре Лавуазье писал: «. . . то, что мы наблюдаем при горении серы и фосфора, вполне может происходить и со всеми другими веществами. . . и я думаю, что окалина тяжелее чистого металла по той же причине». В соответствии с этим выводом Лавуазье обнаружил, что при нагревании свинцовой окалины (оксида свинца) с древесным углем «превращение окалины в металл сопровождается выделением большого количества газа». Эти наблюдения и рассуждения прямо противоречили теории флогистона, согласно которой при горении вещества выделяется флогистон и, следовательно, вещество должно терять в весе. Понимая еретичность своих идей, молодой Лавуазье направил свой мемуар во Французскую академию наук в запечатанном конверте, чтобы утвердить за собой приоритет, если дальнейшие исследования подтвердят правильность его революционных выводов.

Зрелые взгляды Лавуазье на теорию горения были опубликованы им в знаменитом мемуаре «Рассуждения о флогистоне». В нем он суммировал свои многочисленные аргументы против флогистонной теории. У него было достаточно оснований, чтобы написать: «Единственная моя цель в этом мемуаре — развить теорию горения, о которой я сообщал в 1777 г., а также показать, что флогистон Штала — воображаемая субстанция, что его присутствие в металлах, сере, фосфоре и всех горючих телах является беспочвенным предположением, а все факты, связанные с горением и образованием окалины, могут быть гораздо проще и легче объяснены без него».

Объяснение, данное Лавуазье, было действительно простым: при горении происходит вовсе не выделение флогистона, а наоборот, присоединяется кислород, входящий в состав воздуха. Гипотеза Лавуазье объясняла все известные факты, связанные с горением. Она и количественно объясняла увеличение веса веществ при горении: приращение в точности равно весу кислорода, вступившего в реакцию.

К ЭТОМУ времени результаты исследований в области пневматической химии начали широко распространяться. Быстро шел прогресс в понимании строения материи, открывались газы, обладающие новыми необычными свойствами. Хорошо зная свойства связанного воздуха Блэка, Пристли растворил его в воде и обнаружил, что получился приятный на вкус напиток. Новая «содовая вода» быстро вошла в моду и стала пользоваться большой



ДЖОЗЕФ ПРИСТЛИ (1733—1804) в течение десятилетия, предшествовавшего изобретению воздушного шара, сумел выделить в чистом виде еще восемь газов. Будучи сторонником флогистонной теории горения, Пристли назвал свое главное открытие — кислород — «дефлогированным воздухом».

популярностью в европейском обществе. Братьям Монгольфье также были известны последние достижения пневматической химии, и они размышляли над тем, как использовать их для создания воздушного шара. Научную революцию в химии и идею воздушного шара увенчало еще одно важное открытие.

Произошло это в Англии. Вслед за Пристли Кавендиш применил электрический разряд для изучения новых газов. Его особенно интересовал легкий газ, который он открыл ранее, горючий воздух. В своих опытах он пропускал электрическую искру через смесь этого газа с обычным воздухом. Разряд сопровождался вспышкой голубого пламени, после которой объем газа резко сокращался и образовывалось немного жидкости, которую Кавендиш назвал росой.

Именно эта роса привлекла его внимание, и, чтобы получить ее в большем количестве, Кавендиш поставил другой эксперимент. Он писал, что полученное вещество «не имело ни вкуса, ни запаха и . . . при испарении не оставляло заметного осадка; не издавало оно острого запаха и при испарении; короче говоря, это была, по-видимому, чистая вода». Последующие исследования подтвердили правильность его вывода.

Эти классические опыты были закончены в 1781 г., однако их результаты были доложены в Королевском обществе только в 1784 г. Кавендиш отложил официальную публикацию, так как хотел сначала убедиться, что при замене обычного воздуха дефлогированным полученная вода приобретает кислотные свойства. Через некоторое время Кавендиш установил, что причиной тому была азотная кислота, состав

которой он и определил впервые.

Кавендиш показал, что вода образуется из горючего воздуха и дефлогированного воздуха при сгорании смеси этих газов. Однако для него, убежденного сторонника теории флогистона, это открытие вовсе не означало, что вода является соединением водорода с кислородом. Он писал: «По-видимому, имеются все основания полагать, что дефлогированный воздух — это всего лишь вода, лишенная флогистона, а горючий воздух, как указывалось ранее, представляет собой либо обогащенную флогистонем воду, либо флогистон в чистом виде, но скорее всего первое». Иначе говоря, Кавендиш был убежден, что вода присутствует непосредственно в обоих типах «воздуха» и высвобождается при их взаимодействии. Флогистон же переходит из богатого им горючего воздуха в дефлогированный воздух, в котором флогистона мало.

12 ноября 1783 г. Лавуазье зачитал на общем собрании Академии наук до-

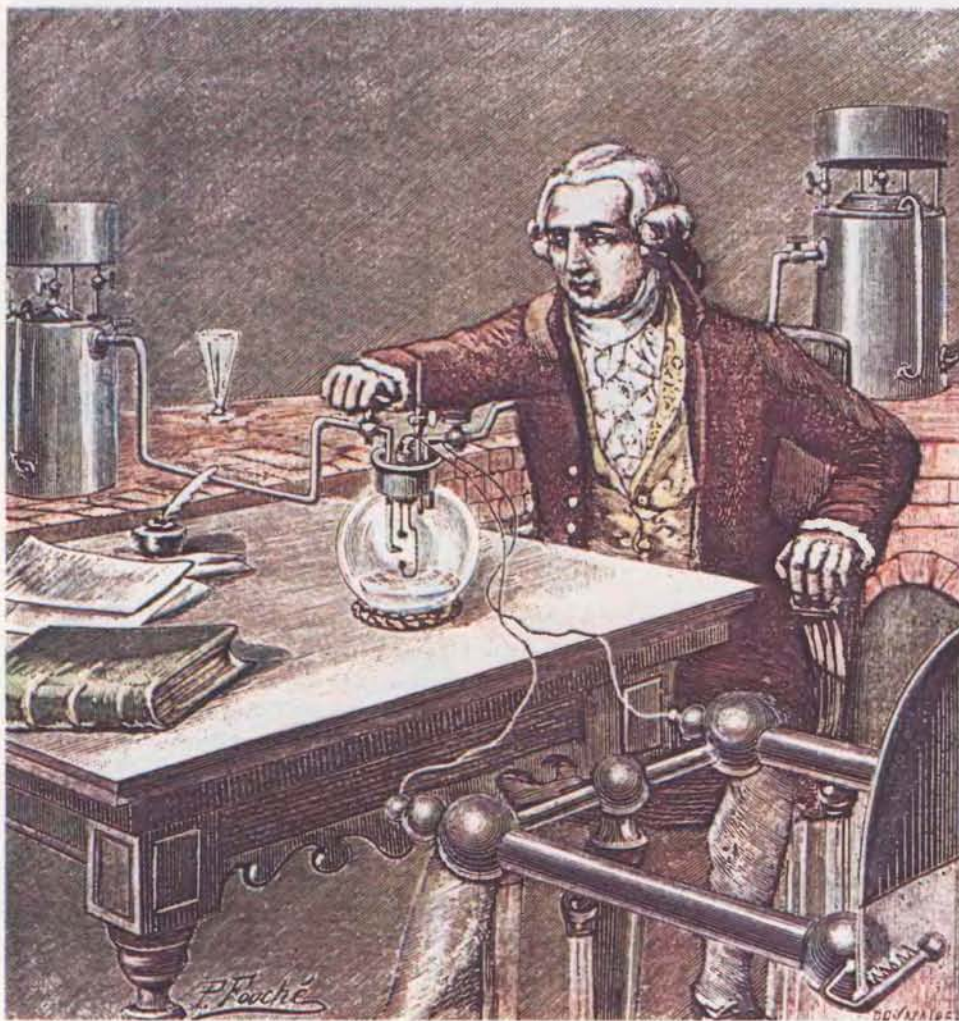
клад с длинным названием «О природе воды и экспериментах, по-видимому подтверждающих, что это вещество не является, строго говоря, элементом, а может быть разложено и образовано вновь». Хотя методы исследования, которыми пользовался Кавендиш, были совершенней, а полученные им результаты значительнее, чем у Лавуазье, однако именно Лавуазье первым решился отойти от старых догм и высказал мысль, что вода является соединением водорода и кислорода. Лавуазье придумал также остроумный эксперимент, показывающий, что воду можно разложить на составляющие ее элементы. Для этого он исследовал реакцию водяного пара с раскаленным докрасна железом (для чего был использован орудийный ствол); при этом вода разлагается с образованием водорода и окиси железа. Поставив вспомогательный эксперимент и убедившись, что раскаленная медь не реагирует с водой, он смог осуществить задуманный опыт.

Лавуазье взял медную трубку, в которую был насыпан мелкий железный порошок, и, раскалив ее докрасна, влил предварительно взвешенную порцию воды. Неразложившаяся часть пара конденсировалась, и Лавуазье ее взвесил, а газообразную фракцию (водород) собрал над водой и измерил ее количество. Наконец, был взвешен железный порошок, находившийся в медной трубке, и определено приращение его веса. На основании этого эксперимента Лавуазье пришел к выводу, что вода состоит из одной весовой части водорода и 6,5 весовых частей кислорода. [Правильное соотношение 1:8.] Эти наглядные опыты, доказавшие, что воду можно разложить на элементы и «сложить» опять, убедительно подтвердили правильность предложенной Лавуазье концепции строения материи и нанесли теории флогистона удар, от которого она уже не оправилась. Более того, эти опыты означали конец четырех аристотелевых элементов.

Ободренный результатами эксперимента, Лавуазье смог приступить к созданию новой, логически обоснованной системы химических представлений. Он изложил ее в «Начальном учебнике химии», вышедшем в свет в 1789 г. В этой книге Лавуазье привел список 33 элементов, включающий водород и кислород. Все элементы, кроме двух, вошли и в современную периодическую систему. Появление этой книги ознаменовало рождение современной химии.

Если вспомнить историю запусков первых воздушных шаров, то влияние происшедшей в химии революции на прогресс воздухоплавания, и особенно на создание воздушных шаров, наполняемых водородом, становится очевидным. И все же взаимосвязь этих двух процессов лежит еще глубже. Хотя история водородных воздушных шаров началась в лаборатории Кавендиша, который первым добыл «горючий воздух» и установил, что он гораздо легче атмосферного воздуха, пионером использования этого открытия для создания объектов легче воздуха был Блэк. Вот как описывал простой опыт Блэка выдающийся химик того времени Томас Томсон, занявший место Блэка в Глазго:

«Вскоре после появления работы Кавендиша, в которой он приблизительно определил удельный вес водорода, показав, что этот газ по меньшей мере в десять раз легче атмосферного воздуха, доктор Блэк пригласил нескольких своих друзей на ужин, пообещав продемонстрировать нечто любопытное. Среди гостей были доктор Хаттон, мистер Кларк из Элдена и сэр Джордж Кларк из Пенникуика. Когда компания собралась, доктор Блэк позвал всех в одну из комнат. Здесь он наполнил водородом пузырь, сделанный из аллантоиса (плодного пузыря коровы), кото-



АНТУАН ЛАВУАЗЬЕ (1743—1794) изображен во время проведения эксперимента по определению состава воды путем поджигания смеси водорода и кислорода электрической искрой (гравюра XIX в.). Лавуазье окончательно развенчал флогистонную теорию горения и установил истинный состав воды. Он сыграл также большую роль в планировании и анализе результатов первых экспериментов с воздушными шарами, будучи членом специальной комиссии, созданной с этой целью Французской академией наук в июле 1783 г.

рый, как только его отпустили, поднялся к потолку и оставался там как приклеенный. Явление казалось легко объяснимым. Все решили, что к пузырю привязана тонкая черная нитка, пропущенная через отверстие в потолке, что кто-то наверху подтянул пузырь за нитку к потолку и удерживает его в таком положении. Объяснение было настолько естественным, что с ним согласилась вся компания, хотя, как и многие другие правдоподобные объяснения, оно оказалось неверным: достав пузырь, все убедились, что никакой нитки нет».

Уже позже, в 1784 г., Блэк написал письмо, в котором так изложил ход своих мыслей: «Поскольку Вы говорите о «зарождении» аэростатических экспериментов, я позволю себе изложить более подробно свои мысли на этот счет. Прежде всего, хотя то, что я Вам сообщил ранее, абсолютно верно, я отнюдь не претендую на честь изобретения аппаратов для летания вообще и для путешествий в частности. Опыт с пузырем, который я продемонстрировал как удивительное следствие открытия мистера Кавендиша, настолько прост, что его мог придумать любой; но я, конечно, никогда не думал о создании огромных искусственных пузырей или об использовании их для подъема тяжелых грузов или людей в воздух. У меня не было ни малейшего подозрения, что где-либо об этом подумывают, пока до нас не дошли слухи, что такие попытки делаются во Франции, и я несколько не сомневаюсь, что сообщения газет совершенно правдивы, а именно что господина Монгольфье [sic] придумали некоторое время назад способ летать по воздуху с помощью очень большого мешка или шара, наполненного обыкновенным воздухом, расширившимся в результате нагревания огнем.

Поскольку в основе этой идеи лежит давно известный принцип, не имеющий никакого отношения к открытию мистера Кавендиша, то можно только удивляться, что господина Монгольфье не реализовали ее раньше. Поэтому я думаю, что, хотя такой замысел мог появиться у него уже давно, он никогда не пытался его осуществить, пока другие не начали думать о полетах с помощью горячего воздуха. Я не могу сказать, кто первый придумал этот способ, поскольку, признаюсь, не читал об этих экспериментах; они никогда меня несколько не интересовали».

КАКИЕ ЖЕ соображения навели братьев Монгольфье на мысль предпринять свои опыты с шарами, наполненными горячим воздухом? На этот вопрос ответить труднее; об истинных причинах можно только догадываться. Джеймс Глейшер в энциклопедии «Британника» издания 1878 г. пишет:

«Братья Монгольфье думали, что их мешок поднялся вверх благодаря летучести дыма или других паров, выделяющихся при горении соломы, и лишь некоторое время спустя стало ясно, что подъемная сила появляется в результате различия в весе одинаковых объемов горячего и холодного воздуха». Видимо, братья Монгольфье предполагали, что выделяющиеся при горении соломы пары представляют собой горячий воздух или что-нибудь в этом роде. Однако Блэк разбирался в этом лучше. В своем письме он ясно указал, что нагретый воздух просто более разрежен.

Есть и другие сведения о том, что, ставя свои эксперименты, братья Монгольфье заблуждались относительно природы дыма и паров, образующихся при горении. В переписке адвоката сэра Джона Синклера, принимавшего активное участие в политической жизни того времени, находим следующее сообщение: «В конце 1785 г. некоторые обстоятельства заставили меня предпринять короткую поездку из Лондона в Париж, где случай свел меня с тремя замечательными иностранцами, а именно с Аргандом, широко известным своими усовершенствованиями в искусстве изготовления ламп, владельцем крупнейшей мануфактуры по производству бумажных обоев Ревейоном . . . и [Жозефом] Монгольфье — знаменитым изобретателем воздушного шара. Я многое почерпнул из бесед с этими умными людьми. Особенно запомнился рассказ последнего о его открытии, суть которого в следующем.

Монгольфье сказал, что они с братом занимались производством бумаги в Лангедоке, но что сам он всегда очень интересовался химическими экспериментами. Поэтому братья стремились узнать все, что делается в этой области. По всей вероятности, Монгольфье и его брат давно уже обсуждали между собой возможность подняться в воздух самим или отправить в полет большой груз, но не делали, однако, каких-либо экспериментов для подтверждения реальности этого замысла; однако, прочитав случайно сообщение об экспериментах доктора Блэка, проливающих свет на природу различных видов воздуха или газов, и, в частности, о том, что последние имеют разный вес, он сразу сказал своему брату: «Кажется, один химик за границей доказал осуществимость того, о чем мы с тобой говорили». Таким образом, важно уяснить, что если бы не открытие доктора Блэка, то оба Монгольфье, вероятно, и не пытались бы провести свои опыты. Это я утверждаю со слов старшего Монгольфье — одного из самых искренних и одаренных людей, с которыми мне довелось встречаться; он всегда отзывался о докторе Блэке с большим уважением, которое тот, конечно, заслуживал».

Издательство МИР предлагает:

А. Брус, Р. Каули СТРУКТУРНЫЕ ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ

Перевод с английского

Монография посвящена изложению современной микроскопической теории критических явлений при структурных фазовых переходах. Результаты теории сопоставляются с последними экспериментами по рассеянию нейтронов, рентгеновских лучей, света. Особое внимание обращено на не решенные еще проблемы теории и наблюдаемые в экспериментах явления, не нашедшие однозначного теоретического объяснения. Книга написана с большим педагогическим мастерством.

Для научных работников, изучающих структурные, в том числе сегнетоэлектрические фазовые переходы, а также для широких кругов физиков, физико-химиков, аспирантов и студентов, интересующихся физикой твердого тела.

1984, 25 л. Цена 2 р. 80 к.

Л. Леймит МАКЕТНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ

Перевод с английского

Описываются методы повышения качества проектирования объектов и заводов металлургической, химической и нефтеперерабатывающей промышленности, основанные на пространственном мелкомасштабном макетировании с использованием типовых узлов и деталей. Особый интерес представляет применение макетов при решении вопроса о рациональном размещении оборудования, что позволяет обеспечить нормальные условия его монтажа, регулировки и эксплуатации.

Для инженеров, проектирующих заводы и предприятия, а также аспирантов и студентов соответствующих специальностей вузов.

1984, 48 л. Цена 3 р. 90 к.



Наука вокруг нас

Спектры уличных светильников как иллюстрация к основным принципам квантовой механики

ДЖИРЛ УОЛКЕР

СПЕКТРОСКОПИЯ явилась для физиков своего рода «розеттским камнем», давшим ключ к пониманию строения атомов и молекул. Зародившись как загадка цветов спектра Солнца, она ушла корнями в тайну энергий и длин волн и, наконец, после трех стадий развития распустилась цветком квантовой механики. Теперь и физик-любитель может «заглянуть» внутрь атома. Путем простых опытов можно исследовать переходы в атоме, которыми обусловлен видимый спектр. Например, можно изучать атомные спектры натрия и ртути, используя излучение лабораторных ламп или уличных светильников, которые бывают двух типов — натриевые и ртутные.

Спектроскоп давно уже стал обычным (хотя и не самым дешевым) прибором в любой учебной лаборатории по общей физике или общей химии. Как правило, он состоит из трех основных частей. Щелевая диафрагма и линза формируют плоскую световую волну от источника. Затем призма или дифракционная решетка разлагает свет на составные цвета. И наконец, с помощью небольшой зрительной трубы можно непосредственно наблюдать полученный спектр. Спектр можно сфотографировать, присоединив к зрительной трубе посредством переходного тубуса фотоаппарат.

В последнее время спектроскописты-любители предложили новые идеи и усовершенствования. Л. Гринберг и Т. Бейлз из Университета провинции Саскачеван (Канада) описали свои опыты с дифракционной решеткой, которую они прикрепляли спереди к объективу фотоаппарата, моментально выдающего снимки. Они использовали прозрачную дифракционную решетку-реплику с 600 штрихами на миллиметре. Источником света служили лабораторные лампы, наполненные парами ртути, неона, гелия и криптона.

Р. Боумэн из Кентского университета предложил исследовать при помощи такого простого спектрографа спектры испускания газов, которыми наполнены уличные светильники. Он же рекомендовал регистрировать спектры на черно-белой фотопленке, чтобы негатив фотографии можно было вставлять в обычный проектор. Проектор

дает на экране увеличенный спектр, и студенты могут измерять расстояние между спектральными линиями обычной линейкой.

Р. Бреслоу из Университета шт. Коннектикут указал на интересную особенность натриевого уличного светильника. В желтой части спектра, там, где свечение лабораторной натриевой лампы ярче всего, имеется темная полоса. Такую полосу легко наблюдать невооруженным глазом через дифракционную решетку.

Недавно Д. Катц из одного из колледжей Филадельфии прислал мне методики спектрального анализа различных источников света с применением фотоаппарата с 35-миллиметровой фотопленки или видеокамеры (для демонстрации в больших аудиториях). Он использует источники двух типов: обычную лабораторную газоразрядную лампу и устройство, которое он изготавливает сам из легкодоступных лабораторных материалов. Сжатый воздух продувается над раствором соли металла в воде в наклоненную колбу. В результате колба наполняется воздухом, в котором взвешены ионы металла. По шлангу, соединяющему боковой отросток колбы с горелкой Мекера, ионы вводятся в пламя горелки, где они возбуждаются при столкновениях с молекулами горячего газа. При потере возбуждения происходит испускание характеристического излучения.

Устройство для распыления («атомизации») раствора с ионами металла легко может изготовить любой, кто немного знаком со стеклодувным делом. Это две стеклянные трубки, одна в другой, внутренняя диаметром 6—8 мм, наружная — 12—14 мм. Вниз от двойной трубки отходит капилляр с диаметром канала 1 мм. Идея заключается в том, чтобы пропускать через двойную трубку сжатый воздух (из баллона или лабораторной линии сжатого воздуха). Тогда из-за сужения прохода воздушный поток будет засасывать воздух из капилляра. Если конец капилляра опустить в раствор соли металла, то с засасываемым воздухом в воздушный поток будут увлекаться ионы металла.

Катц советует начинать с внутренней трубки. На одном ее конце сделай-

те ровное расширение, а другой оттяните до малого диаметра. К наружной трубке приварите сбоку капилляр. Вставьте в нее внутреннюю трубку и приварите ее расширенный конец к концу наружной.

Оттяните другой конец наружной трубки до малого диаметра. Сделайте так, чтобы ее кончик был немного шире и шел немного дальше кончика внутренней трубки. Из другой трубки сделайте патрубок для присоединения шланга к распылителю. У патрубка должна быть «оливка», чтобы резиновый шланг для подвода сжатого воздуха плотно прилегал к нему. Отожгите стекло. Отрежьте запаянный нижний конец капилляра и отшлифуйте его, чтобы он был ровным.

Колба должна быть объемом 500—1000 мл. Наденьте на ее боковой отросток резиновый шланг длиной примерно 15 см и диаметром 1 см. Прикрепите липкой лентой другой конец шланга к одному из отверстий для воздуха в горелке. Другие отверстия заклейте лентой, чтобы воздух поступал в горелку только по шлангу. Газ подается в нее, как обычно. Таким образом, в пламя горелки будет поступать воздух, содержащий ионы металла.

Катц использует пластинки (размером 22 на 28 мм) прозрачной дифракционной решетки, которую выпускают фирмы Edmund Scientific Company и Jerguso, Inc. Одна такая пластинка приклеивается к колпачку, надеваемому на объектив фотоаппарата (колпачок пластмассовый, резиновый или клеенный из картона). Его наружный конец нужно смазать клеем и затем наложить на дифракционную решетку. Когда клей высохнет, лишние части пластинки отрезаются ножницами.

Фотоаппарат укрепляют на треножном или каком-либо другом штативе и устанавливают примерно в полуметре от источника света. Источник нужно поставить на черном фоне, чтобы исключить отражения от разных предметов в помещении. Фотоаппарат следует устанавливать так, чтобы свет на него падал не прямо, а под углом примерно 30°. (Если объектив направить прямо на источник, то дифракционная решетка будет пропускать свет, не разлагая его.) При экспонировании фотопленки регистрируется дифракционная картина первого порядка, создаваемая дифракционной решеткой: свет распределяется по фотопленке соответственно длине волны.

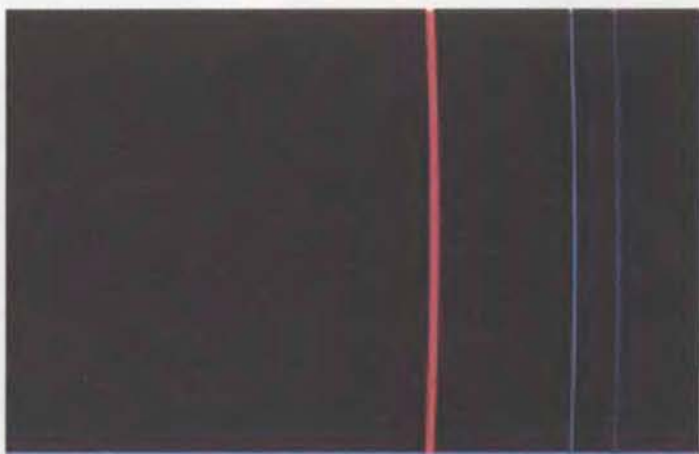
Диафрагма фотоаппарата должна быть широко открыта. Время экспонирования можно точно подобрать лишь опытным путем, но оно должно, повидимому, лежать в пределах от 1/4 до 10 с в зависимости от яркости источника и фоточувствительности пленки. Катц рекомендует использовать пленку «Эктахром» и «Эктахром высоко-



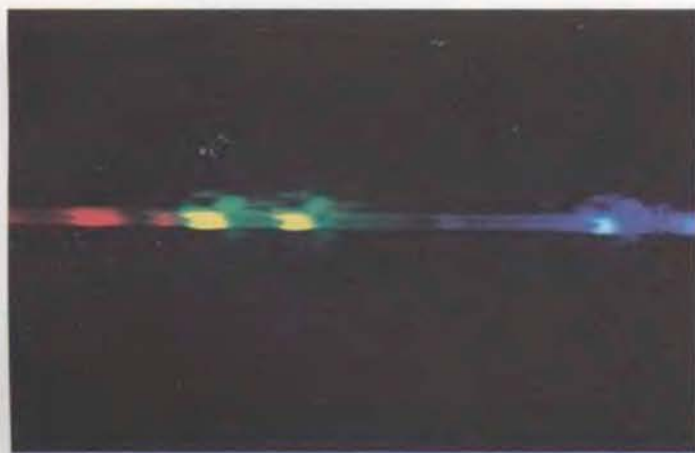
Снимок спектров нескольких уличных фонарей



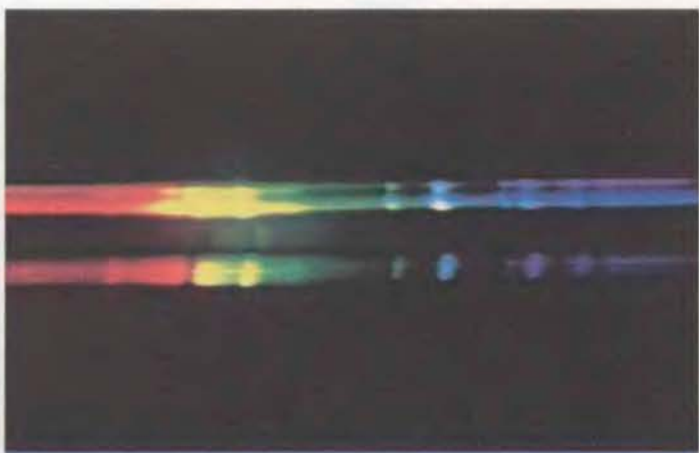
Спектр ртути, полученный Д. Катцем



Спектр водорода, полученный Д. Катцем



Спектр ртутного уличного светильника



Спектры нескольких уличных светильников с натриевыми лампами

чувствительная». Если вместо фотоаппарата установить видеокамеру, то спектр можно наблюдать на экране телевизора или видеопроектора.

Я исследовал несколько атомных спектров, приклеивая липкой лентой дифракционную решетку (530 штрихов на миллиметр) перед объективом зеркального фотоаппарата нормального типа (с одним объективом для фокуси-

рования и для съемки), рассчитанного на 35-миллиметровую фотопленку. Цветная фотопленка имела чувствительность 400 АСА, но можно попытаться использовать более новую цветную пленку с чувствительностью 1000 АСА. Сначала я встал возле самого источника света, но при этом линии в спектре первого порядка несколько перекрывались, так как размеры источ-

ника в видеоискателе были довольно велики. Я отошел немного, чтобы линии стали уже. Тогда линии потускнели. Я полностью открыл диафрагму и сделал много снимков с разным временем экспозиции от 1/4 до 25 с, надеясь уловить нужную выдержку. (Здесь мне сильно облегчил бы задачу фотоаппарат, моментально выдающий снимки.)

Сначала я фотографировал лабораторные лампы — водородную, натриевую, ртутную. Потом сфотографировал уличный светильник с ртутной лампой. Лампа давала свет во всей видимой области спектра, но на этом фоне можно было наблюдать ряд ярких линий: темно-синюю (фиолетовую), бледно-зеленую, ярко-зеленую, ярко-желтую, бледно-желтую и ярко-красную. (На снимках, воспроизведенных на с. 95, не видны все те детали, которые были на оригиналах и которые можно видеть, когда на источник света смотришь через дифракционную решетку.) Почти все это излучение обусловлено переходом возбужденных атомов ртути в основное состояние. Красный свет дает люминофор в лампе, который добавляется для увеличения яркости ее свечения в красной области спектра.

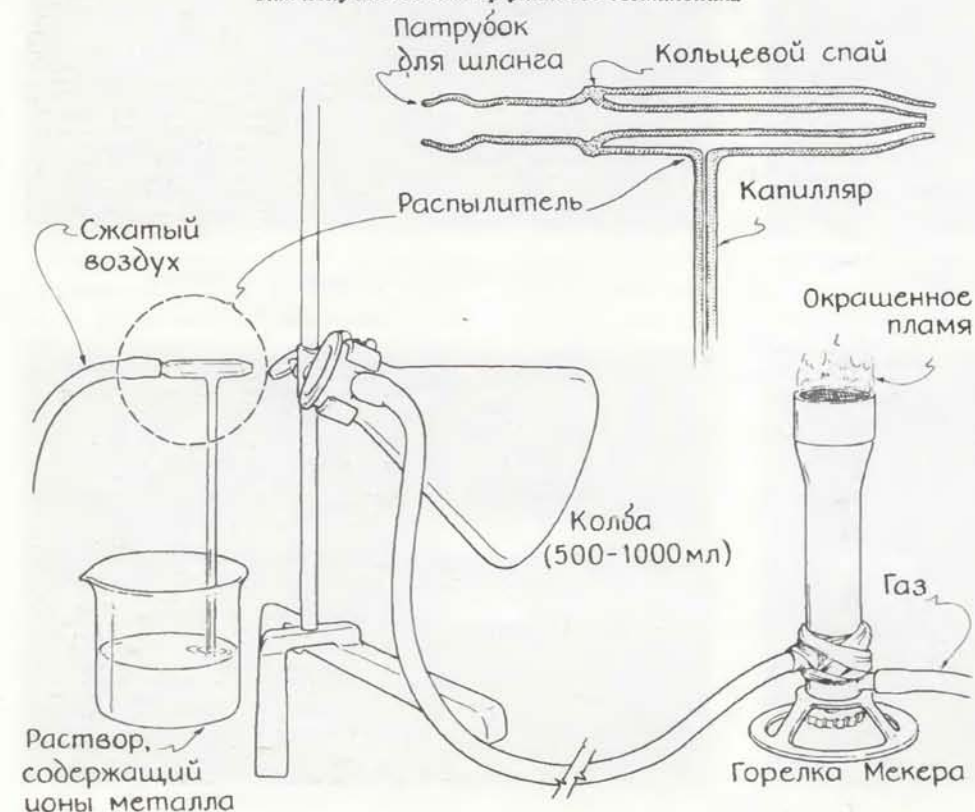
В спектре натрия наблюдался другой набор цветов. Самое яркое излучение лабораторной лампы было желтым с длиной волны 589 нм. Спектр натриевого уличного светильника выглядел иначе, отчасти из-за того что в таких лампах имеется небольшое количество ксенона и ртути, которые дают свой вклад в спектр. Но самым удивительным отличием была темная полоса в центре желтой области (о чем говорилось выше).

Такое различие в желтых областях спектров ламп двух видов объясняется тем, что в них разное давление газа. Давление в лабораторной лампе составляет примерно 0,02 атм, а в лампе уличного светильника — примерно 1,5 атм. В обоих случаях атомы натрия возбуждаются при столкновениях и испускают фотоны ярко-желтого света с длиной волны 589 нм. При низком давлении велика вероятность того, что фотон вылетит из лампы, не встретив другого атома натрия, который мог бы поглотить его. При более высоком давлении велика вероятность того, что фотон будет поглощен другим атомом и не сможет покинуть лампу. Это явление называют самопоглощением.

Но желтый свет все же виден на участках спектра, прилегающих к темной полосе, — следствие частых и сильных столкновений между атомами. Столкновение может кратковременно изменить энергию электрона в атоме. Если в течение этого короткого периода атом вернется из возбужденного состояния в основное, то длина волны испущенного фотона будет не-



Как получается спектр уличного светильника



много больше или немного меньше, чем обычная для данной желтой линии. Тогда фотон не может быть поглощен другим атомом натрия, и самопоглощение не происходит.

Если спектр натриевой лабораторной лампы исследовать на хорошем спектрометре, то желтый свет наблюдается при двух длинах волн: 589 и 589,5 нм. Этот дублет интересен тем, что он обусловлен определенным набором квантовых чисел в атоме натрия.

Записывать спектры, не понимая, как они возникают, это то же, что коллекционировать бабочек, не интересуясь их биологией. Причины возникновения атомных спектров в течение двух столетий занимали умы лучших физиков. Понимание приходило медленно, зачастую в противоречии с общепринятыми представлениями. К середине XIX в. ученые заметили отличительную особенность света, испускаемого при горении чистых элементов. Если горящий уголь дает более или менее равномерный спектр в видимой области, то в спектре чистого элемента наблюдаются лишь определенные цвета. Например, горящий натрий дает характерный желтый свет. Каждый исследованный элемент имел собственный, свойственный только ему набор спектральных линий, что весьма озадачило ранних исследователей.

В 1885 г. Иоанн Бальмер подобрал очень простую формулу для определения положений линий в видимой области спектра атома водорода, которая связывала частоту (или длину волны) с определенным набором целых чисел (начиная с 2). Однако ни Бальмер, ни другие ученые не могли предложить какого-либо объяснения этой формулы.

В 1911 г. Эрнест Резерфорд показал, что атом состоит из положительно заряженного ядра очень большой плотности и отрицательно заряженных частиц, находящихся на некотором расстоянии от ядра. Теперь нам известно, что ядро атома состоит из протонов и нейтронов и что частицы, окружающие ядро, — электроны. Свет испускается, когда электрон теряет энергию, переходя на орбиту, ближе расположенную к ядру. Но почему наблюдаются лишь некоторые спектральные линии? Согласно теории электромагнетизма, принятой во времена Резерфорда, электрон, теряющий энергию, должен был бы почти мгновенно упасть на ядро. Если бы так было на самом деле, то все атомы «коллапсировали» бы и мир, каким его знаем мы, не мог бы существовать.

Первый шаг к решению этой проблемы сделал в 1913 г. Нильс Бор, который рассмотрел вопрос: как приложить новое понятие «кванта действия» к атому водорода. Несколько ранее Макс Планк ввел постоянную, названную впоследствии «постоянной План-

ка», для того чтобы имитировать атомные излучатели на поверхности горячего предмета, такого, как горящий уголь. Приложение этой модели к резерфордовскому атому оказалось трудным, но возможным делом. И все же объяснение атомных спектров пока что казалось задачей, превышающей человеческие возможности.

Однажды один из друзей Бора посоветовал ему ознакомиться с формулой Бальмера. Позже Бор говорил: «Как только я увидел формулу Бальмера, мне сразу же все стало ясно». В нее входят целые числа, а это означает, что некоторые характеристики электрона в атоме водорода могут принимать лишь определенные значения, зависящие от таких целых чисел. Электрон не может упасть на ядро просто потому, что тогда были бы нарушены эти правила. Бор установил, что если квантовать орбитальный угловой момент электрона (момент количества движения для данной орбиты, окружающей ядро), то его энергия может принимать только дискретные значения, определяющиеся целым числом, которое он назвал главным квантовым числом и обозначил n . Когда электрон находится на орбите, расположенной близко к ядру, его энергия соответствует одному из низших разрешенных значений. Орбитам большего размера соответствуют большие значения квантового числа n . Электрон может переходить с одного разрешенного уровня энергии на другой, соответствующим образом меняя размер своей орбиты, но промежуточные значения энергии и радиуса орбиты невозможны. Кроме того, не разрешено падение на ядро. Нижняя граница энергии электрона определяет минимально допустимый радиус его орбиты.

Получив энергию от внешнего источника, электрон данного атома может скачкообразно перейти с более низкого уровня энергии на более высокий. Эту энергию ему может передать другая частица или другой атом при столкновении с ним. Но он может получить ее также в результате поглощения фотона. Возбужденный электрон вскоре отдает энергию. Чтобы это произошло, атом должен либо удариться обо что-то, либо испустить свет. Когда атом водорода отдает энергию, испуская свет, наблюдается тот спектр его излучения, который мы получаем от газоразрядной водородной лампы.

Вверху справа показана схема разрешенных энергетических уровней атома водорода, соответствующая модели Бора. Самый низкий уровень, называемый основным состоянием, — это уровень с квантовым числом n , равным 1. Другим уровням соответствуют большие значения n . Формула Бальмера (в ее первоначальном виде) относилась ко второму и более высоким уров-

ням. Например, если атом водорода в результате столкновения перешел на третий уровень, то затем, теряя возбуждение, он перейдет на один из двух уровней, лежащих ниже. Предположим, что атом водорода перешел на второй уровень; при этом выделяется

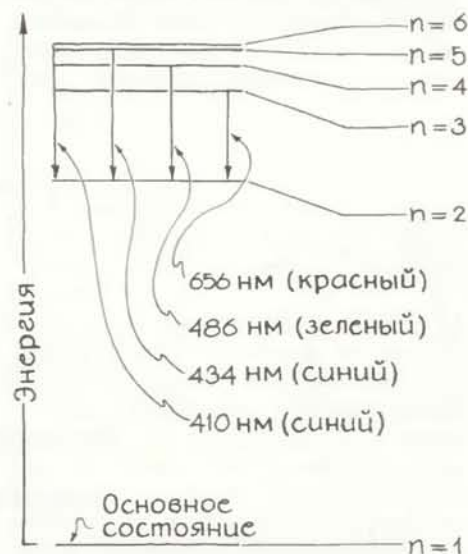


Схема энергетических уровней атома водорода

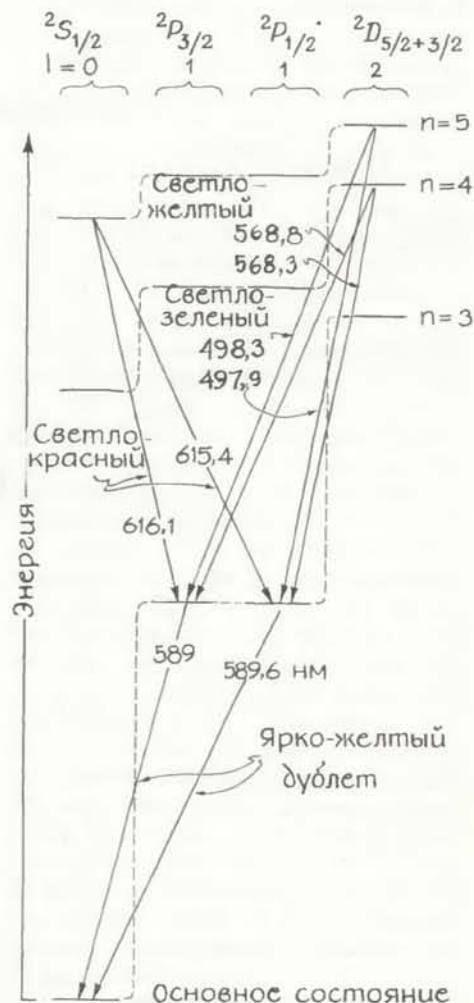


Схема энергетических уровней атома натрия

энергия, равная разности этих двух уровней.

Еще до того, как Бор предложил свою модель атома, Альберт Эйнштейн вывел фундаментальное соотношение между энергией и частотой света: энергия равна произведению частоты на постоянную Планка. Например, при переходе атома водорода с третьего уровня на второй испускается свет с определенной частотой, соот-

ветствующей разности энергий этих двух уровней. Поскольку частота обратно пропорциональна длине волны, этим требованием определяется длина волны света. В результате в спектре появляется красная линия при 656 нм.

В лампе атомы газа все время возбуждаются в результате столкновений, совершая различные переходы (см. схему на с. 97). Переходы на более низкие уровни сопровождаются выделением

энергии. При возбуждении атомов водорода испускается свет с разной длиной волны. Интересно, что возможны только некоторые значения. Кроме красной линии в видимой области спектра имеются три линии, соответствующие переходам вниз на второй уровень. Зеленая линия соответствует переходам с четвертого уровня. Синяя — переходам с пятого уровня. Синяя с меньшей длиной волны — переходам с шестого уровня. Все четыре линии лежат в видимой области спектра. Переходы на другие нижние уровни дают линии, лежащие за пределами видимой области спектра — в ультрафиолетовой и инфракрасной областях.

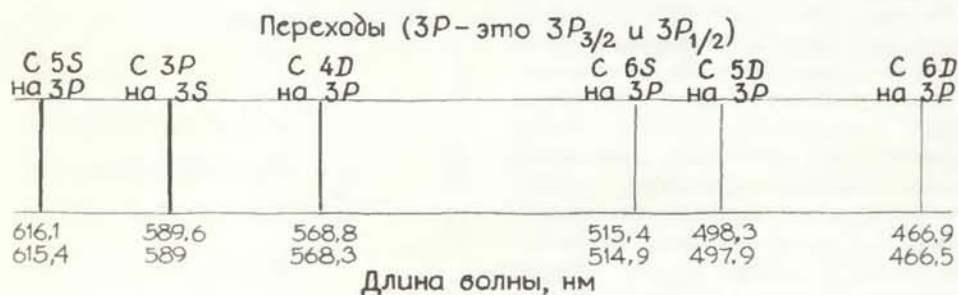
Боровская модель атома была революционной, поскольку в ней вводилось квантование движения и энергии атома, но она была не совсем верна. Соответствие между теоретически рассчитанным на основе такой модели спектром и экспериментально наблюдаемым было почти случайным. В боровской модели электрон вращается вокруг атома по окружности, однако возможны орбиты иной формы.

Позднее Арнольд Зоммерфельд стал рассматривать трехмерные орбиты. Тогда модель атома водорода приобрела законченный вид, но ее не удавалось обобщить на атомы других элементов. Она не давала возможности объяснить даже простые спектры излучения лабораторных ламп и уличных фонарей.

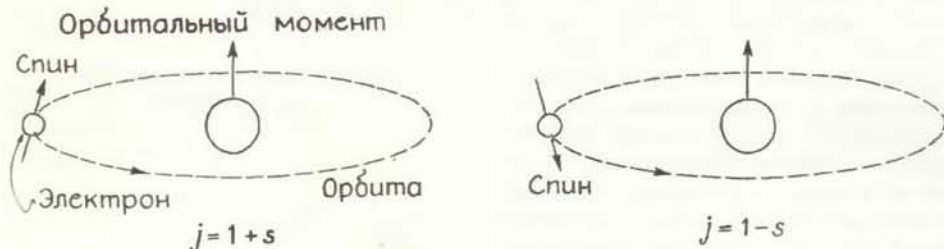
Адекватная квантовомеханическая модель атома водорода появилась в 1926 г., когда Эрвин Шредингер предложил новое уравнение, которое теперь носит его имя. По существу это было то же уравнение, которое использовалось ранее для описания волн всех видов. Но уравнение Шредингера казалось необычным, поскольку вместо волн в воде или другой подобной среде оно описывало волны так называемого скалярного поля. Это уравнение с удивительной точностью давало спектры атомов, но физический смысл скалярного поля был настолько неясным, что многим физикам такая теория казалась искусственной.

При решении уравнения Шредингера появились новые целые числа. Электрон в атоме характеризуется, во-первых, главным квантовым числом n (в какой-то мере сходным с квантовым числом n в модели Бора), во-вторых, квантовым числом l , которым определяется орбитальный угловой момент электрона (момент количества движения при вращении на данной орбите), и, в-третьих, квантовым числом, которым определяется ориентация орбитального момента. Первых двух недостаточно для объяснения спектров лабораторных ламп и уличных светильников.

При заданном n число l может прини-



Спектр атома натрия



Комбинации квантовых чисел

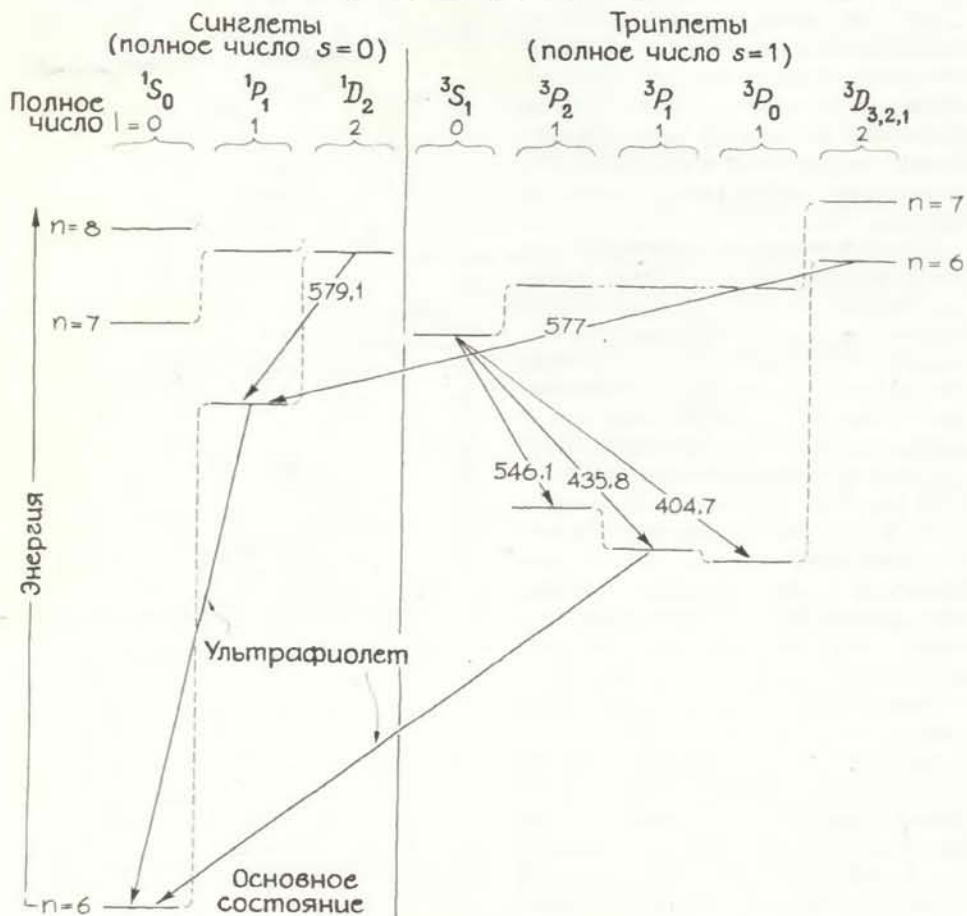


Схема энергетических уровней атома ртути

мать целые значения от 0 до $n - 1$. Далее, необходимо ввести еще одно квантовое число, характеризующее собственный угловой момент электрона. Дело в том, что электрон ведет себя как микроскопический волчок, вращающийся вокруг собственной оси. Угловой момент такого типа, называемый спином, определяется квантовым числом s .

Следует иметь в виду, что квантовые числа, орбиты, схемы энергетических уровней и т.д. — все это лишь теоретические представления, связываемые с атомом. Это не есть реальность в обычном нашем понимании. Невозможно непосредственно наблюдать электрон или квантование его орбит и энергии в атоме. Атом нельзя сравнивать с миниатюрной солнечной системой, и спин не есть просто угловой момент крохотного волчка. В современном представлении электрон — бесконечно малая точка, которой приписывается ряд характеристик, в том числе заряд и спин.

Роль квантовых чисел в описании атомных спектров можно показать на примере спектра натрия. В нейтральном атоме натрия одиннадцать электронов. Десять из них не оказывают существенного влияния на спектр, поскольку они образуют так называемые заполненные оболочки. Понятие заполненной оболочки основано на квантовомеханическом принципе Паули, согласно которому два электрона в атоме не могут иметь одинаковые квантовые числа.

Одиннадцатый электрон называют валентным, так как он находится на внешней незаполненной оболочке. Когда атом натрия не возбужден, для валентного электрона $n = 3$ и $l = 0$. Возможны еще два значения l (1 и 2), но при этом электрон должен получить некоторое количество энергии. Однако он может, получив соответствующую энергию, перейти в состояние с $n = 4$ или более. Все возможные варианты представлены на схеме энергетических уровней (с. 97).

Основное состояние можно обозначить символом $3^2S_{1/2}$. Здесь S — принятое обозначение состояния валентного электрона с $l = 0$; 3 — это значение n ; верхний индекс берется из соотношения для спина; нижний индекс — новое квантовое число j , комбинация чисел l и s . Этим новым квантовым числом определяется полный угловой момент электрона, т.е. комбинация его орбитального и спинового угловых моментов. Число j находят, складывая и вычитая числа l и s . Наибольшее его значение равно сумме l и s ; наименьшее — разности l и s (без знака минус, если он появляется). Промежуточные значения получают, вычитая 1 из наибольшего значения, пока не будет достигнуто наименьшее. В случае основного состоя-



Спектр атома ртути

ния вычисления просты. Здесь $l = 0$, а $s = 1/2$, поэтому j может быть равно только $1/2$, как и указано в нижнем индексе символа столбца.

Интереснее случай, когда валентный электрон атома натрия получит некоторую энергию; при этом (хотя он еще остается в состоянии с $n = 3$) $l = 1$, так что для j возможны два значения. Если сложить l и s , то j будет равно $3/2$, а если вычитать, то получим $1/2$. Физический смысл этих двух значений связан с взаимной ориентацией двух составляющих углового момента электрона. Если орбитальная и спиновая составляющие направлены в одну сторону, то $j = 3/2$, если же они направлены в противоположные стороны, то $j = 1/2$.

От квантового числа j зависит энергия электрона (и, следовательно, атома). Двум возможным ориентациям углового момента (его орбитальной и спиновой составляющих) соответствует разная энергия электрона. Когда они направлены в противоположные стороны, энергия несколько меньше. Когда их направление одинаково, энергия электрона несколько больше. Чтобы учитывать это, и вводят квантовое число j .

Рассмотрим два низших уровня в столбцах, обозначенные на схеме (с. 97) $P_{3/2}$ и $P_{1/2}$ (нижний индекс — значение j). Что касается буквы P , то это принятое обозначение состояния с $l = 1$. Эти два уровня так мало различаются, что на схеме они выглядят как один и тот же уровень. И все же разностью энергий этих уровней обусловлено появление дублета желтых линий в спектре натрия.

Предположим, что атом натрия в лампе возбужден в состоянии $P_{3/2}$. Он быстро возвращается в основное состояние, испуская свет. Длина волны составляет 589 нм, т.е. свет относится к желтой части спектра. Если же атом возбужден в состоянии $P_{1/2}$, то, теряя возбуждение, он возвращается в основное состояние, испуская несколько меньшее количество энергии, так как уровень $P_{1/2}$ лежит немного ниже уровня $P_{3/2}$. Теперь длина волны составляет 589,6 нм, что соответствует второй линии дублета в желтой области. Таким образом, наличие дублета в спект-

ре натрия требует введения квантового числа j . Иначе небольшую разность длин волн этих двух линий никак нельзя объяснить.

На схеме показан также ряд других возбужденных состояний, в которые могут переходить атомы натрия в лампе. После возбуждения атомы различными путями возвращаются в основное состояние. Пока лампа включена, атомы снова и снова возбуждаются. В результате непрерывно испускается свет с длинами волн, соответствующими всем возможным путям перехода в основное состояние. На схеме энергетических уровней и схеме спектра натрия показаны лишь некоторые из возможных вариантов.

Например, электрон, возбужденный в состоянии с $n = 5$ и $l = 0$, дает красную линию испускания. По причинам, на которых мы не будем здесь останавливаться, такой электрон не может сразу перейти в основное состояние. Он может перейти либо на уровень $P_{3/2}$, либо на уровень $P_{1/2}$. В первом случае испускается свет с длиной волны 616,1 нм, а во втором — с длиной волны 615,4 нм. Разность этих длин волн красного света обусловлена только разностью энергии двух указанных состояний P . Таким образом, из-за двух значений числа j , возможных для состояния P , возникает еще один дублет.

Спектр ртути можно проанализировать так же, как и спектр натрия. В электрически нейтральном атоме ртути имеется пять заполненных электронных оболочек и два валентных электрона. Хотя в квантовых числах для двух электронов разобраться труднее, ход анализа примерно такой же, как в случае натрия. Схема энергетических уровней атома ртути представлена на с. 98. Как и в предыдущем случае, основное состояние атома показано внизу слева. Выше на схеме изображены некоторые возможные возбужденные состояния. Атомы ртути в лампе все время возбуждаются на эти более высокие уровни и затем разными путями возвращаются в основное состояние, испуская свет.

Главное отличие от спектра натрия состоит в том, что здесь нужно рассматривать полные квантовые числа l и s валентных электронов. По этим по-

льным квантовым числом определяется полное число j , от которого зависит энергия. Для облегчения таких вычислений схема энергетических уровней разделена на две части: «синглеты» и «триплеты». Под заголовком «синглеты» представлены энергетические уровни для случаев, когда спины двух валентных электронов направлены в противоположные стороны, так что их полный спин $s = 0$. Полное квантовое число j для любого из этих уровней просто равно полному квантовому числу l . Например, низший уровень P в этой части соответствует случаю, когда для одного электрона $l = 0$, а для другого $l = 1$. Полное число l равно 1. Поскольку полное значение $s = 0$, полное значение j также равно 1. В схеме триплетов крайний левый столбец уровней S тоже прост. Здесь полное квантовое число $l = 0$ и спины электронов направлены в одну сторону, так что полное значение $s = 1$. Следовательно, полное квантовое число j может быть равно только 1.

Интересна другая часть схемы уровней триплетов. Рассмотрим низшие уровни P в этой части. Полное значение $l = 1$, а для полного j возможны три значения, которым соответствует разная энергия. Сумма полных квантовых чисел l и s дает для полного квантового числа j значение 2, а разность — значение j , равное 0; промежуточное значение $j = 1$. На схеме указаны энергии, соответствующие всем трем значениям j .

Этим трем энергетическим уровням отвечают три разные длины волны в спектре ртути. Предположим, что в результате столкновения атом ртути возбужден на низший уровень S_1 . Он может потерять возбуждение, перейдя на какой-нибудь уровень P в этой же части схемы. Поскольку возможен переход на три разных уровня P , атом может испускать свет с длиной волны 546,1; 435,8 и 404,7 нм. Так как в лампе возбуждается очень много атомов, какая-то их доля всегда переходит с уровня S_1 на любой из трех уровней P , а потому непрерывно испускается свет с тремя длинами волн. Таким образом, наличие указанного триплета линий в спектре атома ртути можно объяснить только с учетом квантового числа j .

Мы рассказали лишь, как начинается исследование спектров обычных ламп. Интересен анализ и других особенностей в атомных спектрах натрия и ртути. Можно попробовать проанализировать спектр люминесцентной лампы, на внутренние стенки которой нанесен тонкий слой люминофора. Существуют также лампы, в которых свет испускают не атомы, а молекулы. Но здесь надо прямо сказать, что над молекулярными спектрами вам, пожалуй, пришлось бы очень долго ломать голову.

Удар за ударом

ЭПИДЕМИОЛОГИЧЕСКИЕ данные о заболеваемости раком, а также результаты исследований опухолевых клеток уже давно указывали на многостадийность канцерогенеза. Теперь это представление подтвердилось на молекулярном уровне. В ряде экспериментов было продемонстрировано, что для трансформации нормальных клеток в раковые требуются по меньшей мере два генетических изменения, каждое из которых связано с действием отдельного гена. Доказательства тому получены не только для онкогенов — генов, с проявлением которых связано развитие рака в клетках человека, — но и для канцерогенов из внешней среды, а также для генов двух ДНК-содержащих вирусов, способных индуцировать рак у лабораторных животных. Становится все более вероятным предположение, что разнообразные раковые опухоли, возникающие в совершенно различных тканях при действии на первый взгляд несопоставимых индуцирующих факторов, в конечном счете есть результат функционирования ограниченного числа трансформирующих генов.

Онкогены — это варианты нормальных генов клеток животных (так называемых протоонкогенов). Тем или иным способом они активируются и вызывают превращение здоровых клеток в опухолевые. Роль онкогенов была убедительно продемонстрирована в опытах по трансформации отдельным геном культуры NIH 3T3 клеток мыши. Трансформированные клетки образуют колонии, по многим признакам очень похожие на колонии раковых клеток, а когда трансформированные клетки вводят лабораторным животным, у тех появляются опухоли. Однако способность такой линии клеток, как, например, 3T3, сколь угодно долго расти в культуре (такая линия называется пересеемой) позволяет предполагать, что эти клетки уже частично трансформированы: они стали бессмертными, а возможно, в них произошли и другие изменения, характерные для раковых клеток. Естественно, хочется задать вопрос: что же требуется для трансформации «более нормальных» клеток? Располагая данными эпидемиологии и патологии, указывающими на многостадийность канцерогенеза, и зная, что некоторые виды опухолей человека содержат по два различных онкогена, активирующихся по-разному, три группы исследователей занялись трансформацией бессмертных линий клеток, заново полученных из нормальных тканей крысы и хомяка. Они воспользовались различ-

ными комбинациями раковых генов, а также сочетаниями раковых генов и канцерогенов. Факты, установленные ими независимо, были опубликованы в журнале "Nature".

Во всех случаях одним из онкогенов был ген, выделенный из раковой опухоли мочевого пузыря человека и трансформирующий, как было известно, клетки 3T3. Этот ген принадлежит к детально исследованному семейству *ras*. Р. Ньюболд и Р. Оуверелл (Институт по изучению рака в Букингемшире, Великобритания) обнаружили, что сам по себе ген *ras* не трансформирует клетки соединительной ткани из кожи хомяка. Ранее они показали, что, если воздействовать на такие клетки химическим канцерогеном или рентгеновскими лучами, возникают колонии бессмертных клеток, которые, однако, не являются опухолевыми. А после трансформации геном *ras* эти бессмертные клетки становились полностью трансформируемыми. Ньюболд и Оуверелл предположили, что активация гена *ras* есть поздняя стадия канцерогенеза, что необходим какой-то более ранний этап, и вполне вероятно, что эту роль играет индуцированное канцерогеном «бессмертие».

Х. Рули из Лаборатории в Колд-Спринг-Харборе нашел другой способ комментировать активность гена *ras*, т.е. как бы дополнить ее до онкогенной. Он работал с генами аденовируса и вируса полиомы. Эти ДНК-содержащие вирусы способны заражать человека и вызывают опухоли у некоторых лабораторных животных. Для обоих вирусов ранее было показано, что для трансформирующей активности требуются два участка вирусной ДНК. Участок *E1A* ДНК аденовируса и ген вируса полиомы, кодирующий белок, известный под названием большого Т-антигена, по-видимому, обеспечивают лишь «бессмертие» клеток. От области *E1B* ДНК аденовируса и от гена среднего Т-антигена вируса полиомы, вероятно, зависят другие изменения, в том числе способность трансформированных клеток при введении животным вызывать образование опухолей. Рули продемонстрировал, что ни участок *E1B*, ни ген среднего Т-антигена, ни ген *ras* по отдельности не трансформируют клетки из почек крысы. Но, если вместе с участком *E1B*, геном среднего Т-антигена или геном *ras* в клетки вводили также участок *E1A*, наблюдалась явная трансформация.

Недавно ген *ras* подробно исследовали в лаборатории Р. Вайнберга в Массачусетском технологическом институте (см.: Р. Вайнберг, «Молекулярные основы рака», «В мире науки», № 1, 1984). Х. Ланд, Л. Парада и Р. Вайн-

берг трансформировали культуру фибробластов, полученную из эмбрионов крысы, онкогеном *ras*. Сам по себе онкоген не вызывал превращения клеток крысы в опухолевые, хотя и усиливал их способность к пролиферации. Если же в фибробласты вводили одновременно два онкогена, *ras* и *mus*, то появлялось много быстро растущих колоний трансформированных клеток, которые у животных индуцировали опухоли. Действие генов *ras* и *mus* исследовали также в сочетании с уже упоминавшимися генами вируса полиомы. Было установлено, что ген среднего Т-антигена комплементирует действие гена *mus*, а ген большого Т-антигена — действие гена *ras*.

Вместе все эти эксперименты говорят о том, что по меньшей мере некоторые онкогены и гены ДНК-содержащих вирусов можно объединить в две группы комплементации. Одни гены (ген *mus* и ген большого Т-антигена), по-видимому, обеспечивают возникновение пересеваемых линий клеток, другие (ген *ras* и ген среднего Т-антигена) сообщают ставшим бессмертными клеткам другие свойства, характерные для состояния злокачественности. В действительности ситуация, наверное, сложнее. Имеются некоторые данные в пользу того, что необходимых стадий канцерогенеза больше чем две. Клиническое развитие рака может отличаться от трансформации клеток в лабораторной культуре. И все-таки теперь ясно, что рак возникает в результате последовательных, отличных друг от друга «ударов» по метаболизму клетки, каждый из которых активирует особый ген. Не исключено, что механизмы действия этих генов будут установлены в самом ближайшем будущем.

Об оплате труда профессорско-преподавательского состава американских вузов

КОГДА в США начинают говорить о необходимости улучшить систему высшего образования, то непременно затрагивается вопрос о том, что труд преподавателей оплачивается недостаточно высоко. В наихудшем положении по сравнению с другими находятся преподаватели колледжей. Как следует из данных, собранных Американской ассоциацией профессоров университетов (ААПУ), заработная плата преподавателей колледжей за период с 1967/68 по 1981/82 г. снизилась на 18,9%, хотя во время бурной инфляции пострадали не только преподаватели.

Эти сведения приведены в «Ежегодном отчете о материальном обеспече-

нии преподавателей колледжей и университетов в 1982/83 г.», составленном председателем комитета материального обеспечения профессорско-преподавательского состава ААПУ У. Л. Хэнсеном из Висконсинского университета в Мадисоне. Отчет опубликован в одном из выпусков бюллетеня ААПУ «Academy».

1967/68 г. был выбран комитетом в качестве базового для изучения динамики реальных заработков рассматриваемой категории работников потому, что в тот год уровень инфляции был самым низким. Правительство не оказывало влияния на определение уровня заработной платы преподавателей колледжей и университетов, поскольку экономическое положение в стране было удовлетворительным и финансирование высшего образования не ограничивалось строго. По данным комитета, реальная заработная плата профессорско-преподавательского состава в 1971/72 г. по сравнению с 1967/68 г. выросла на 2,1%, затем упала на 10% в течение следующего пятилетия и к 1981/82 г. снизилась еще на 11,7%. В отчете Хэнсен указывает, что в 1982/83 г. размер реального заработка вырос на 2%, но в основном за счет снижения темпов инфляции.

По мнению Хэнсена, перспективы в отношении оплаты труда преподавателей вузов не обнадеживающие. «Существенное снижение темпов инфляции и стабилизация розничных цен с лета 1982 г. ослабили доводы в пользу повышения номинального уровня заработной платы преподавателей вузов. В то же время стремление подавить желание повысить жалование работникам государственного сектора становится более настойчивым вследствие экономических трудностей, с которыми сталкиваются многие штаты; в результате затянувшегося экономического спада их доходы резко снизились. Но даже и в отсутствие этого давления нет никаких очевидных указаний на то, что общество пересмотрит свое отношение к высшему образованию и признает необходимым увеличить рост заработной платы преподавателям вузов, чтобы компенсировать снижение их реальных доходов в прошлые годы».

Издательство
МИР
предлагает:

Ч. Сеттерфилд ПРАКТИЧЕСКИЙ КУРС ГЕТЕРОГЕННОГО КАТАЛИЗА

Перевод с английского

В книге основное внимание уделено тем катализаторам и таким реакциям, которые имеют промышленное значение. Большой опыт лектора и широкая эрудиция позволили автору — профессору Массачусетского технологического института — в лаконичной форме изложить обширные данные о катализе, основных типах катализаторов, крупнотоннажных каталитических процессах.

В гл. 1 даны основные понятия и определения, а также краткий очерк развития гетерогенного катализа. В гл. 2 охарактеризована адсорбция, изотермы и теплоты адсорбции. Гл. 3 посвящена скоростям и кинетическим моделям каталитических реакций. В гл. 4 рассматриваются приготовление и производство катализаторов. Гл. 5 и 6 посвящены двум распространенным типам гетерогенных катализаторов: металлам на носителях и катализаторам кислотной природы. В гл. 7 дается характеристика типов кислотных центров алюмосиликатных катализаторов. Гл. 8—10 посвящены следующим группам каталитических производств: окислению, переработке нефти и углеводородов, синтезу на основе CO и водорода. В гл. 11 описаны методы испытаний катализаторов на лабораторных и опытных установках.

Для химиков широкого профиля — работников научно-исследовательских институтов и заводских лабораторий, студентов химико-технологических вузов.

1984, 36 л.
Цена 5 р. 70 к.



Занимательный компьютер

Взлеты и падения чисел-градин

БРАЙАН ХЭЙЕС

ПЕШЕХОД, делающий три шага вперед и два назад, хотя и не быстро, но все же доберется до цели. А вот в одной любопытной нерешенной задаче из теории чисел утверждается, что при таком передвижении достижение цели весьма сомнительно. Задача формулируется так. Возьмем произвольное целое число N больше нуля (любое натуральное число). Если оно нечетное, умножим его на 3 и прибавим 1, т.е. заменим N на $3N + 1$. Если же оно четное, разделим на 2, т.е. заменим N на $N/2$. В любом случае получаем новое значение N , с которым повторяем

описанную операцию. Появится ли после многократного повторения указанных действий тенденция к увеличению чисел или, быть может, к уменьшению? Каким будет процесс: расходящимся или он будет сходиться к некому значению? Долго ли дожидаться числа, которое для этого процесса окажется «фатальным»?

Если задано конкретное N , то для ответа на поставленные вопросы достаточно обычной арифметики. Например, начав с нечетного числа 27, следующим получим значение $(3 \times 27) + 1 = 82$, затем 41, а потом

124. Очевидно, что в последовательности будет много «взлетов» и «падений»: взлетов, когда N нечетное, и падений, когда оно четное. Читателю предлагается самому продолжить вычисление и убедиться в справедливости сказанного.

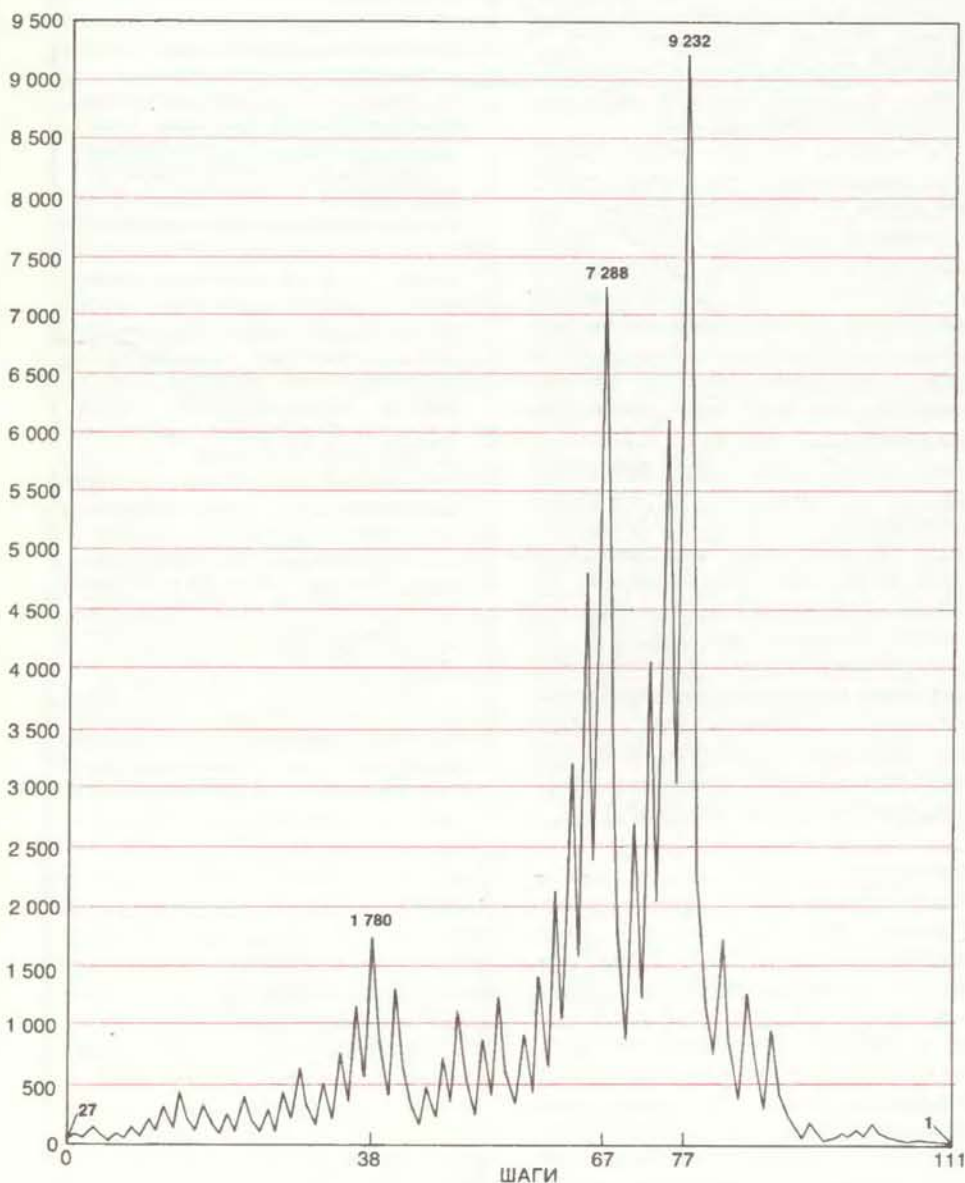
Трудность задачи заключается не в выписывании последовательности для данного N , а в нахождении общего решения, которое годилось бы для всех исходных значений N . Такое общее решение пока не получено. Было испробовано огромное количество чисел, и все они вели себя одинаково, но еще никто не смог доказать, что так же будет с любым целым числом. Из нерешенных задач теории чисел — эта едва ли самая важная, но она одна из тех, что вызывают сильную досаду. И описание вычислительной процедуры, и ее выполнение чрезвычайно просты, но понять, к чему она может привести, невероятно трудно.

На примере этой задачи особенно хорошо видны как польза компьютера при вычислениях, так и ограниченность его возможностей. С небольшими целыми числами можно справиться самим, а далее для вычислений понадобится механический помощник. Им может быть любая машина, даже небольшой программируемый калькулятор. В области же очень больших чисел такая работа под силу только самым мощным ЭВМ. Когда же ставятся более глубокие вопросы, уже не поможет никакой компьютер. Основное назначение ЭВМ — быть подспорьем в математическом эксперименте: строить примеры и контрпримеры. Для описания же закона, по которому N изменяет свои значения, нужна не числодробилка, а скорее механический «доказыватель теорем».

ЕСЛИ к произвольному целому числу многократно применять описанные преобразования, то какого результата следует ожидать? На этот счет есть три интуитивные гипотезы.

В первой гипотезе рассуждаем так. Имеется равное количество четных и нечетных чисел, так что в любой длинной последовательности вычислений четные и нечетные N будут появляться одинаково часто. Нечетное N увеличивается втрое (чуть больше), а четное уменьшается всего лишь вдвое. Следовательно, по мере роста числа итераций значение N будет бесконечно возрастать. За каждую итерацию N будет в среднем увеличиваться на $(3N + 1)/2$. Для больших значений N это, в сущности, равно $3N/2$.

Вторая гипотеза основана на тезисе «Чем выше заберешься, тем ниже скатиться». Справедливость этой мысли подкрепляется тем реальным фактом, что стóит в вычислениях получить точную степень двойки, как последова-



Последовательность значений чисел-градин, полученных для $N = 27$

тельность неудержимо скатится к 1. (При делении на 2 числа, представляющего собой 2 в любой степени, кроме самой двойки, постоянно будет получаться все меньшее и меньшее четное число.) Среди бесконечного счетного множества целых чисел существует бесконечно много степеней двойки, так что при достаточно долгом вычислении обязательно получится одна из них. В процессе вычислений можно получить сколь угодно большое число N , но крах его неизбежен.

Третья гипотеза по форме схожа со второй, но приводит к иному выводу. Замечено, что как только вычисления меняют направление, скажем после ряда четных чисел появляется нечетное, мы вновь возвращаемся в ту же область, в которой были раньше. В самом деле, получая то большие, то меньшие числа, мы можем сколь угодно часто возвращаться в некую конечную область. Можно ожидать, что рано или поздно результат вычислений повторится, и, как только это произойдет, все дальнейшее предрешено. Образуется замкнутый цикл, из которого уже никогда не выйти. Это объясняется тем, что выбор каждого следующего шага происходит по вполне определенному правилу.

К рассмотренным гипотезам не следует относиться слишком серьезно: они не могут быть все справедливыми. Какие-то из их посылок определенно спорны. В частности, во всех трех гипотезах привлекаются вероятностные соображения, хотя последовательности чисел порождаются по некоему правилу, а не случайным образом. Далее, бесконечные величины играют существенную роль при любом анализе этой задачи, а, когда имеешь дело с бесконечностью, здравый смысл редко бывает хорошим советчиком.

Делая эти оговорки, должен тем не менее отметить, что все три гипотезы считаю в высшей степени правдоподобными. Взвешивая каждую из них, я думаю, что не может быть сомнений в ее справедливости, и в то же время другие гипотезы мне кажутся не менее убедительными. Что же по этому поводу говорит математический эксперимент?

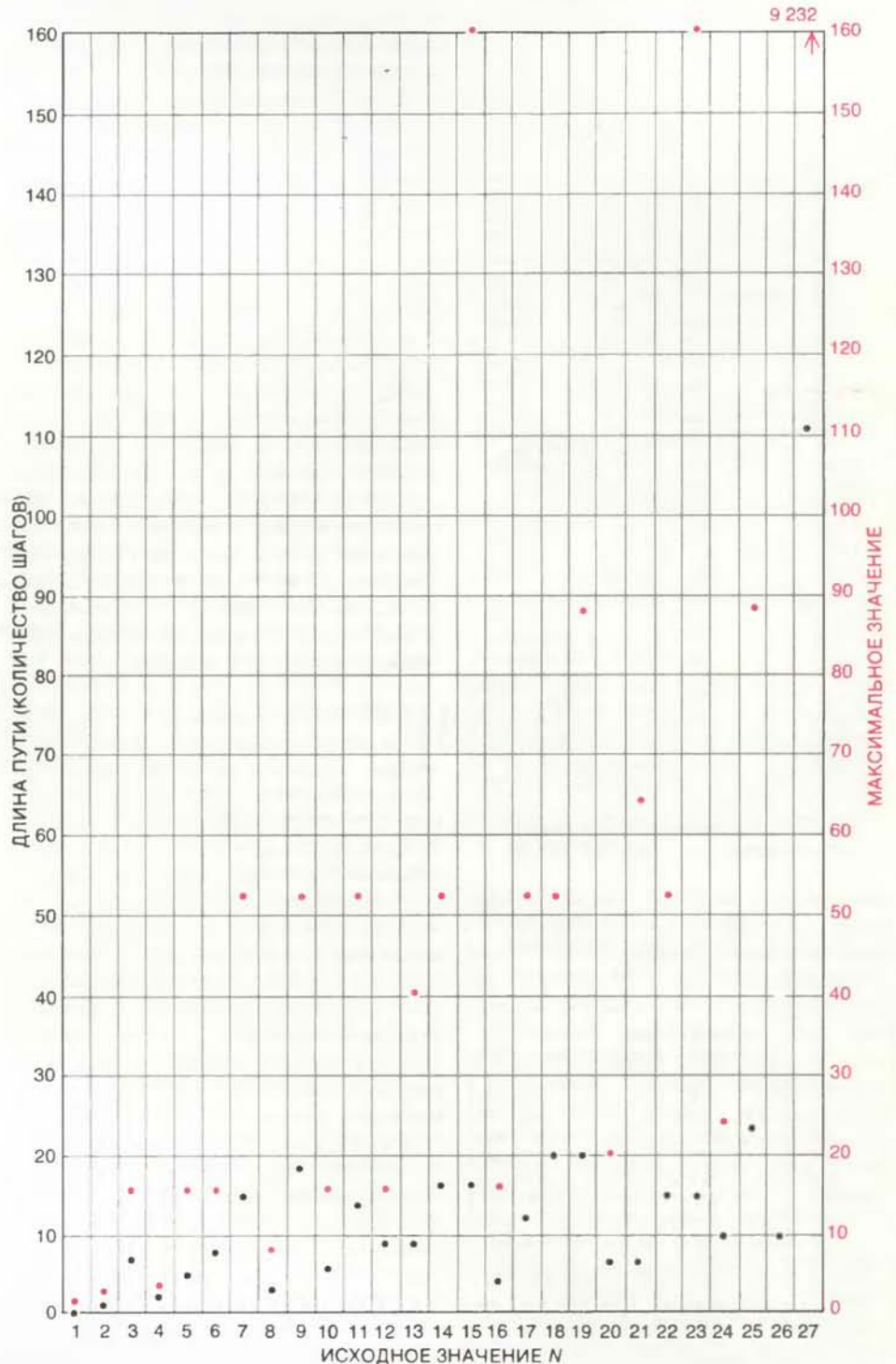
НАЧНЕМ вычисления с 1. Это — нечетное число, поэтому, следуя условиям задачи, умножим его на 3 и прибавим 1. Полученное в результате 4 — четное число, так что делим его на 2 и снова получаем четное число. Поделив еще раз на 2, вновь возвращаемся к 1. Таким образом, результат нашего первого вычисления подтверждает две из рассмотренных выше гипотетических теорий. Гипотеза о крахе больших чисел подтвердилась тем, что после первой же итерации результат оказался степенью 2. Подтверждением гипотезы о заиклиивании

является получение 1 — числа, с которого мы начали. Замкнутый цикл 4, 2, 1 далее будет беспрестанно повторяться.

Из всех натуральных чисел единица занимает особое положение: это первое число и наименьшее. Таким образом, результат, полученный для $N = 1$, может быть нетипичным: прежде чем делать какие-либо выводы, надо проверить другие числа. «Фатальность» чисел 2 и 4 очевидна из вычисления для $N = 1$, поэтому попробуем начать с 3. Это число нечетное, так что следующим будет $(3 \times 3) + 1$, т.е. 10. Разделив на 2, получаем 5. Умножив

теперь на 3 и прибавив 1, получаем 16 — опять степень 2; последовательное деление на 2 даст значения $N = 8, 4, 2, 1$, т.е. мы вновь попадаем в замкнутый цикл 4, 2, 1.

После исследования первых четырех натуральных чисел вроде бы выявилась определенная тенденция, но все же оснований для окончательного вывода нет. В проведенных вычислениях нас больше всего интересуют две величины: максимальное из полученных значений N и длина пути, под которой будем понимать общее число итераций, необходимое для достижения 1. Для самой 1 максимальное значение равно 1, а



Длины путей (черные точки) и максимальные значения (красные точки) для всех целых от 1 до 27

длина пути — нулю. Для 2 максимум равен 2, а длина пути — 1. Для 3 максимумом будет 16, а длиной пути 7. Пример с тройкой говорит о том, что максимум достигается, а число последовательных итераций может быть значительно больше исходного значения N , так что вполне возможно, что для некоторого значения N эта функция окажется вовсе неограниченной.

Снова вернемся к последовательности, которая порождается начальным значением 27. Как уже было сказано, первые три числа — это 82, 41 и 124, но

N	ДЛИНА ПУТИ	МАКСИМАЛЬНОЕ ЗНАЧЕНИЕ
1	0	1
2	1	2
3	7	16
6	8	16
7	16	52
9	19	52
18	20	52
25	23	88
27	111	9 232
54	112	9 232
73	115	9 232
97	118	9 232
129	121	9 232
171	124	9 232
231	127	9 232
313	130	9 232
327	143	9 232
649	144	9 232
703	170	250 504
871	178	190 996
1 161	181	190 996
2 223	182	250 504
2 463	208	250 504
2 919	216	250 504
3 711	237	481 624
6 171	261	975 400
10 971	267	975 400
13 255	275	497 176
17 647	278	11 003 416
23 529	281	11 003 416
26 623	307	106 358 020
34 239	310	18 976 192
35 655	323	41 163 712
52 527	339	106 358 020
77 031	350	21 933 016

Последовательный перечень самых длинных путей для N от 1 до 100 000

N	ДЛИНА ПУТИ	МАКСИМАЛЬНОЕ ЗНАЧЕНИЕ
1	0	1
2	1	2
3	7	16
7	16	52
15	17	160
27	111	9 232
255	47	13 120
447	97	39 364
639	131	41 524
703	170	250 504
1 819	161	1 276 936
4 255	201	6 810 136
4 591	170	8 153 620
9 663	184	27 114 424
20 895	255	50 143 264
26 623	307	106 358 020
31 911	160	121 012 864
60 975	334	593 279 152
77 671	231	1 570 824 736

Последовательный перечень максимумов для N от 1 до 100 000

два деления подряд отбрасывают нас назад, к 31. Можно сказать, что после пяти шагов мы почти не продвинулись вперед.

Но если вычисления продолжить, метод «три шага вперед и два назад» приводит к осциллирующей кривой с постоянно возрастающей амплитудой. Новыми пиками будут 142, 214, 322 и 484. В дальнейшем будут и спады (на 19-м шаге значение опустится до 91), но прослеживается общая тенденция к возрастанию. Миновав числа 700, 1186, и 2158, кривая достигнет весьма значительной величины: 9232. Казалось бы, мы на верном пути. Но, увы, этот путь после 111 шагов завершается в 1, так и не поднявшись выше 9232. (Вся последовательность вычислений графически представлена на с. 102.)

Подобные вычисления проводились с огромным набором целых чисел. Сотрудник Токийского университета Набуо Йонедэ исследовал все целые числа до 2^{40} , т.е. до $1,2 \times 10^{12}$. Результат во всех случаях был одним и тем же: после конечного числа шагов последовательность навсегда попадала в цикл 4, 2, 1. Из первых 50 целых чисел самая большая длина пути возврата в 1 у числа 27 (впрочем, для 41 и 31 этот путь не намного короче, а по пути достигаются те же самые пики; это должно быть ясно из сказанного выше). Целых чисел, которые порождали бы бесконечную последовательность, уходящую неограниченно вверх, не было найдено, равно как не найдены и другие циклы, кроме 4, 2, 1. И все же утверждать, что все целые числа ведут себя одинаково, мы не можем, так как этому пока нет теоретического обоснования.

ИСТОРИЯ проблемы « $3N + 1$ », как ее обычно называют, хоть и довольно туманна, вряд ли уходит в глубь веков. В течение последних примерно 30 лет эта задача время от времени ставилась на факультетах математики и кибернетики различных университетов. Она появлялась и исчезала так же непредсказуемо, как непредсказуемо и поведение чисел, получаемых в процессе решения рассматриваемой задачи. Сотрудник фирмы Bell Laboratories Джеффри Лагариас, недавно изучавший истоки этой задачи и попытки ее решения, отметил, что она, по видимому, открывалась не однажды. В 1930 г. Лотар Коллатц, еще будучи студентом Гамбургского университета, исследовал класс задач, включающий в себя и проблему « $3N + 1$ », но результаты его исследований были опубликованы лишь много лет спустя. Английский математик Б.Туэйтс открыл эту задачу независимо от других в 1952 г., а несколькими годами позже ее снова сформулировал Р.В. Эндри из Оклахомского университета в Нормане.

Лагариас ссылается примерно на 20 научных статей по проблеме « $3N + 1$ » и ее обобщениям; большинство из них было опубликовано в течение последнего десятилетия, но задолго до этого она уже передавалась изустно. Коллега Коллатца Х.Хассе в 50-х годах ввел ее в Сиракузском университете, С.Улам — в научной лаборатории Лос-Аламоса и, кажется, еще где-то. С.Какутани, впервые услышавший о проблеме « $3N + 1$ » в 1960 г., сообщил Лагариасу: «Целый месяц весь Йельский университет безрезультатно трудился над этой задачей. Такая же участь постигла исследователей Чикагского университета, когда я им сообщил о ней. Ходила шутка, что эта задача использовалась для заговора, имеющего целью снизить интенсивность математических исследований в США».

Группой исследователей из Лаборатории искусственного интеллекта Массачусетского технологического института в начале 70-х годов была предпринята еще одна длительная атака на эту задачу. Здесь основной упор делался на вычислительные методы, использующие ЭВМ. Во внутреннем (и неопубликованном) отчете этой группы, названном НАКМЕМ (сокращение от "hackers' memorandum" — записки работы), проблема значилась под номером 133.

Постоянно кочуя, задача обрала множество имен. Название «проблема « $3N + 1$ »» мне кажется не очень подходящим, поскольку освещает лишь одну половину процедуры, оставляя вторую в тени. Среди всевозможных вариантов ее названия нашелся один, точнее других отражающий процесс порождения чисел из исходного: «числа-градины». Графически представленная последовательность чисел, получаемых при вычислении, очень похожа на траекторию градины в грозовой туче, поднимающейся в воздушных потоках и затем падающей под силой собственной тяжести.

НА ЯЗЫКЕ высокого уровня, скажем на Бейсике, можно написать программу для вычисления чисел-градин, и займет она всего лишь несколько строк. В самом деле, основной алгоритм формулируется одним предложением. На Бейсике оно имеет вид:

```
IF N MOD 2 = 0 THEN N = N/2
ELSE N = 3 * N + 1
```

Первой здесь записана операция, которую люди (но не машина) выполняют, не прибегая к явным вычислениям: определение четности (или нечетности) числа N . Компьютер пользуется для этого операцией сравнения по модулю $N \text{ MOD } 2$, определяющей остаток от деления на 2 числа N . Если остаток равен 0, то выполнится команда, записанная частью предложения, начинаю-

щегося с THEN, и N будет присвоено значение $N/2$; в противном случае выполнится команда, начинающаяся с ELSE, и N станет равным $3N + 1$.

Такая программа на Бейсике вполне сносно справляется с порождением чисел-градин из нескольких первых сотен чисел. Но если требуются более громоздкие вычисления, процесс невероятно замедляется. В предложении на Бейсике предусмотрено деление (при сравнении по модулю), сравнение и затем либо второе деление, либо умножение на 3 и сложение. Умножение и деление нещадно тратят машинное время, особенно на небольших вычислительных системах. Можно добиться большой экономии, если обращаться непосредственно к центральному процессору на его собственном языке. Это позволит исключить все операции умножения и деления.

Приблизительное представление о такой программе на языке машины дает рисунок справа. Предполагается, что исходное значение N первоначально находится в регистре AX, который служит еще и «сумматором», где выполняются арифметические операции. В нем в двоичной системе записано число 27, с которого начинается вычисление.

На первом шаге исходное число в двоичном коде переписывается в другой регистр, обозначенный на схеме ВХ. За счет особых свойств двоичного представления чисел операция деления в данном случае может быть исключена: сдвиг двоичного числа вправо на один знак эквивалентен делению на два точно так же, как сдвиг десятичного числа вправо на одну позицию соответствует делению на 10. В процессе сдвига самый правый разряд (разряд единиц) сохраняется в ячейке памяти размером в 1 бит, которая называется разрядом переноса. Проверка разряд переноса, можно определить четность числа, поскольку в двоичной системе каждое четное число имеет на конце нуль, а нечетное — единицу.

Если N четное, то вычисления на этом этапе закончены. В регистре AX после сдвига вправо окажется частное $N/2$. В том случае, однако, когда N нечетное, вычисления необходимо продолжить. Прежде всего восстанавливается исходное значение N обращением к регистру ВХ. Далее, вместо умножения на 3 это значение дважды прибавляется. Здесь потребуются две машинные команды вместо одной, но все равно это значительно быстрее. Последний шаг — увеличение на 1 числа в AX. В одном микропроцессоре с таким набором команд вся процедура занимает 20 тактов при нечетном N и 18 тактов при четном N . При тактовой частоте примерно 5 МГц такой фрагмент программы за одну секунду выполняется примерно 250 000 раз. (Можно эконо-

мить даже немного больше машинных тактов, но тогда программа будет более сложной.) Аналогичный алгоритм, но использующий команды умножения и деления, занимает 175 тактов для четного N и 286 тактов — для нечетного.

Из рисунка видно, что регистры имеют 8 разрядов и, следовательно, в них нельзя поместить число больше чем 2^8 , т.е. больше 256. В основном микропроцессоры имеют размер регистров 16 бит, и, следовательно, в них можно записывать числа до 65 536. Но даже такой диапазон весьма ограничивает нас, поскольку программа, использующая 16-разрядную арифметику, не может оперировать с числами-градинами больше 702. Чтобы расширить наши возможности, нужна арифметика с повышенной точностью, в которой число располагается в нескольких регистрах или ячейках памяти. При точности в 32 бит можно оперировать числами почти до $4 \cdot 10^9$, а при 64 бит предел равен 10^{19} . К сожалению, при каждом увеличении точности в той же мере снижается скорость.

Алгоритм получения одного значения N — всего лишь фрагмент рабочей программы. В ней, кроме того, должна быть предусмотрена возможность ввода в машину значений и вывода результатов. Реальные же программы для исследования поведения чисел-градин должны делать еще больше. Например, следует предусмотреть возможность целиком выпечатывать последовательности чисел, получающиеся из данного начального значения, или составлять таблицу максимальных значений и длин пути для каждого из целых чисел. Другая программа могла бы предназначаться для поиска целых чисел, при которых последовательно удлиняется путь и увеличивается максимальное значение.

Разновидности формулы $3N + 1$, в которых используются другие коэффициенты и постоянные, также плохо поддаются исследованию. У.Госпер и Р.Шоппель, когда они еще входили в группу НОКМЕМ, исследовали проблему « $3N - 1$ » и показали, что она эквивалентна проблеме « $3N + 1$ » с отрицательными значениями N . Все выбираемые ими числа приводили к одному из трех замкнутых циклов: самый длинный из них начинается при $N = 17$ и состоит из 18 шагов.

Программу, позволяющую лишь выявить числа, которые не попадают в цикл 4, 2, 1, можно значительно упростить. Если числа проверять подряд, начиная с 1, то в изучении нуждаются лишь нечетные числа. Любое четное число сразу будет уменьшено вдвое, и, следовательно, путь, который должно породить полученное число, окажется уже изученным раньше. По тем же причинам нет смысла проследивать весь путь до 1: как только значение N опу-



Алгоритм получения чисел-градин

скается ниже исходного, дальнейшее исследование можно прекратить. Работающий ныне в Бостонском университете бывший член группы НОКМЕМ У.Хеннеман предложил еще более эффективные правила для сужения области исследования.

ПОСЛЕ всего, что было сказано, очевидно, нет смысла продолжать поиски числа, которое вело бы себя как-то иначе. Но даже если такое число никогда не будет найдено, сам факт существования чисел-градин ставит немало любопытных вопросов.

Возможно, самые интригующие свойства таких чисел — это выраженный характер распределения максимальных значений и длин пути. Если такое небольшое число, как 27, удерживается «в подвешенном состоянии» в течение 111 шагов и достигает максимума 9232, то можно было бы ожидать, что длина пути и максимальные значения растут так же быстро, как и N . В действительности же длины пути растут крайне медленно; рост максимальных значений более быстрый, но тоже весьма неупорядочен.

Среди первой сотни целых чисел самый длинный путь равен 118 шагам ($N = 97$); из первых 100 000 чисел самый длинный путь равен лишь 350 шагам ($N = 77\,031$). Таким образом, при увеличении N в 1000 раз длина пути увеличивается только втрое. Здесь, по-видимому, имеет место логарифмическая зависимость. Что же касается максимального значения, то рекордная величина 9232, достигаемая числом $N = 27$, была побита лишь числом $N = 255$: его максимум равняется 13 120. Другие из зарегистрированных максимумов распределялись самым

беспорядочным образом. Градина 77 671 побила все рекорды, достигнув 1 570 824 736.

Легко видеть, что максимальные значения, получаемые при вычислении чисел-градин, неизменно четные. Можно также доказать, что лишь нечетное N способно установить новый рекорд максимального значения (за исключением числа 2). Для чисел, устанавливающих новые рекорды длины пути, мне неизвестны теоретические аргументы ни в пользу их четности, ни в пользу нечетности. Однако среди первых 100 000 рекордные длины пути достигались по-

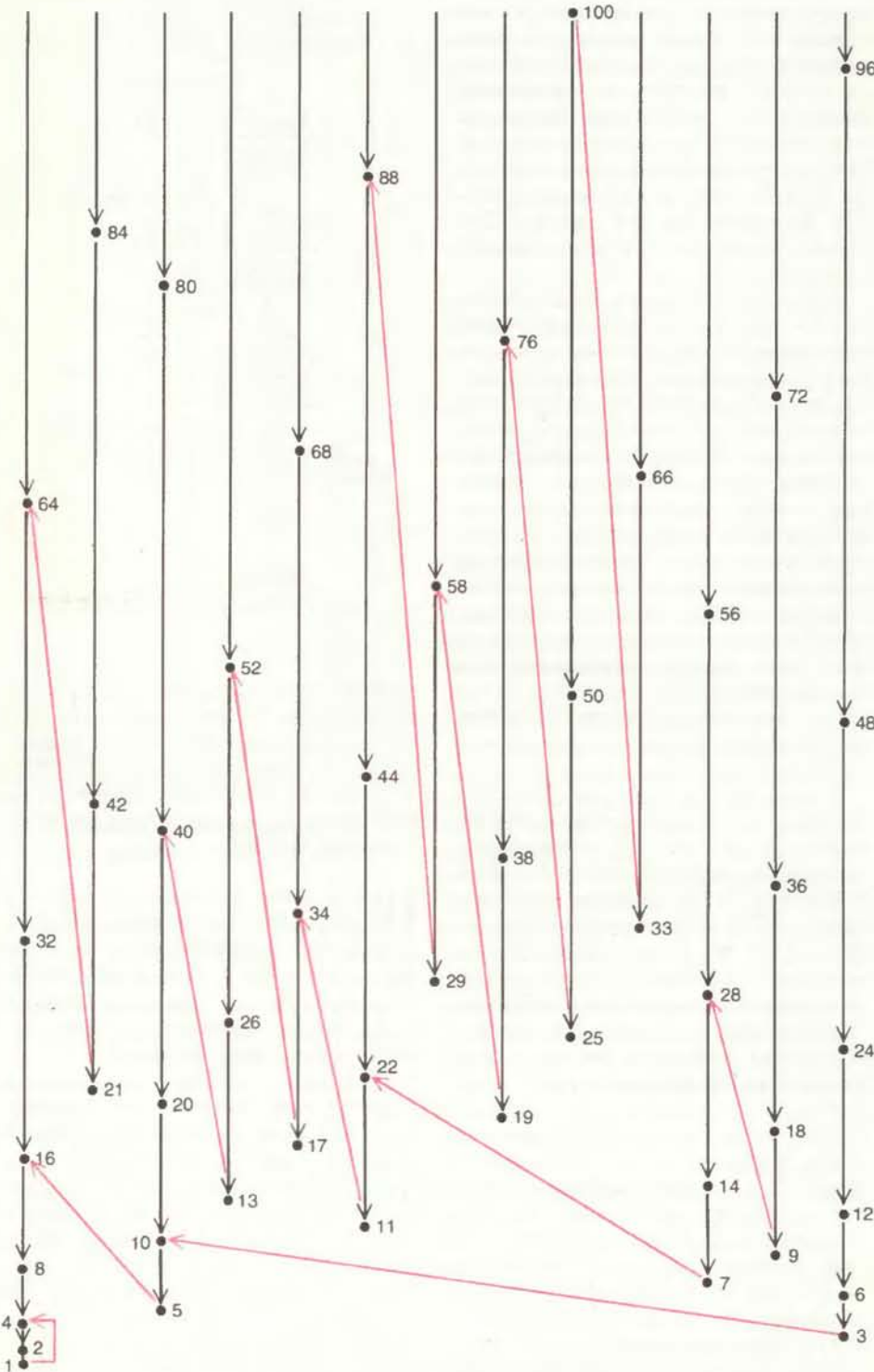
чти исключительно нечетными числами; среди рекордсменов оказались лишь три четных числа — 6, 18 и 54 (опять не считая 2).

Полученная на ЭВМ распечатка длин пути и максимумов для некоторой области целых чисел представляет собой удручающую смесь закономерности и беспорядка. Последовательность безусловно не случайна, но ей не удается дать никакого толкования. Например, некоторые максимальные значения повторяются чаще, чем другие, причем появление некоторых максимумов настолько часто, что их нельзя описать каким-либо статистическим законом. Выдающийся в этом смысле пример представляет максимум 9232, который ранее других чисел достигается числом 27. Среди первых 1000 целых более 350 достигают того же максимума. Порождающие его числа, однако, не имеют никаких явных общих черт.

Распределение длины пути столь же хаотично. Можно породить любую из возможных длин пути (последовательностью точных степеней двойки), но и в этом случае некоторые числа будут появляться чаще других. Кроме того, и длины пути, и максимумы проявляют четкую тенденцию к группированию в кластеры. Ф.Грюнберг из Калифорнийского университета в Нотридже в 1976 г. опубликовал перечень таких кластеров. Самый обширный из них представлял собой цепочку из 52 целых чисел, которые проходили одинаково длинный путь. Возникает вопрос: могут ли одинаковые максимумы и одинаковые длины пути достигаться двумя последовательными числами? Ответ на этот вопрос можно дать в алгебраической форме, но если читатель предпочитает демонстрацию на примерах с числами, ему следует рассмотреть последовательности для всех N от 386 до 391.

ОДИН из подходов, позволяющих пролить свет на задачу о градинах, состоит в обратной ее постановке. Предположим, что все положительные целые числа действительно обязательно попадут в цикл 4, 2, 1. Тогда они должны образовать неразрывную цепь, связывающую все бесконечное счетное множество целых чисел с циклом в основании этой цепи. Поэтому возможно и обращение преобразования над числами-градинами: начиная с 1, применяем преобразование, как бы пятью назад, для получения больших чисел. Если какое-либо число таким способом получить не удастся, оно не может достичь единицы.

Этот метод прекрасно бы подошел для получения общего решения задачи о градинах, если бы только его можно было довести до конца. Оказывается, процедура не столь прямолинейна, как кажется. Обычная функция преобразо-



Дерево, порожденное обратной функцией преобразования чисел-градин

вания градин однозначна: у любого значения N в любой точке вычислений только один преемник. Если, например, $N = 40$, то следующим (порожденным им) числом может быть лишь 20. Когда же мы проходим путь в обратном направлении, возникает неоднозначность. Относительно числа 20 понятно, что оно могло получиться из 40, которое, следовательно, и должно теперь идти за ним. Но после числа 40 может получиться либо 80, либо 13: поток растекается на два рукава, каждый из которых нужно исследовать. Разветвления происходят во всех точках вида $6K + 4$, где K — любое неотрицательное целое, включая нуль.

Такого рода разветвляющуюся систему можно проследить только до определенного уровня. Движемся по отдельной ветви до некоторого наперед заданного предела и затем переключаем внимание на другую ветвь. При пределе 100 надо будет изучить 13 ветвей, причем в этой числовой системе ручейков и протоков между собой связаны 49 чисел. Если предел равен 1000, то ветвей будет 84, а чисел 340. Предел 10 000 дает 1065 ветвей, которые объединяют 4235 чисел. Заметим, что больше половины чисел провалилось между ветвями потока. При возрастании предела растет количество включаемых чисел, но теряется еще больше. Если бы можно было изучить эту разветвляющуюся систему до какого угодно уровня, то были бы охвачены абсолютно все числа? Этот важный вопрос все еще остается без ответа.

В ДЕКАБРЬСКОМ номере журнала в качестве маловероятных кандидатов для решения неалгоритмическим методом с использованием крупноформатного электронного бланка (КЭБ) были упомянуты две комбинаторные задачи. Несколько читателей моментально показали, что они поддаются решению.

Решения задачи о Ханойской башне, полученные КЭБ-программой, прислали Д.Бехар, Дж.Джонс-младший, Дж.А.Миллер, Дж.Слейден, Э.Уин-Джонс и др. Все они использовали один и тот же прием. Алгоритм, в котором диски с нечетными номерами вращались по часовой стрелке, а с четными — против часовой, был видоизменен так, что временные последовательности инструкций превратились в их пространственный массив.

Бехар, Миллер и Слейден решили также задачу о восьми ферзях. Здесь основная трудность заключается в необходимости вернуться назад, когда испытываемое решение ошибочно. Я предложил было регистрировать предыдущие безуспешные попытки, но это не выход из положения. В пояснении к способу решения этих задач при помощи КЭБ-программ Д.Фремлин указал

на «метод, который будет порождать все возвраты без использования какой бы то ни было иной памяти, кроме дисплея . . . Формулы эти сложны и включают последовательные алгоритмы,

если они представлены в своем естественном виде, но все эти подпрограммы «поиска» могут быть представлены на крупноформатном электронном бланке локальными вычислениями».

Издательство **МИР** предлагает:

Сабадвари Ф., Робинсон А.
ИСТОРИЯ АНАЛИТИЧЕСКОЙ ХИМИИ

Перевод с английского



В настоящее время единственная полная сводка по истории важнейших направлений и методов качественного и количественного анализа, написанная высокопрофессионально и снабженная обширным списком оригинальной литературы; послед-

нее делает книгу также своеобразным историческим справочником. Написана венгерским историком Ф. Сабадвари и английским химиком-аналитиком А. Робинсоном.

Для широкого круга химиков всех специальностей.

1984, 15 л. Цена 1 р. 10 коп.



Наука и общество

Неугомонные кварки

КВАРКИ появились сначала как теоретическая концепция, необходимая при попытках построить субатомные частицы из комбинаций более фундаментальных объектов. Кварки стали реальностью, когда бомбардировка протонов электронами в Станфордском ускорительном центре (SLAC) показала, что внутри протона электроны наталкиваются на точечноподобные объекты. С тех пор при создании любых теорий стоит проблема: как ограничить свободу кварков? По-видимому, кварки связаны друг с другом только малыми силами. В то же время их невозможно «вытащить» из протона наружу. Отсюда возникла идея, что кварки удерживаются в протоне силами, которые становятся больше по мере увеличения расстояния между ними. Именно поэтому кварки не могут разойтись дальше, чем на расстояния порядка диаметра протона (т.е. дальше, чем на один ферми, или 10^{-13} см). Таким образом, протон является прочным «мешком» для кварков, откуда они не могут ускользнуть. Силы, удерживающие кварки вместе, называются цветовыми. Говорят, что каждый кварк несет цветовой заряд. Теорию цветовых взаимодействий, развитую в последнее десятилетие, называют квантовой хромодинамикой.

В 1980 г. были получены экспериментальные данные, которые заставляют усомниться в ограничениях, наложенных на свободу кварков. В тяжелых атомных ядрах (например, в железе-56), состоящих из большого числа протонов, кварки, по-видимому, обретают поразительную подвижность. Эксперименты проводились на синхротроне Европейской организации ядерных исследований (ЦЕРН) в Женеве группой физиков, известной под названием Европейской мюонной коллаборации (European Muon Collaboration, EMC). В каждом эксперименте ядра железа бомбардировались мюонами — субатомными частицами с зарядом электрона и массой, в 207 раз превышающей массу электрона. Так же как и электроны, мюоны взаимодействуют с ядрами в основном посредством электромагнитных сил. Поэтому характер их «рассеяния» на препятствиях не слишком сложен с теоретической точки зрения. Экспериментаторы фиксировали энергию и угол рассеяния каждого мюона. Отсюда они смогли вывести закон распределения импульса между точечноподобными объектами (предположительно, кварками), образующими внутреннюю структуру протонов. Именно для выяснения этой внут-

ренней структуры и использовалось «просвечивание» мюонами.

Уже в первых экспериментах в Станфорде было найдено, что только около 35% импульса протона можно отнести на счет движения так называемых валентных кварков — двух *u*-кварков и одного *d*-кварка, из которых, как принято считать, состоит протон. 50% импульса протона приходится на долю глюонов — частиц, обмен которыми и порождает силы, связывающие кварки (т.е. цветовые взаимодействия). Оставшиеся 15% импульса уносятся «морскими» кварками — множеством кварк-антикварковых пар, существование которых диктуется законами квантовой теории поля. В квантовой теории поля сочетаются принципы квантовой механики и теории относительности; она призвана описывать динамику любых субатомных частиц, в том числе и кварков. Часть внутренней энергии протона сосредоточена в квантовых полях, которые «заявляют» о своем присутствии (например, при просвечивании мюонами) рождением множества кварков и глюонов.

Оказалось, что в ядре железа кварки отличаются двумя свойствами. Прежде всего валентные кварки несут меньшую долю импульса, чем они должны были бы нести в изолированном протоне. Кроме того, в этом случае «морских» кварков гораздо больше: примерно на 60%. Характерная энергия связи протонов и нейтронов в ядре составляет по порядку величины 10 млн. электронвольт. Полагают, что энергия, отвечающая внутренней структуре протонов и нейтронов, по крайней мере в 10 раз больше. И все же связь протонов и нейтронов каким-то образом приводит к такой «перетасовке» импульса, когда возникают новые «морские» кварки.

Попытку объяснить эти наблюдения предпринял Р. Джаффе из Массачусетского технологического института. Он предположил, что в ядре железа валентные кварки «частично освобождены», потому что размер трехкварковых мешков велик по сравнению с расстояниями между нуклонами в тяжелых ядрах. В результате мешки перекрываются и валентные кварки могут «просачиваться» из одного мешка в другой. Здесь начинает действовать принцип неопределенности — одна из основных доктрин квантовой механики. Из него следует, что при увеличении размеров области, доступной для кварков, их импульс должен уменьшаться.

Но почему же появляются новые «морские» кварки? Чтобы ответить на этот вопрос, Ф. Клоуз, Р. Робертс и Г. Росс из Резерфордской лаборато-

рии в Англии обобщили идеи Р. Джаффе. Они отметили, что взаимодействие мюона с кварком внутри протона характеризуется двумя пространственными масштабами. Первый масштаб характерен для процесса просвечивания мишени мюонами. Согласно квантовой хромодинамике, цветовой заряд кварка приводит к появлению окружающего его квантового поля, что равносильно возникновению вокруг него облака глюонов. Относительное количество этих глюонов уменьшается по мере удаления от траектории кварка. Это во многом напоминает ситуацию, когда электрический заряд движется с большой скоростью (составляющей заметную часть скорости света) и порождает электромагнитное поле, т.е. облако фотонов. При просвечивании мюон может сбить кварк с его пути. Однако какая-то часть окружавших его глюонов (по крайней мере те из них, которые расположены на некотором минимальном расстоянии от кварка) будет продолжать двигаться без изменений. При увеличении энергии мюон ближе подлетает к кварку и поэтому освобождает большее число глюонов. Затем эти глюоны могут проявиться в виде «морских» кварковых пар. Подобным же образом фотоны, освобождающиеся из облака вокруг быстро движущегося электрона, порождают электрон-позитронные пары.

Второй пространственный масштаб, характеризующий взаимодействие мюона с кварком, связан с теми расстояниями, на которые кварк может перемещаться в ядерной материи. В квантовой теории поля математическое описание движения кварка производится с помощью так называемых операторов. Один оператор производит удаление кварка из некоторой точки в ядре, второй — соответствует его появлению в другой точке. Произведение этих двух операторов дает величину «ожидания», характеризующую «средний путь» кварка. Величина «ожидания» является мерой свободы, которой пользуется частица.

Клоуз с коллегами заметили, что в квантовой хромодинамике имеется лишь один параметр с размерностью длины, т.е. один-единственный пространственный масштаб. Тогда изменение масштаба, характеризующего процесс просвечивания, должно приводить к тем же явлениям, что и изменение масштаба, характеризующего степень свободы кварка. Если первый приводит к изменению числа «морских» кварков, то так же должен действовать и второй. Клоуз с коллегами провели конкретный расчет и показали, что если в тяжелых ядрах кварки будут на 10—20% свободнее, чем в изолированном протоне, то проявятся обе стороны EMC-эффекта; валентные кварки будут нести меньший импульс, а число

«морских» кварков увеличится.

Предположение о частичном освобождении кварков в тяжелых ядрах воодушевило некоторых теоретиков — была даже высказана гипотеза, согласно которой мюоны достаточно высокой энергии могут настолько увеличить степень свободы кварков, что характерный масштаб сравняется с размерами ядер. Тогда кварки смогли бы двигаться по всему ядру, которое стало бы проводником цвета, подобно тому как металлы проводят электричество. Менее радикальная позиция — это просто состояние удовлетворения, что подтверждаются предсказания квантовой хромодинамики. Выдвигаются гипотезы о том, что ядерная материя на очень ранних стадиях эволюции Вселенной представляла собой газ свободных кварков и глюонов, которые затем объединились в протоны и нейтроны. Для создания такого газа необходимы экстремально высокие температуры или экстремально высокие плотности ядерной материи (а может быть, и то и другое одновременно). Энтузиазм ученых, склонных предпринять такую попытку, может быть подкреплен тем фактом, что даже при нормальных плотностях ядер может происходить частичное освобождение кварков.

«Да-да-да» и «ба-ба-ба»

ПРЕЖДЕ чем ребенок начинает произносить понятные нам слова, он четыре-шесть месяцев, как мы говорим, лепечет. А еще раньше, до того, как он начнет лепетать, младенец гукает и произносит невнятные звуки. На этом этапе у него формируется способность лепетать, т.е. произносить относительно устойчивые звуки, перемежающиеся периодическими паузами, во время которых воздух свободно проходит через голосовой тракт. Ритмические звуки игрового характера типа «да-да-да» или «ба-ба-ба», которые произносит ребенок, хорошо известны детским воспитателям. Р. Старк и Дж. Бонд, сотрудники Института Джона Кеннеди в г. Балтиморе, в настоящее время изучают речевые особенности трех маленьких детей. Исследователи пришли к выводу, что их поведение отражает резкие скачки в развитии речевых навыков и, с точки зрения нейрофизиологии, вероятно, связано с такими движениями, как ритмическое размахивание ручками и покачивания, которые начинаются у детей примерно в том же возрасте. Результаты своих исследований ученые представили на заседании Американского акустического общества, состоявшемся недавно в Сан-Диего (шт. Калифорния).

Несмотря на то что детское лепетание уже давно признано особой стадией, отличной от предшествующего ему периода произнесения звуков, рас-

сматриваемая проблема вызвала новый интерес у лингвистов, так как пока у детей наблюдали лишь небольшой набор произносимых звуков. До недавних пор большинство ученых полагали, что лепечущие младенцы пробуют произносить все звуки, которые встречаются в языках всех народов. Теперь же известно, что многие используемые в речи звуки почти никогда не появляются в детском лепете, а другие, напротив, произносятся всеми детьми очень часто, независимо от языка той страны, где родился ребенок. Детский лепет изучают в странах, в которых говорят на арабском, китайском, английском, японском, норвежском, испанском языках и на языке юкатанских индейцев. У всех народов, говорящих на этих языках, младенцы чаще всего произносят носовые звуки *n* и *m*, промежуточные типа *уай* или *уи*, а также отрывистые согласные звуки, такие как *d*, *t* или *b*, за которыми следует гласный звук, получающийся при естественном «лежачем» положении языка, как, например, звук *e* в слове «бег» или звук *a* в слове «пат». Гласные звуки, получающиеся при максимально поднятой спинке языка (типа *o* в слове «ода») или передние звуки, произносимые с округленными губами, как в слове «тур», встречаются редко. Так же редки согласные звуки *л*, *р*, *ф*, и *в* и сочетания согласных типа *ст*. Кроме того, как указывает Д. Кимбрау Оллер из Университета г. Майами, дети в период лепетания предпочитают те звуки, которые потом часто повторяются ими несколько месяцев спустя, когда они начинают произносить значащие слова.

Старк и Бонд в своих исследованиях использовали звуковую и видеозапись того, что произносили три младенца в домашней обстановке. Записи звуков были проанализированы и выявлены их различные акустические характеристики, такие, как форма звуковых импульсов, частотный спектр, периодичность повторения звуков, а также периодичность согласных звуков. Видеозаписи позволили связать звуки, произносимые как до, так и после того, как ребенок начинает лепетать, с положением речевых органов и характером артикуляции и таким образом транскрибировать их. Старк и Бонд сделали вывод, что лепетание является не только довольно стереотипным видом поведения, но и неизбежным этапом в развитии лингвистических способностей. До того как младенец начинает уверенно лепетать, он произносит звуки с длительными паузами, во время которых либо просто молчит, либо переводит дыхание. И хотя в непрерывной серии звуков наблюдались различные изменения, ни в одной из них не удалось выделить отдельные слоги. Когда же в возрасте 6-8 месяцев ребенок вдруг на-

чинает лепетать, в его «речи» можно отчетливо различить отдельные непродолжительные слоги; такие слоги были выделены по быстрым изменениям интенсивности произнесения звуков, а также по форме звуковых импульсов. В каждой непрерывной серии звуков можно было различить от двух до четырех слогов, каждый длительностью около полусекунды, причем младенцы произносили их по два или по три подряд.

На основании проведенных исследований все же нельзя сказать, какую роль играет детский лепет в овладении речью. Оллер поддерживает ту точку зрения, что лепет отражает появление у ребенка способности контролировать длительность и артикуляцию речевых звуков, хотя он и указывает, что эта стадия не обязательна в процессе овладения речью. Дети, не способные лепетать вследствие перенесенной трахеотомии, могут научиться говорить после того, как целостность трахен будет восстановлена. Другие исследователи полагают, что дети, лепечущие, играя со взрослыми, учатся очередности в разговоре, что является неотъемлемым поведенческим элементом в речевом общении. Старк и Бонд отмечают, что примерно в том же возрасте, когда дети лепечут, они проявляют интерес к различным предметам и «общение» с ними часто принимает форму повторяющихся движений, таких, как махание или удары ручками. Такие повторяющиеся элементы поведения, возможно, отражают развитие моторных функций коры головного мозга. Поскольку в характере лепета у разных детей отмечается значительно меньшее разнообразие, чем в других формах поведения, то некоторые лингвисты считают возможным по отклонениям в характере детского лепета обнаруживать на ранней стадии различного вида неврологические нарушения.

Zip + 4

ОКОЛО 650 тыс. работников заняты в США сбором, сортировкой и доставкой примерно 118 млрд. почтовых отправлений в год. С целью снижения издержек на оплату рабочей силы почтовое ведомство страны уже на протяжении нескольких лет разрабатывает план автоматизации процесса сортировки писем и внедрения девятизначной кодовой системы (в настоящее время в США действует давно введенная пятизначная система кодирования адресов ZIP. — *Перев.*), которая позволит с помощью машин сортировать почтовую корреспонденцию с точностью до квартала и даже до дома, в котором живет получатель. Всерьез разработкой программы «ZIP + 4» занялись в октябре 1983 г., когда Совет

управляющих почтовой службы одобрены ценовые стимулы (скидки) для тех, кто будет проставлять на своих объемных и срочных отправлениях девятизначные коды, с тем чтобы указанные на конвертах зашифрованные адреса могли считываться машиной.

В конце 1982 г. почтовые отделения стали получать новое оборудование двух типов. Оптический считыватель знаков (ОСЗ) считывает с конверта город назначения, штат и код ZIP, проверяет для большей достоверности соответствие кода и города, переводит код ZIP в штриховой код, который затем проставляется на конверте, и, наконец, направляет письмо в один из 60 стеллажей. Вслед за этим менее дорогой сортирователь штриховых кодов (СШК), используя пятизначный код, сортирует письма по местонахождению почтового отделения, а по девятизначному коду распределяет письма по

почтальонам. Наблюдательные люди уже могли заметить штриховые коды (последовательность длинных и коротких вертикальных черточек) внизу на конвертах, получаемых из различных учреждений.

Читающие машины в настоящее время нашли широкое применение: те из них, которые могут читать и озвучивать разнообразные печатные материалы, установлены в библиотеках и учебных заведениях и используются слепыми. Еще в 70-е годы почтовые отделения в Японии и Европе стали оснащаться ОСЗ. Принцип действия всех таких машин одинаков: электронная камера сканирует печатный текст, направляя на него луч света и измеряя разность отраженных потоков от печатных знаков и фона. Затем сканирующее устройство преобразует изображение в цифровые сигналы и направляет их в ЭВМ. С помощью специальных программ ЭВМ по закодированным элементам начертания распознает отдельные буквы и цифры.

Хотя на первый взгляд может показаться, что считывать знаки с конвертов гораздо легче, чем читать книги, все же процесс машинной сортировки связан с рядом трудностей, возникающих в связи с широким разнообразием подлежащих обработке материалов. ОСЗ может читать большой набор различных печатных знаков, но он не способен считывать рукописные знаки, шрифты специальных гарнитур и знаки, «напечатанные» лазерным лучом. Наклонные линии в знаках, слабый контраст печати и знаки, не относящиеся к набору, которому «обучена» машина, также не могут восприниматься ею. И наконец, ОСЗ часто приходится сталкиваться с различными ошибками или сокращениями, которые люди допускают в написании адресов. ОСЗ для почтовых целей, выпускаемые фирмой Pitney Bowes, например, содержат в своей памяти более 20 вариантов написания названия штата Филадельфия, и, кроме того, рабочая программа машины позволяет ей распознавать значение слов Big Apple (Большое яблоко), как иногда в адресах пишут вместо Нью-Йорк. Современные ОСЗ безошибочно читают от 60 до 70% деловой корреспонденции, но почтовые служащие считают, что этот показатель следует увеличить по меньшей мере на 10% и в основном за счет обучения работников, ответственных в учреждениях за корреспонденцию, правильному написанию кодированных адресов с расчетом на последующую машинную обработку. Только при этих условиях автоматизация обработки почтовой корреспонденции окажется рентабельной, и отправители смогут извлечь из нее определенные выгоды.

Применение ОСЗ и СШК позволяет сократить большое число работников,

заниятых на сортировке почтовой корреспонденции: при кодированном по системе ZIP + 4 адресе первый, кто его читает, — это почтальон. Новые машины способны обрабатывать около 10 тыс. писем в час, причем каждая машина обслуживается одним человеком. Используя неавтоматизированную сортировочную машину, почтовый работник, который вынужден сам читать адрес на конверте, за 1 ч сортирует 1800 писем. Если же сортировка осуществляется полностью вручную, то за то же время он сортирует лишь 800 писем.

К 1988 г. почтовое ведомство США намеревается закупить примерно 650 ОСЗ и 700 СШК. Стоимость этого оборудования составит 740 млн. долл. Оно будет установлено на 211 главных почтовых отделениях, через которые проходит около 90% корреспонденции, поддающейся машинной обработке. По завершении программы автоматизации потребность в рабочей силе, как полагает ведомство, снизится на 15 600 человек, что позволит сэкономить 600 млн. долл. в год. Из этой суммы 150 млн. долл. пойдет на возмещение потерь, обусловленных предоставлением скидки почтовым отправителям, а остальные 450 млн. долл. будут израсходованы на мероприятия, связанные со стабилизацией цен на почтовые услуги.

Удастся ли на самом деле получить ожидаемую экономию, зависит от того, насколько предполагаемые скидки будут стимулировать отправителей использовать систему ZIP + 4. Планируемый размер скидки равен 0,5 цента на каждое письмо, если в отправляемой партии содержится не менее 500 предварительно отсортированных писем, за что отправитель сейчас уже получает скидку по 3 цента на письмо, и 0,9 цента с обычной стоимости отправления одного письма в размере 20 центов, если партия содержит не менее 250 предварительно неотсортированных писем. Переход на новый вид оформления служебных почтовых отправлений имеет решающее значение, поскольку 83% всей срочной почты приходится на деловую корреспонденцию. Поскольку частная корреспонденция, как правило, непригодная для машинной обработки, составляет лишь 6% всех почтовых отправлений (остальные 11% это ответы на деловые письма), то почтовое ведомство не волнуется, будут ли частные лица использовать 32 млн. девятизначных кодов. Оно даже не намерено оповещать домовладельцев об их кодах. Да и частные корреспонденты в свою очередь не проявляют интереса к кодированию адресов на своих отправлениях по новой системе: добавление четырех цифр позволит повысить эффективность сортировки корреспонденции, но, как указывает само почтовое ведомство, не ускорит ее доставку.

Издательство МИР предлагает:

Дж. Мик, Дж. Брик ПРОЕКТИРОВАНИЕ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ УСТРОЙСТВ С РАЗРЯДНО- МОДУЛЬНОЙ ОРГАНИЗАЦИЕЙ

Перевод с английского

Подробно рассмотрен весь комплекс теоретических и практических проблем, относящихся к созданию и функционированию микропроцессоров с разрядно-модульной организацией. Изложение ориентировано на компоненты семейства биполярных интегральных схем БИС 2900. Разобрано большое число практических примеров, иллюстрирующих основные этапы проектирования микропроцессорных устройств с использованием элементов, которые позволяют компоновать машины с заданными вычислительными возможностями.

Для специалистов, связанных с проектированием вычислительных устройств.

1984, 42 л. Цена 3 р. 60 к.



Издательство
МИР
предлагает:

М. Ногради
СТЕРЕОХИМИЯ

Перевод с английского

Книга состоит из трех глав, посвященных соответственно статической, динамической и прикладной стереохимии. В гл. 1 рассматривается строение стереоизомерных органических и элементоорганических соединений на основе принципов молекулярной симметрии и хиральности. В гл. 2 на большом числе примеров разбираются основные закономерности динамической стереохимии. В гл. 3 рассматриваются различные практические приложения принципов стереоселективности и стереоконтроля для понимания разнообразных химических превращений.

Книга полезна для самых разных категорий читателей. Студенты химических специальностей найдут для себя в ней новые теоретические подходы и новые примеры из области практической стереохимии, дополняющие основной курс преподавания этой науки. Научные сотрудники всех химических профилей смогут с ее помощью существенно повысить свою теоретическую подготовку и создать полное представление о реальных возможностях стереохимических подходов и методов для решения целого ряда актуальных научных задач. Специалисты по физическим методам исследования смогут по этой книге ознакомиться со многими актуальными научными направлениями, в развитие которых важный вклад может внести использование современных приборов и новых методик эксперимента. И наконец, научные сотрудники, для которых стереохимия является основной специальностью, смогут воспользоваться этой книгой как удобным современным справочником, содержащим интереснейшие сведения из ряда зарубежных обзоров, монографий и периодических изданий.

1984, 22 л. Цена 3 р. 60 к.



РИС

TROPICAL CROPS: MONOCOTYLEDONS 1. J. W. Purseglove. John Wiley and Sons, Inc., 1972.

AFRICAN CEREALS: ELEUSINE, FONIO, BLACK FONIO, TEFF, BRACHIARIA, PASPALLUM, PENNISETUM AND AFRICAN RICE. R. Porteres in *Origins of African Plant Domestication*, edited by Jack R. Harlan, Jan M. J. de Wet and Ann B. L. Stemler. Mouton Publishers, 1976.

THE ORIGIN, EVOLUTION, CULTIVATION, DISSEMINATION, AND DIVERSIFICATION OF ASIAN AND AFRICAN RICES. T. T. Chang in *Euphytica*, Vol. 25, pages 425—441; 1976.

PRINCIPLES AND PRACTICES OF RICE PRODUCTION. Surajit K. De Datta. John Wiley and Sons, Inc., 1981.

**ИЗВЕРЖЕНИЕ ЭЛЬ-ЧИЧОНА
И ЕГО ВОЗДЕЙСТВИЕ
НА АТМОСФЕРУ ЗЕМЛИ**

THE CLIMATIC SIGNIFICANCE OF EL CHICHÓN. C. B. Sear and P. M. Kelly in *Climate Monitor*, Vol. 11, pages 134—139; 1982.

STRATOSPHERIC SULFURIC ACID FRACTION AND MASS ESTIMATE FOR THE 1982 VOLCANIC ERUPTION OF EL CHICHÓN. D. J. Hofmann and J. M. Rosen in *Geophysical Research Letters*, Vol. 10, No. 4, pages 313—316; April, 1983.

STRATOSPHERIC AEROSOL MASS AND LATITUDINAL DISTRIBUTION OF THE EL CHICHÓN ERUPTION CLOUD FOR OCTOBER 1982. M. P. McCormick and T. J. Swisler in *Geophysical Research Letters*, Vol. 10, No. 9, pages 877—880; September, 1983.

CLIMATIC EFFECTS OF THE ERUPTION OF EL CHICHÓN. Special issue of *Geophysical Research Letters*, Vol. 10, No. 11, pages 989—1060; November, 1983.

Гущенко И. И. ИЗВЕРЖЕНИЕ ВУЛКАНОВ МИРА (каталог). — М.: Наука, 1979.

**СТОЛКНОВЕНИЯ
АТОМНЫХ ЯДЕР ПРИ
ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЯХ**

NUCLEUS-NUCLEUS COLLISIONS: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON NUCLEUS-NUCLEUS COLLISIONS, MICHIGAN STATE UNIVERSITY, SEPTEMBER 26—OCTOBER 1, 1982. Edited by G. F. Bertsch, C. K. Gelbke and D. K. Scott. North-Holland Publishing Co., 1983.

ANOMALONS AS PINUETS BOUND TO NUCLEAR FRAGMENTS: A POSSIBLE EXPLANATION. Wm. C. McHarris and J. O. Rasmussen in *Physics Letters*, Vol. 120B, No. 1, 2, 3, pages 49—53; January 6, 1983.

Вайнберг С. ПЕРВЫЕ ТРИ МИНУТЫ: СОВРЕМЕННЫЙ ВЗГЛЯД НА ПРОИСХОЖДЕНИЕ ВСЕЛЕННОЙ. Перев. с англ. — М.: Энергоиздат, 1981.

Карманов В. А. АНОМАЛЬНЫЕ ЯДЕРНЫЕ ФРАГМЕНТЫ. Успехи физических наук, 1983, т. 141, вып. 3, с. 525.

**КОЛЬСКАЯ
СВЕРХГЛУБОКАЯ СКВАЖИНА**

Козловский Е. А. КОМПЛЕКСНАЯ ПРОГРАММА ГЛУБИННОГО ИЗУЧЕНИЯ ЗЕМНЫХ НЕДР. — «Советская геология», № 9, 1982.

Y. A. Kozlovsky. KOLA SUPER-DEEP: INTERIM RESULTS AND PROSPECTS. "Episodes", Geological Newsletter, International Union of Geological Sciences, Vol. 1982, Number 4; Ottawa, December, 1982.

КОЛЬСКАЯ СВЕРХГЛУБОКАЯ. Монография, выйдет в свет в 1984 г. Главный редактор Е. А. Козловский.

ОДНОПОЛЫЕ ЯЩЕРИЦЫ

MEIOTIC MECHANISMS OF NATURALLY OCCURRING UNISEXUAL VERTEBRATES. Thomas Uzzell in *American Naturalist*, Vol. 104, No. 938, pages 433—445; 1970.

EVOLUTION OF PARTHENOGENETIC SPECIES OF REPTILES. Charles J. Cole in *Symposium on Intersexuality in the Animal Kingdom*, edited by Rudolf Reinboth. Springer-Verlag, 1975.

CHROMOSOME INHERITANCE IN PARTHENOGENETIC LIZARDS AND EVOLUTION OF ALLOPOLYPOIDY IN REPTILES. Charles J. Cole in *Journal of Heredity*, Vol. 70, No. 2, pages 95—102; 1979.

PARTHENOGENETIC REPRODUCTION IN LIZARDS: HISTOLOGICAL EVIDENCE. Laurence M. Hardy and Charles J. Cole in *Journal of Morphology*, Vol. 170, No. 2, pages 215—237; 1981.

Даревский И. С. ЗАМЕЧАТЕЛЬНЫЕ СКАЛЬНЫЕ ЯЩЕРИЦЫ. — «Природа», № 3, 1982.

Darevsky I. S. in *Biology of Reptiles*, Vol. 13, in press.

**РЕГУЛЯЦИЯ
БИОСИНТЕЗА РИБОСОМ**

RIBOSOMES. Masayasu Nomura in *Scientific American*, Vol. 221, No. 4, pages 28—35; October, 1969.

REGULATION OF BACTERIAL GROWTH, RNA, AND PROTEIN SYNTHESIS. D. P. Nierlich in *Annual Review of Microbiology*, Vol. 32, pages 393—432; 1978.

REGULATION OF RIBOSOMAL PROTEIN SYNTHESIS IN *ESCHERICHIA COLI* BY SE-

Издательство МИР предлагает:

А. Митчел, И. Гарсон ГЛОБАЛЬНАЯ ТЕКТОНИЧЕСКАЯ ПОЗИЦИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Перевод с английского
Обобщающая металлогеническая работа, в которой характеристика рудных месторождений дается в связи с их тектонической позицией в соответствии с основными положениями тектоники плит. Рассматриваются принципы металлогенического анализа на основе этих новых взглядов, а также отдельные группы месторождений в зависимости от их конкретного тектонического положения: месторождения пассивных континентальных окраин, зон субдукции, зон трансформных разломов и линеаментов и т.д.

1984 г., 29 л.
Цена 4 р. 65 к.

Е. Зейболд, В. Бергер ДНО ОКЕАНА. Введение в морскую геологию

Перевод с английского
Книга двух известных исследователей геологии дна Мирового океана — Президента Международного союза геологических наук проф. Е. Зейболда и д-ра В. Бергера представляет собой краткий обзор всех последних достижений мировой науки в области морской геологии. В простой и доступной форме изложены взгляды на происхождение и историю формирования структур дна Мирового океана и его континентальных окраин, рассмотрены состав, источники и различные факторы переноса осадков, распространение морских организмов, вопросы палеоокеанологии и минеральных ресурсов морского дна.

Для геологов, преподавателей, аспирантов и студентов всех геологических специальностей.

1984 г., 22 л.
Цена 3 р. 60 к.



LECTIVE mRNA INACTIVATION. Ann M. Fallon, C. Sue Jinks, Geneva D. Strycharz and Masayasu Nomura in *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Vol. 76, No. 7, pages 3411—3415; July, 1979.

IN VITRO EXPRESSION OF *ESCHERICHIA COLI* RIBOSOMAL PROTEIN GENES: AUTOGENOUS INHIBITION OF TRANSLATION. John L. Yates, Ann E. Arfsten and Masayasu Nomura in *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Vol. 77, No. 4, pages 1837—1841; April, 1980.

REGULATION OF RIBOSOME BIOSYNTHESIS IN *ESCHERICHIA COLI*. Masayasu Nomura, Sue Jinks-Robertson and Akiko Miura in *Interaction of Translational and Transcriptional Controls in the Regulation of Gene Expression*, edited by M. Grunberg-Manago and B. Safer. Elsevier Science Publishing Company, Inc., 1983.

УПАКОВКА ШАРОВ

PRINCIPLES OF COMMUNICATION ENGINEERING. John M. Wozencraft and Irwin Mark Jacobs. John Wiley and Sons, Inc., 1965.

TWELVE GEOMETRIC ESSAYS. H.S.M. Coxeter. Southern Illinois University Press, 1968.

THE LEECH LATTICE, SPHERE PACKINGS, AND RELATED TOPICS. J. H. Conway and N. J. A. Sloane. Springer-Verlag, 1984.

Роджерс К. Укладки и покрытия. — М.: Мир, 1968.

Фейш Тот Л. РАСПОЛОЖЕНИЕ НА ПЛОСКОСТИ, НА СФЕРЕ И В ПРОСТРАНСТВЕ. — М.: Физматгиз, 1958.

Барановский Е. П. Упаковки, покрытия, разбиения и некоторые другие расположения в пространствах постоянной кривизны. ИТОГИ НАУКИ. АЛГЕБРА. ТОПОЛОГИЯ. ГЕОМЕТРИЯ. 1967 г. — М., ВИНТИ, 1969, с. 189—225.

Сидельников В. М. О ПЛОТНЕЙШЕЙ УКЛАДКЕ ШАРОВ НА ПОВЕРХНОСТИ n -МЕРНОЙ ЕВКЛИДОВОЙ СФЕРЫ И ЧИСЛЕ ВЕКТОРОВ ДВОИЧНОГО КОДА С ЗАДАННЫМ КОДОВЫМ РАССТОЯНИЕМ. — Доклады АН СССР, 1973, 213, № 5, с. 1029—1032.

Кабатянский Г. А., Левенштейн В. И. О ГРАНИЦАХ ДЛЯ УПАКОВОК НА СФЕРЕ И В ПРОСТРАНСТВЕ. — Пробл. перед. информ., 1978, 14, № 1, с. 3—25.

Левенштейн В. И. О ГРАНИЦАХ ДЛЯ УПАКОВОК В n -МЕРНОМ ЕВКЛИДОВОМ ПРОСТРАНСТВЕ. — Доклады АН СССР, 1979, 245, № 6, с. 1299—1303.

Левенштейн В. И. Границы для упаковок метрических пространств и некоторые их приложения. — Проблемы кибернетики. Вып. 40. М.: Наука, 1983, с. 43—110.

ИЗОБРЕТЕНИЕ ВОЗДУШНОГО ШАРА И РОЖДЕНИЕ СОВРЕМЕННОЙ ХИМИИ

THE CHEMICAL REVOLUTION: A CONTRIBUTION TO SOCIAL TECHNOLOGY. Archibald Clow and Nan L. Clow. Batchworth Press, London, 1952.

THE HISTORICAL BACKGROUND OF CHEMISTRY. Henry M. Leicester. Dover Publications, Inc., 1971.

A BOOK REVIEW OF AN EARLY (1781) SURVEY OF PROGRESS IN CHEMISTRY. Arthur F. Scott in *Survey of Progress in Chemistry*, Vol. 8, pages 253—277; 1977.

Владимиров А. В. РАССКАЗЫ ОБ АТМОСФЕРЕ. — М.: Просвещение, 1974.

Зоммер К. АККУМУЛЯТОР ЗНАНИЙ ПО ХИМИИ. Перев. с нем. — М.: Мир, 1977.

НАУКА ВОКРУГ НАС

ATOMIC SPECTRA. H. G. Kuhn. Academic Press, 1963.

LIGHT AND COLOR IN NATURE AND ART. Samuel J. Williamson and Herman Z. Cummins. John Wiley and Sons, Inc., 1983.

ЗАНИМАТЕЛЬНЫЙ КОМПЬЮТЕР

THE $3x + 1$ PROBLEM AND ITS GENERALIZATIONS. J. C. Lagarias. To appear in *The American Mathematical Monthly*.

В МИРЕ НАУКИ

Подписано в печать 20.03.84.
По оригинал-макету. Формат 60 × 90 $\frac{1}{4}$.

Гарнитуры таймс, гелиос

Офсетная печать.

Объем 7,00 бум. л.

Усл.-печ. л. 14,00,

Уч.-изд. л. 17,98

Усл. кр.-отт. 52,36

Изд. № 36/3473. Заказ 142-84

Тираж 20 000 экз. Цена 2 р.

Издательство «Мир»

Набрано в редакции по подготовке оригинал-макетов издательства «Мир» на фотонаборном комплексе «Компьюграфик»

Типография В/О «Внешторгиздат»

Государственного комитета СССР

по делам издательств,

полиграфии и книжной торговли.

127576, Москва, Илимская, 7

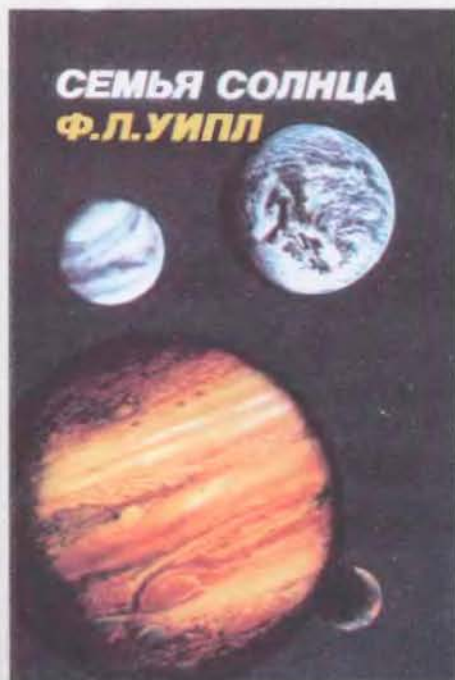


Издательство **МИР** предлагает:

Ф. Л. Уилл

СЕМЬЯ СОЛНЦА

Перевод с английского



Кольца Юпитера и Урана, горы вдвое выше Эвереста на Марсе, грозы и облака из капелек серной кислоты на Венере, действующие вулканы на Ио, океаны жидкого азота на Титане. С этими и другими удивительными открытиями, сделанными с по-

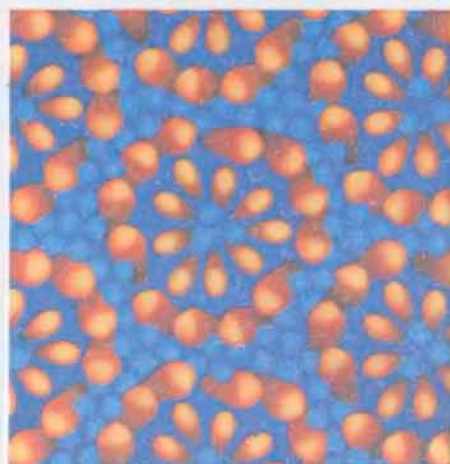
мощью космических аппаратов и интенсивных наземных наблюдений, знакомит книга выдающегося американского астрофизика.

Для широкого круга читателей со средним образованием, желающих познакомиться с достижениями современной науки.

1984. 19 л., 1 р. 50 к.



В следующем номере:



СТРУКТУРА БЕЛКОВ
В БИОЛОГИЧЕСКИХ МЕМБРАНАХ

СПЕКТРОСКОПИЯ ПЕРЕОХЛАЖДЕННЫХ ГАЗОВ

ДРЕВНЕЙШИЕ ЭУКАРИОТИЧЕСКИЕ КЛЕТКИ

ВАРИАЦИИ ОРБИТЫ ЗЕМЛИ
И ЛЕДНИКОВЫЕ ЭПОХИ

ЛАЗЕРНАЯ АБДОМИНАЛЬНАЯ ХИРУРГИЯ

ОДИНОЧНЫЕ ПЧЕЛЫ

ЧИСЛА И МЕРЫ
В ДРЕВНЕЙШИХ ПИСЬМЕННЫХ ДОКУМЕНТАХ

ПСИХОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ МАШИНОПИСИ

О ВОЗДЕЙСТВИИ ЗВУКОМ
НА ВРАЩЕНИЕ ПРОПЕЛЛЕРА
И НЕОБЫЧНЫХ СИНИХ ДУГАХ,
ВИДИМЫХ ВОКРУГ СВЕЯЩИХСЯ ИСТОЧНИКОВ

ПУТЕШЕСТВИЕ В МИР ГЕОМЕТРИИ
С «ЧЕРЕПАХОЙ», УПРАВЛЯЕМОЙ ЭВМ