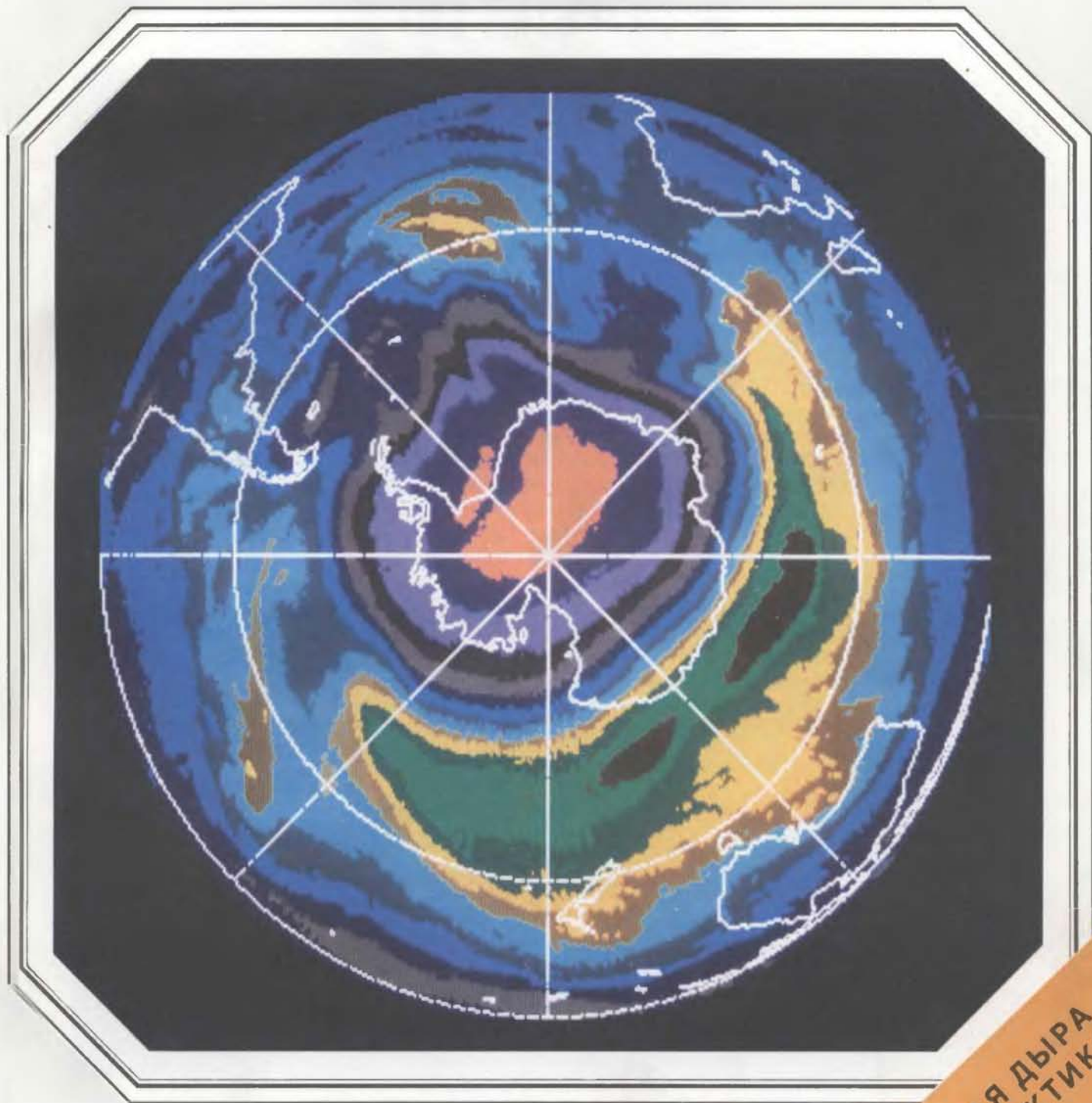


# В МИРЕ НАУКИ

SCIENTIFIC  
AMERICAN

*Издание на русском языке*

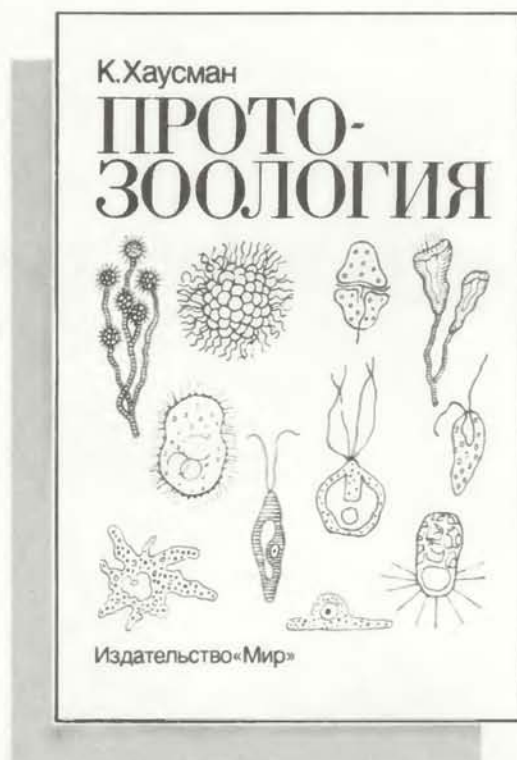


Март **3** 1988

ОЗОННАЯ ДЫРА  
НАД АНТАРКТИКОЙ

## Книги издательства „Мир“

К. Хаусман  
**ПРОТОЗООЛОГИЯ**  
 Перевод с английского



**К**НИГА профессора Свободного университета Западного Берлина представляет собой учебник, отличающийся высоким научным уровнем, компактностью и четкостью изложения материала. Описана систематика и эволюция простейших, организация клеток, структура и функция органелл, а также методы сбора, культивирования и исследования простейших. Книга снабжена удобным определителем и словарем терминов.

Для студентов-зоологов старших курсов, специалистов-биологов, врачей и ветеринаров.

1988, 22 л. Цена 1 р. 80 к.

ПРИБРЕТАЙТЕ КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА «МИР»  
 В МАГАЗИНАХ — ОПОРНЫХ ПУНКТАХ ИЗДАТЕЛЬСТВА  
 121019 Москва,  
 просп. Калинина, 26, п/я 42, магазин № 200 «Московский Дом книги»  
 103050 Москва,  
 ул. Петровка, 15, магазин № 8 «Техническая книга»  
 117334 Москва,  
 Ленинский проспект, 40, магазин № 115 «Дом научно-технической книги»





# 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 1988

*В номере:*

СТАТЬИ

(Scientific American, January 1988, Vol. 258, No. 1)



## 6 Озонная дыра над Антарктикой

*Ричард С. Столарски*

Каждую весну на протяжении последнего десятилетия происходит утончение слоя озона над Южным полюсом. Носит ли это явление локальный характер или свидетельствует о том, что поглощающий солнечный ультрафиолет слой озона подвержен опасности в глобальном масштабе?



## 14 Как клетки-убийцы убивают

*Джон Дин-Е Юн, Жанвиль А. Кон*

Эти клетки иммунной системы узнают клетку-мишень, прочно к ней прикрепляются, обхватывая своими псевдоподиями, и выделяют на ее поверхность белок, образующий поры в клеточной мембране. Содержимое клетки-мишени вытекает через поры, и она погибает



## 22 Реальность квантового мира

*Абнер Шимони*

Эйнштейн считал, что квантовая механика дает неполное описание физических систем. Лабораторные эксперименты показывают, что он, по-видимому, ошибался и мы должны смириться со «странностями» квантового мира



## 32 Антенная решетка со сверхдлинной базой

*Кеннет И. Келлерманн, А. Ричард Томпсон*

Решетка из 10 антенн, размещенных на территории США, позволит получать изображения Вселенной с самыми мелкими ее «детальями». С ее помощью астрономы смогут изучать такие загадочные космические процессы, как энерговыделение в квазарах



## 42 Литоральные рыбы

*Майкл Х. Хорн, Робин Н. Гибсон*

Эти рыбы живут в очень изменчивых и суровых условиях: то их захлестывают волны, то они остаются в отрезанных от моря лужах. Их строение, физиология и поведение обеспечивают приспособленность к столь необычной среде обитания



## 50 Не такие уж редкие эти «редкие земли»

*Гюнтер Мюкке, Петер Мёллер*

Редкоземельные элементы, от которых зависит электронная, металлургическая и стекольная промышленность, не столь дефицитны в минералах. Их распространенность, исследуемая геохимией, свидетельствует о разнообразии путей, ведущих к образованию месторождений твердых ископаемых



## 58 Искусство, иллюзии и зрительная система

*Маргарет С. Ливингстон*

Обработка в мозгу информации о форме, цвете и пространстве осуществляется в трех независимых путях. Именно поэтому некоторые изображения могут порождать удивительные зрительные эффекты



## 68 Трансформатор

*Дж. У. Колтмен*

Сто лет назад это неприметное устройство позволило осуществить на практике распределение электроэнергии. Хотя современная электротехника немыслима без этого устройства, оно остается одним из «невоспетых героев» в истории технического прогресса

### РУБРИКИ

4 Об авторах

5 50 и 100 лет назад

30, 41, 56, 66,

76, 86, 93 Наука и общество

78 Наука вокруг нас

82 Занимательный компьютер

88 Книги

95 Библиография



# SCIENTIFIC AMERICAN

Harry Myers  
PUBLISHER

Jonathan Piel  
EDITOR

## BOARD OF EDITORS

Philip Morrison  
BOOK EDITOR

Armand Schwab, Jr.  
Timothy Appenzeller  
Timothy M. Beardsley

John M. Benditt, Laurie Burnham

David L. Cooke, Jr.

Ari W. Epstein

Gregory R. Greenwell

John Horgan

June Kinoshita

Ricki L. Rusting, Karen Wright

Samuel L. Howard  
ART DIRECTOR

Richard Sasso  
DIRECTOR OF PRODUCTION

Georg-Dieter von Holtzbrinck  
PRESIDENT

Gerard Piel  
CHAIRMAN OF THE BOARD

© 1988 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. Шенелева

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

ЛИТЕРАТУРНЫЕ РЕДАКТОРЫ  
М. М. Попова  
М. В. Суrowова

ХУДОЖЕСТВЕННЫЙ РЕДАКТОР  
С. А. Стулов

ЗАВЕДУЮЩАЯ РЕДАКЦИЕЙ  
Т. Д. Франк-Каменецкая

ТЕХНИЧЕСКИЙ РЕДАКТОР  
С. К. Аносов

КОРРЕКТОР  
Н. А. Вавилова

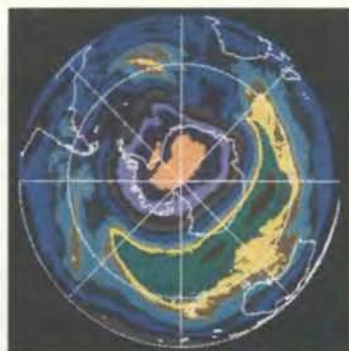
ОФОРМЛЕНИЕ ОБЛОЖКИ РУССКОГО ИЗДАНИЯ  
М. Г. Жуков

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», 1988

## На обложке



## ОЗОННАЯ ДЫРА НАД АНТАРКТИКОЙ

На обложке показана карта распределения озона в атмосфере в Южном полушарии на 15 октября 1987 г.; карта построена по спутниковым данным (см. статью Р.С. Столарски «Озонная дыра над Антарктикой» на с. 4). Оранжевое пятно — это сердцевина области пониженного содержания озона, называемая озонной «дырой», которая образуется каждую весну в течение последних нескольких лет. Последние данные свидетельствуют в пользу гипотезы о том, что в образование дыры вносят вклад соединения хлора, хотя важными, по-видимому, являются и другие факторы.

## Иллюстрации

ОБЛОЖКА: с разрешения National Aeronautics and Space Administration

СТР.	АВТОР/ИСТОЧНИК	СТР.	АВТОР/ИСТОЧНИК	СТР.	АВТОР/ИСТОЧНИК
7	NASA		California Institute of Technology		( <i>вверху</i> ), Margaret S. Livingstone ( <i>внизу</i> )
8-11	George V. Kelvin, Science Graphics	38	P. N. Wilkinson, Nuffield Radio Astronomy Laboratories, England ( <i>вверху</i> ); Robert L. Mutel, University of Iowa ( <i>внизу</i> )	62	David H. Hubel
12	Mark Muller, National Science Foundation ( <i>вверху</i> )			63	The Bettmann Archive
12	George V. Kelvin			64	Richard MacDonald
14-15	Gilla Kaplan, Rockefeller University	39	George Retseck	65	The Baltimore Museum of Art: The Cone Collection, formed by Dr. Claribel Cone и Miss Etta Cone of Baltimore, Md. ( <i>вверху</i> ); Patricia J. Wynne ( <i>внизу</i> )
16-17	John Ding-E Young, Rockefeller University	43	Tom Prentiss		
18-19	Dana Burns	44	Anne Wertheim		
20	Gilla Kaplan	45	Anne Wertheim ( <i>вверху</i> ), Michael H. Horn ( <i>внизу</i> )		
23	Roger Gérard, Institut d'Optique Théorique et Appliquée	46-48	Tom Prentiss	69	James Kilkelly
24-29	Gabor Kiss	51-54	Ian Worpole	70-71	Hank Iken
33-36	George Retseck	55	Gunter K. Muecke и Peter Möller ( <i>вверху</i> ), Ian Worpole ( <i>в середине и внизу</i> )	72	Westinghouse Electric Corporation
37	R. C. Walker и J. M. Benson, National Radio Astronomy Observatory, и Stephen C. Unwin,	59	Margaret S. Livingstone	73-74	Hank Iken
		60	Patricia J. Wynne	78-81	Michael Goodman
		61	Richard MacDonald	83	Carol Donner
				84-85	Andrew Christ



## Об авторах

Richard S. Stolarski (РИЧАРД С. СТОЛАРСКИ «Озонная дыра над Антарктикой») — научный сотрудник отдела химии и динамики атмосферы Годдардовского центра Национального управления по аэронавтике и исследованию космического пространства. Получив в 1966 г. докторскую степень по физике, занял должность исследователя в Мичиганском университете. С 1974 г. работал в НАСА в качестве научного сотрудника Джонсоновского центра. В 1976 г. перешел в Годдардовский центр, где с 1979 по 1985 г. возглавлял отдел химии и динамики атмосферы.

John Ding-E Young, Zanvil A. Cohn (ДЖОН ДИН-Е ЮН, ЖАНВИЛЬ А. КОН «Как клетки-убийцы убивают») ведут совместные исследования в возглавляемой Коном лаборатории клеточной физиологии и иммунологии Рокфеллеровского университета, где Кон профессор и старший врач. Кон также доцент в Медицинском колледже Корнеллского университета. Он получил степень доктора медицины в 1953 г. в Медицинской школе Гарвардского университета. Прошел интернатуру и ординатуру в Массачусетской больнице общего типа. Руководил отделом биологии риккетсий в Армейском научно-исследовательском институте Уолтера Рида, а в 1958 г. перешел в Рокфеллеровский университет. Юн родился на Тайване, является гражданином Бразилии, а живет постоянно в США. Степень доктора медицины получил в 1979 г. в Национальном университете Бразилии, затем окончил докторантуру и прошел двухгодичную стажировку в Рокфеллеровском университете, где с 1985 г. он ассистент.

Abner Shimony (АБНЕР ШИМОНИ «Реальность квантового мира») — профессор философии и физики Бостонского университета. Степень бакалавра (1947 г.) и степень доктора философии (1953 г.) получил в Йельском университете, а степень философии в области физики (1962 г.) — в Принстонском университете. До 1968 г. преподавал в Массачусетском технологическом институте и по совместительству работал в Парижском университете в Орсе, Маунт-Холионок-Колледже и Швейцарском федеральном технологическом институте в Цюрихе. Шимони — специалист в области квантовой механики, особый интерес проявляет к постановке экспериментов для проверки философских проблем естествознания.

Kenneth I. Kellermann, A. Richard Thompson (КЕННЕТ И. КЕЛЛЕРМАНН, А. РИЧАРД ТОМПСОН «Антенная решетка со сверхдлинной базой») — оба работают в Национальной радиоастрономической обсерватории в Шарлотсвилле (шт. Виргиния), которая находится в ведении фирмы Associated Universities, Inc. в соответствии с контрактом, заключенным с Национальным научным фондом. Келлерман — старший научный сотрудник обсерватории; степень бакалавра получил в Массачусетском технологическом институте в 1959 г. и степень доктора философии в области физики и астрономии в Калифорнийском технологическом институте (КТИ) в 1963 г. По совместительству работает в КТИ, а также в некоторых научных организациях Австралии и ФРГ. Томпсон — заместитель управляющего проектом и ответственный за электронную часть создаваемого радиоинтерферометра со сверхдлинной базой (системы РИСДБ). В 1952 г. окончил Манчестерский университет в Великобритании, а в 1956 г. там же получил докторскую степень. В этом университете им разработан и создан в 1956 г. радиоинтерферометр. По прибытии в США в 1957 г. Томпсон занялся исследованиями в области радиоастрономии в Гарвардском и Станфордском университетах. В обсерватории в Шарлотсвилле Томпсон работает с 1973 г. До участия в разработке системы РИСДБ он занимался созданием системы VLA.

Michael H. Horn, Robin N. Gibson (МАЙКЛ Х. ХОРН, РОБИН Н. ГИБСОН «Литоральные рыбы») вели совместные исследования на Средиземноморском и Атлантическом побережье Франции. Хорн получил степень магистра в 1965 г. в Университете шт. Оклахома, степень доктора философии в 1969 г. в Гарвардском университете, затем проходил годовую стажировку в Океанографическом институте в Вудс-Холе и в Британском музее (естественной истории). После этого стал сотрудником Университета шт. Калифорния в Фуллертоне, где в настоящее время он профессор биологии. Гибсон — старший научный сотрудник Шотландской ассоциации биологии моря в Обане. Степень доктора философии получил в 1965 г. в Уэльском университете. Литоральными рыбами интересовался, когда учился в аспирантуре; изучал их в Европе, на Ближнем Востоке, в Тихом океане. Недавно по-

лучил степень доктора естественных наук за исследования биологии мелководных рыб.

Günter K. Muecke, Peter Möller (ГЮНТЕР К. МЮККЕ, ПЕТЕР МЁЛЛЕР «Не такие уж редкие эти "редкие земли"») работают вместе с 1983 г., занимаясь исследованиями распределения и подвижности следовых элементов, включая редкоземельные элементы. Мюкке — доцент факультетов геологии и проблем охраны окружающей среды в Университете Далхаузи в Галифаксе. Степени бакалавра и магистра по геологии он получил в 1964 г. в Университете Альберта, а в 1969 г. Оксфордский университет присудил ему степень доктора; в 1970 г. Мюкке перешел на работу в Университет Далхаузи. По совместительству он работает в Геттингенском университете, а также в Институте ядерных исследований Гана-Мейтнера (ФРГ). Мёллер — старший научный сотрудник этого же института. В 1967 г. Технический университет в Западном Берлине присвоил ему степень доктора в области ядерной химии. Вскоре Мёллер начал преподавать в том же университете, а также в Свободном университете в Западном Берлине.

Margaret S. Livingston (МАРГАРЕТ С. ЛИВИНГСТОН «Искусство, иллюзии и зрительная система») — доцент нейробиологии в Медицинской школе Гарвардского университета. После окончания Массачусетского технологического института поступила в Медицинскую школу, но затем перешла в аспирантуру и в 1980 г. получила степень доктора философии в области нейробиологии. С 1979 г. вместе с Д. Хьюбелом, сотрудником Медицинской школы, исследует механизмы обработки зрительной информации у человека и других приматов. Ливингстон изучала также роль нейрорегуляторов в поведении омаров и биохимическую основу ассоциативного научения у плодовой мушки.

John W. Coltman (ДЖОН У. КОЛТМЕН «Трансформатор») до ухода на пенсию руководил исследованиями и разработками в научно-исследовательских лабораториях компании Westinghouse Electric Corporation. Известен как изобретатель усилителя рентгеновского изображения, широко применяющегося в настоящее время в радиологических отделениях больницы. В 1937 г. Колтмен получил степень бакалавра в Институте технологии Кейса, а в 1941 г. — степень доктора в области ядерной физики в Ил- (продолжение см. на с. 95)



## 50 и 100 лет назад

SCIENTIFIC  
AMERICAN

ЯНВАРЬ 1938 г. Специалистами широко обсуждается вопрос о том, передается ли импульс от нервных окончаний к клеткам мышц электрическим или химическим путем. Многие свидетельствуют в пользу того, что эта передача — в случае как произвольных, так и непроизвольных движений — обеспечивается химическими «посредниками», такими, как ацетилхолин.

Привязной аэростат, применявшийся во время войны для наблюдений с воздуха за действиями противника, в мирное время стал выполнять весьма ответственную работу — следить за движением городского транспорта. В этом новом качестве аэростат облегчает работу дорожной полиции, помогая ей разобраться в сложной обстановке на основных развязках и магистралях. Полученные с его помощью сведения позволяют обеспечивать большую безопасность движения и вносить коррективы в дорожные правила. Такой аэростат-«регулирующий» имеет всего 3 м в диаметре и снабжен фотоаппаратом, управляемым с земли.

В прежние времена каменотесы, дробившие твердые горные породы с помощью кайла или молота и зубила, не создавали столько пыли, сколько извергают современные мощные буры, вгрызающиеся в хрупкие породы. Чтобы защитить легкие горнорабочих от очень вредных для здоровья частиц двуокиси кремния, требуются специальные приспособления. Некоторые из буров получили среди горняков название «буры-убийцы».

По сообщению Национального института санитарии и гигиены, все более широкое использование гудрона для покрытия дорог в США привело к тому, что питьевая вода в сотнях городов страны приобрела неприятные запах и вкус. Гудрон содержит фенольные соединения, которые вымываются дождем и сносятся в озера, реки и другие резервуары, питающие города водой. Сами эти химические вещества, как правило, содержатся в воде в ничтожных количествах и обычно не влияют на ее вкус. Однако при хлорировании воды растворенные в ней фенольные соединения превращаются в вещества с резко выраженным «лекарственным» вкусом.

Одним из ученых выдвинута гипотеза, что жилища будущего станут освещаться с помощью прозрачных кварцевых стержней, переносящих свет от одной центральной электрической лампы. Свет будет «течь» по этим стержням, подобно тому как вода течет по водопроводным трубам.



ЯНВАРЬ 1888 г. Противники вакцинации наконец взяли верх в г. Цюрихе (Швейцария), где в течение ряда лет — вплоть до 1883 г. — действовал закон об обязательных прививках против оспы. Оспа была практически уничтожена (в 1882 г. не было ни одного случая заболевания). Этим и воспользовались противники вакцинации; их активные действия привели к тому, что закон был отменен. В результате в 1883 г. из каждых 1000 смертей две произошли от оспы; в 1884 г. это число увеличилось до трех, в 1885 г. — до 17, а в первые три месяца 1886 г. составило 85 человек.

Фирмой Hinkley Locomotive Company в Бостоне недавно создан локомотив, имеющий по сравнению со своими предшественниками ряд новшеств. Самое примечательное из них — форма ведущего колеса. Его обод представляет собой не круг, а 105-угольник со стороной около 5 см. Такая форма колеса предотвращает его проскальзывание

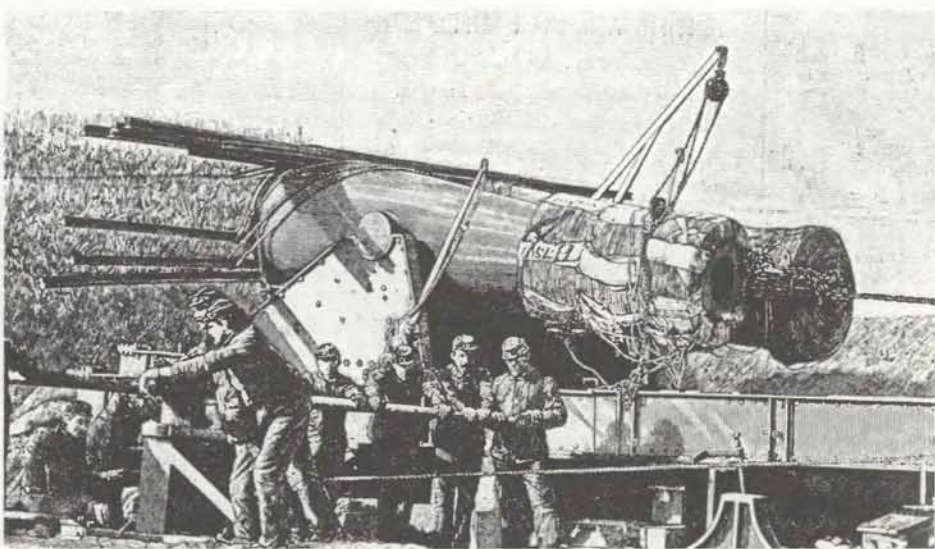
Мастодонт — гигантское ископаемое млекопитающее, дальний родст-

венник современного слона, вероятно, знаком американцам лучше, чем любое другое гигантское животное, когда-либо обитавшее на территории Америки. Практически в каждом штате к западу от Новой Англии найдены останки этих животных. Особый интерес представляют те из них, на которых оставил следы человек. Можно утверждать, что мастодонт был современником древнего человека, хотя когда он жил, остается пока загадкой. Не в состоянии мы ответить и на вопрос, на какой стадии развития находился человек, изготовивший стрелу с каменным наконечником, которая поразила гиганта и так и осталась лежать среди его останков.

Д-р В. Воган, профессор физиологической и патологической химии Мичиганского университета, опубликовал результаты целой серии экспериментов, которые, как он считает, доказывают существование бактерий, вызывающих брюшной тиф. Этой болезнью удалось заразить кошку. Чистота экспериментов и их результаты не вызывают никаких сомнений.

Интересный эксперимент в области магнетизма был проведен в Уиллетс-Пойнте (шт. Нью-Йорк) майором У. Кингом из Инженерного корпуса США: из двух больших пушек (каждая весом более 20 т) он соорудил огромный электромагнит.

У. Гебхард придумал, как обнаружить даже самую незначительную течь в водопроводной системе. Для этого нет нужды вызывать водопроводчика: достаточно ввести в трубы экстракт перечной мяты.



Большой магнит, изготовленный из пушек майором Кингом



# Озонная дыра над Антарктикой

*Каждую весну на протяжении последнего десятилетия происходит утончение слоя озона над Южным полюсом. Носит ли это явление локальный характер или свидетельствует о том, что поглощающий солнечный ультрафиолет слой озона подвержен опасности в глобальном масштабе?*

РИЧАРД С. СТОЛАРСКИ

**В** 1985 г. специалисты по исследованию атмосферы из Британской антарктической службы сообщили о совершенно неожиданном факте: весеннее содержание озона в атмосфере над станцией Халли-Бей в Антарктиде уменьшилось за период с 1977 по 1984 г. на 40%. Вскоре этот вывод подтвердили и другие исследователи, показавшие также, что область пониженного содержания озона простирается за пределы Антарктиды и по высоте охватывает слой от 12 до 24 км, т. е. значительную часть нижней стратосферы. Фактически это означало, что в полярной атмосфере имеется озонная «дыра».

Это открытие обескуражило как ученых, так и широкую общественность, поскольку из него следовало, что слой озона, окружающий нашу планету, находится в большей опасности, чем предсказывали модели атмосферы. Утончение этого слоя могло бы привести к серьезным последствиям для человечества. Содержание озона в атмосфере не достигает и одной миллионной доли от содержания остальных газов, однако именно озон поглощает большую часть солнечной ультрафиолетовой радиации, не давая ей достигнуть земной поверхности. Ультрафиолет обладает достаточной энергией, чтобы разрушать многие органические молекулы, включая ДНК. Он может вызывать рак кожи, катаракту и иммунную недостаточность, а также повреждать почвы и морские экосистемы.

Учитывая столь серьезный характер этих эффектов, многие ученые, включая автора и его коллег из Национального управления по авиации и исследованию космического пространства, поспешили начать исследования в целях выяснения природы озонной дыры, которая образуется каждую весну Южного полушария в полярном вихре — изолированной

воздушной массе, циркулирующей вокруг Южного полюса в течение большей части года. (Количество озона в вихре уменьшается в конце августа — начале сентября, стабилизируется в октябре и вновь начинает возрастать в ноябре.) До тех пор пока мы не найдем причину образования озонной дыры, мы не сможем установить, оказывает ли она влияние в глобальных масштабах или ее «сфера влияния» ограничивается Антарктикой, для которой характерны особые метеорологические условия.

Исследования в этой области опирались на измерения нескольких типов. Одни приборы размещались на земле, другие устанавливались на воздушных шарах-зондах и спутниках. Приборы на шарах-зондах предназначаются для определения химического состава воздуха в тех слоях, сквозь которые движется шар. Приборы, размещаемые на земле или устанавливаемые на спутниках, осуществляют дистанционные измерения по определению толщины слоя озона (точнее, высоты столба, который бы образовался, если бы весь озон, располагающийся в атмосфере над данной точкой, был приведен к стандартной температуре и стандартному давлению). Для определения толщины слоя, которая обычно выражается в добсонах (единица, обозначающая сотую долю миллиметра), измеряют падающую на землю радиацию на нескольких длинах волн, выбираемых таким образом, что на одних длинах волн радиация сильно поглощается озоном, а на других — слабо. (Приборы на спутниках регистрируют свет, отраженный от земной поверхности.) Если поток радиации на длинах волн, где поглощение существенно, возрос по отношению к радиации на других длинах волн, значит, содержание озона уменьшилось; и наоборот, если поток радиации на длинах волн, где проис-

ходит поглощение, уменьшился, значит, содержание озона возросло.

Работы в этой области опирались на международное сотрудничество. В 1987 г., например, около 150 ученых и технических сотрудников, представлявшие 19 организаций и 4 страны, встретились в Пунта-Аренасе (Чили), чтобы провести наиболее подробное исследование слоя озона, какое когда-либо предпринималось. Проект получил название «Самолетный антарктический озонный эксперимент». В ходе эксперимента, который показал, что в 1987 г. озонная дыра была наибольшей, использовались не только наземные измерительные средства и приборы, устанавливаемые на спутниках и шарах-зондах, но и самолеты-лаборатории. На переоборудованном пассажирском самолете DC-8 и высотном самолете ER-2 ученые несколько раз проникали в область пониженного содержания озона и собрали детальные сведения о ее размерах и химическом составе воздуха в ней.

**Э**КСПЕРИМЕНТ 1987 г., как и другие исследования, проведенные в последнее время, опирались на две высказанные ранее гипотезы, объясняющие существование озонной дыры. Согласно одной гипотезе, причиной дыры является выброс в атмосферу химических веществ антропогенной природы (поллютантов). Другая теория возлагает вину за образование дыры на естественные изменения в циркуляции воздушных масс, которые весной Южного полушария переносят богатый озоном воздух в полярную стратосферу.

Обеспокоенность последствиями выброса поллютантов возникла до того, как были получены первые свидетельства об этих последствиях. В 1971 г., когда сверхзвуковые лайнеры, казалось, вот-вот начнут регулярные полеты, появились опасения, что вы-

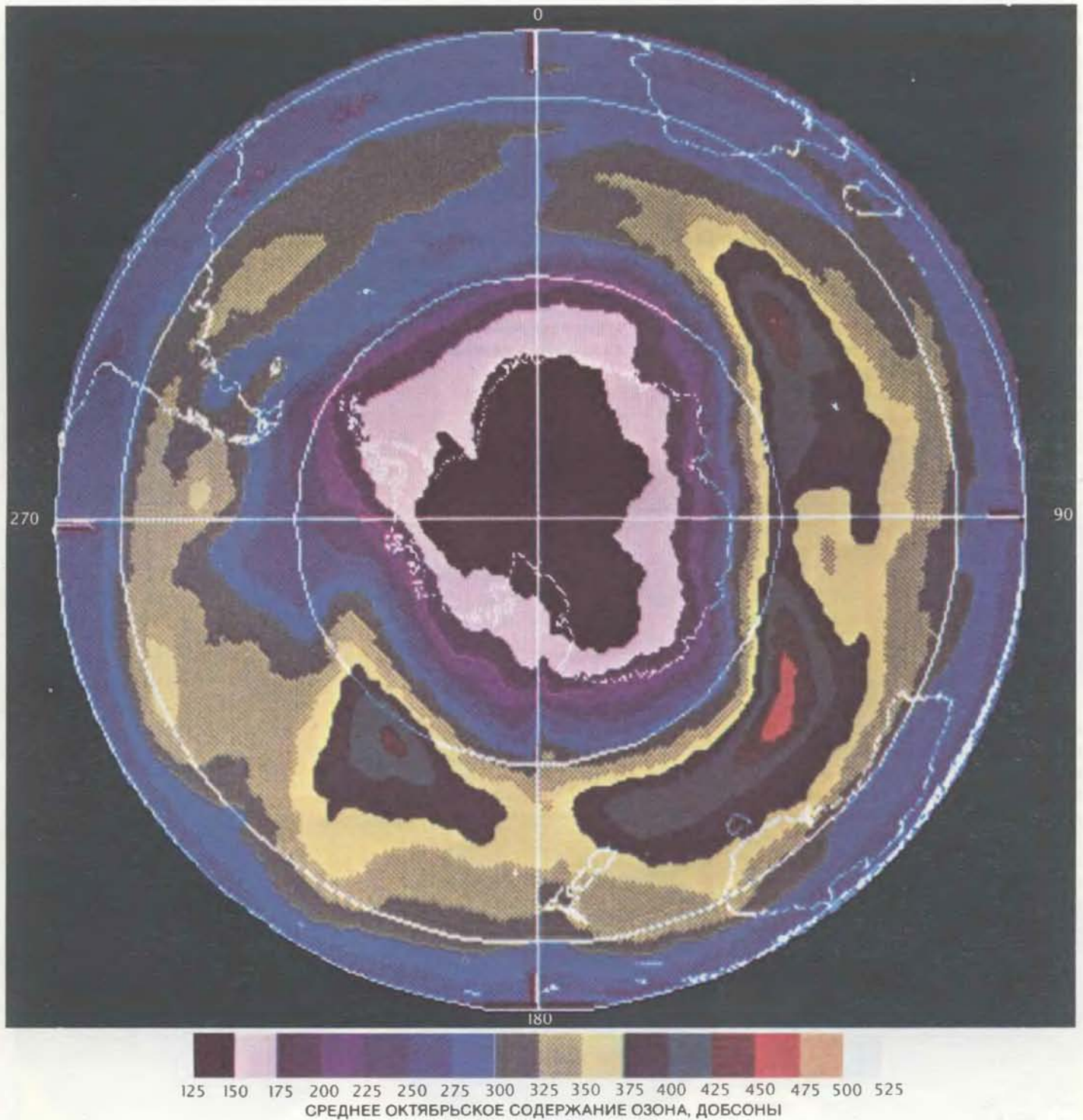


бросы водяного пара и оксидов азота ( $\text{NO}_x$ ) могут оказать разрушительное воздействие на атмосферу на больших высотах. Лабораторные исследования показали, что оба компонента могут воздействовать на слой озона. Сверхзвуковой воздушный транспорт так и не стал реальностью, однако в последующие годы выбрасывание в окружающую среду оксида азота

( $\text{N}_2\text{O}$ ) в результате сжигания все в больших количествах ископаемого топлива и массового применения азотных удобрений привело к таким же результатам. Но и эта опасность отошла на второй план, когда в 1974 г. М. Молина и Ф. Роулэнд из Калифорнийского университета в Ирвине забили тревогу по поводу возрастающего использования соединений,

известных под названием хлорфторуглеродов. Начиная с этого времени так называемая хлорфторуглеродная проблема стала одной из основных в исследованиях по загрязнению атмосферы.

Состав хлорфторуглеродов ясен из их названия. Используемые уже 60 лет эти газы служат хладагентами в холодильниках и кондиционерах, рас-



КАРТА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОЗОНА в атмосфере в Южном полушарии на 5 октября 1987 г. ясно показывает наличие над Антарктикой озонной «дыры» (черный, розовый, фиолетовый цвета). Содержание озона в дыре в указанное время было в два раза ниже, чем десять лет назад, когда оно составляло 300 добсонов. (Единица «один добсон», соответствующая 0,01 мм, используется для измерения толщи-

ны слоя, который образовался бы, если бы весь озон в столбе воздуха в атмосфере был приведен к стандартной температуре и стандартному давлению.) Карта построена по данным измерений, полученных с помощью спектрометра, который был установлен на спутнике «Nimbus-7», принадлежащем Национальному управлению по авиации и исследованию космического пространства (НАСА).



пылителем для аэрозольных смесей, пенообразующими агентами и очистителями для электронных приборов. Когда-то они рассматривались как идеальные для практического применения химические вещества, поскольку они очень стабильны и неактивны, а значит, нетоксичны. Как это ни парадоксально, но именно инертность этих соединений делает их «врагами» стратосферного озона.

Инертные газы не распадаются быстро в тропосфере (нижнем слое атмосферы, который простирается от поверхности Земли до высоты 10 км) и в конце концов проникают в стратосферу, верхняя граница которой располагается на высоте около 50 км. Когда молекулы этих веществ поднимаются до высоты примерно 25 км, где концентрация озона максимальна, они подвергаются интенсивному воздействию ультрафиолетовой радиации, которая не проникает на меньшие высоты из-за блокирующего действия озона. Ультрафиолет разрушает устойчивые в обычных условиях молекулы (в том числе хлорфторуглероды), которые распадаются на компоненты, обладающие высокой реактивной способностью (к ним относятся атомный хлор).

Лабораторные исследования показали, что хлор быстро разрушает озон. Поскольку в атмосферу выбрасываются миллионы тонн хлорфторуглеродов, исследователи пришли к выводу, что этот процесс, если он будет продолжаться, приведет к накоплению хлорфторуглеродов в стратосфере в концентрации, достаточной для серьезных повреждений озонового «экрана». Более того, даже если мы немедленно прекратим выброс хлорфторуглеродов, разрушение озона, скорее всего, будет продолжаться и в следующем столетии, поскольку хлорфторуглероды, уже попавшие в атмосферу, останутся в ней на десятилетия. Две основные разновидности этих веществ — Ф-11 ( $\text{CFCl}_3$ ) и Ф-12 ( $\text{CF}_2\text{Cl}_2$ ) — «живут» в атмосфере соответственно в течение 75 и 100 лет.

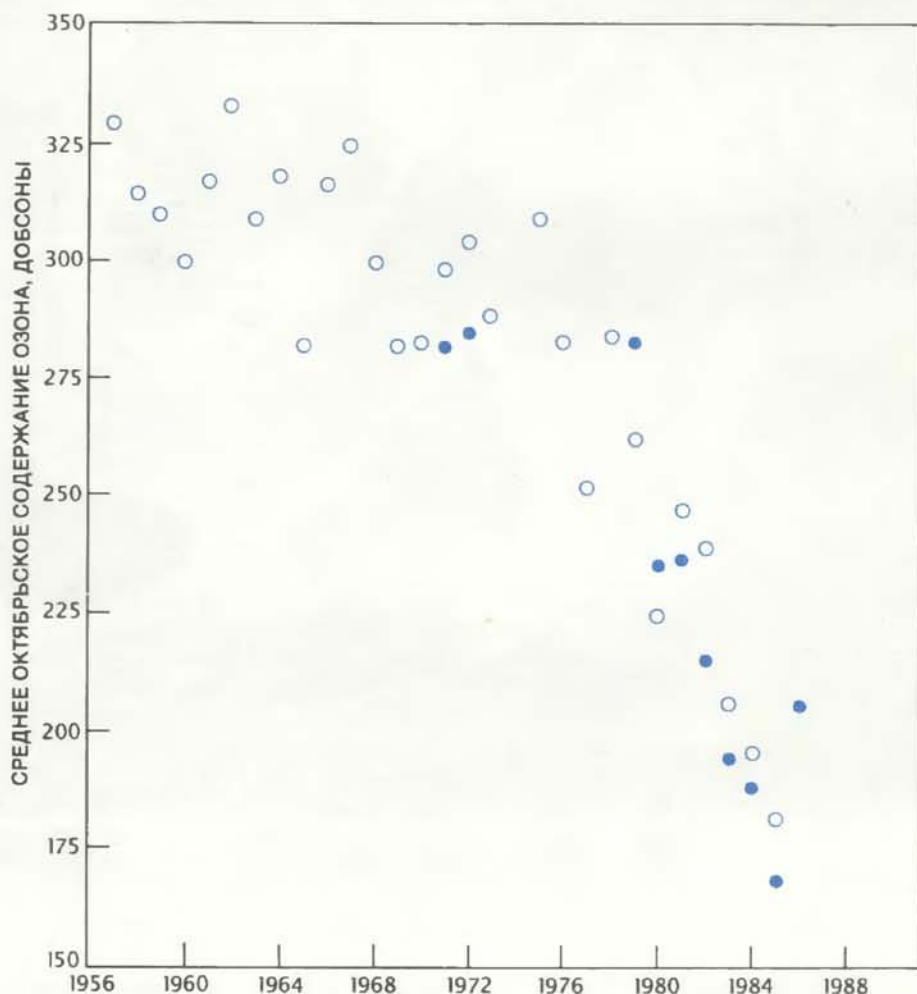
Под давлением этих аргументов в США с 1978 г. запрещено использование хлорфторуглеродов в аэрозолях, таких, как некоторые дезодоранты и лаки для волос. Однако попытки установить контроль над применением хлорфторуглеродов в других областях ни к чему не привели; частично это объясняется появлением новых данных о химических процессах, происходящих в стратосфере. Например, хотя было известно, что такие вещества, как оксиды азота и водяной пар, разрушают озон, новые расчеты показали, что оксиды азота могут соединяться с хлором и фактически ней-

трализовывать разрушительное действие последнего по отношению к озону.

В ту пору и появилось сообщение английских ученых о том, что октябрьское содержание озона над их станцией в Антарктиде уменьшилось с типичного значения 300 добонов, удерживавшегося в 1970-х годах, до 180 добонов в 1984 г. Это открытие возродило интерес общественности к озоновому слою. В то же время, поскольку выбросы хлорфторуглеродов продолжали расти, политики оказались вовлеченными в дебаты по вопросу установления международного контроля за производством этих веществ. Дискуссии привели к тому, что в сентябре прошлого года 23 страны (включая США) подписали в Монреале конвенцию, обязывающую их снизить потребление указанных веществ. Согласно достигнутой договоренности (конвенция должна быть ратифицирована 11 странами, прежде чем она вступит в силу в начале 1989 г.), развитые страны должны к середине 1990-х годов заморозить потребление

хлорфторуглеродов на уровне 1986 г., а к 1999 г. наполовину снизить этот показатель.

**СУЩНОСТЬ** хлорфторуглеродной проблемы заключается в том, что небольшое количество хлора достаточно для разрушения значительного количества озона. Молекула озона ( $\text{O}_3$ ), состоящая из трех атомов кислорода (O), образуется из молекул обычного кислорода ( $\text{O}_2$ ) под воздействием ультрафиолетовой радиации. Фотон расщепляет молекулу кислорода на два атома кислорода, имеющих высокую реакционную способность, каждый из которых быстро соединяется с другой, целой молекулой кислорода, образуя молекулу озона ( $\text{O}_3$ ). Последний легко поглощает ультрафиолет и распадается на первоначальные компоненты —  $\text{O}_2$  и O. Освободившийся атом кислорода вновь соединяется с молекулой кислорода и образует молекулу озона. Таким образом молекула озона образуется и распадается много раз, пока в конце концов не соединится со свободным ато-



**УМЕНЬШЕНИЕ** (слева) весеннего содержания озона над Антарктидой было замечено К. Фарманом и его коллегами из Британской антарктической службы, которые с 1956 г. ведут измерения на станции Халли-Бей (кружки). После того как эти исследователи в 1985 г. опубликовали свои выводы, последовало под-



мом кислорода и не образует две молекулы кислорода (см. верхний рисунок на с. 10). При неизменных условиях озон находится в динамическом равновесии, т. е. скорость его образования равна скорости распада.

Хлор сдвигает это равновесие в сторону уменьшения содержания озона в стратосфере, так как в его присутствии повышается вероятность образования двух молекул кислорода. Еще важнее то, что хлор (равно как оксиды азота и водяной пар) действует подобно катализатору: в ходе химического процесса его количество не уменьшается. Вследствие этого один атом хлора может разрушить до 100 000 молекул озона, прежде чем будет дезактивирован или вернется в тропосферу, откуда будет удален вместе с осадками или другим путем.

Химические процессы, которые, как принято считать, приводят к разрушению озона, хорошо изучены. Когда атом хлора (Cl) сталкивается с молекулой озона, он отбирает у нее один атом кислорода, образуя радикал монооксида хлора (ClO) и молеку-

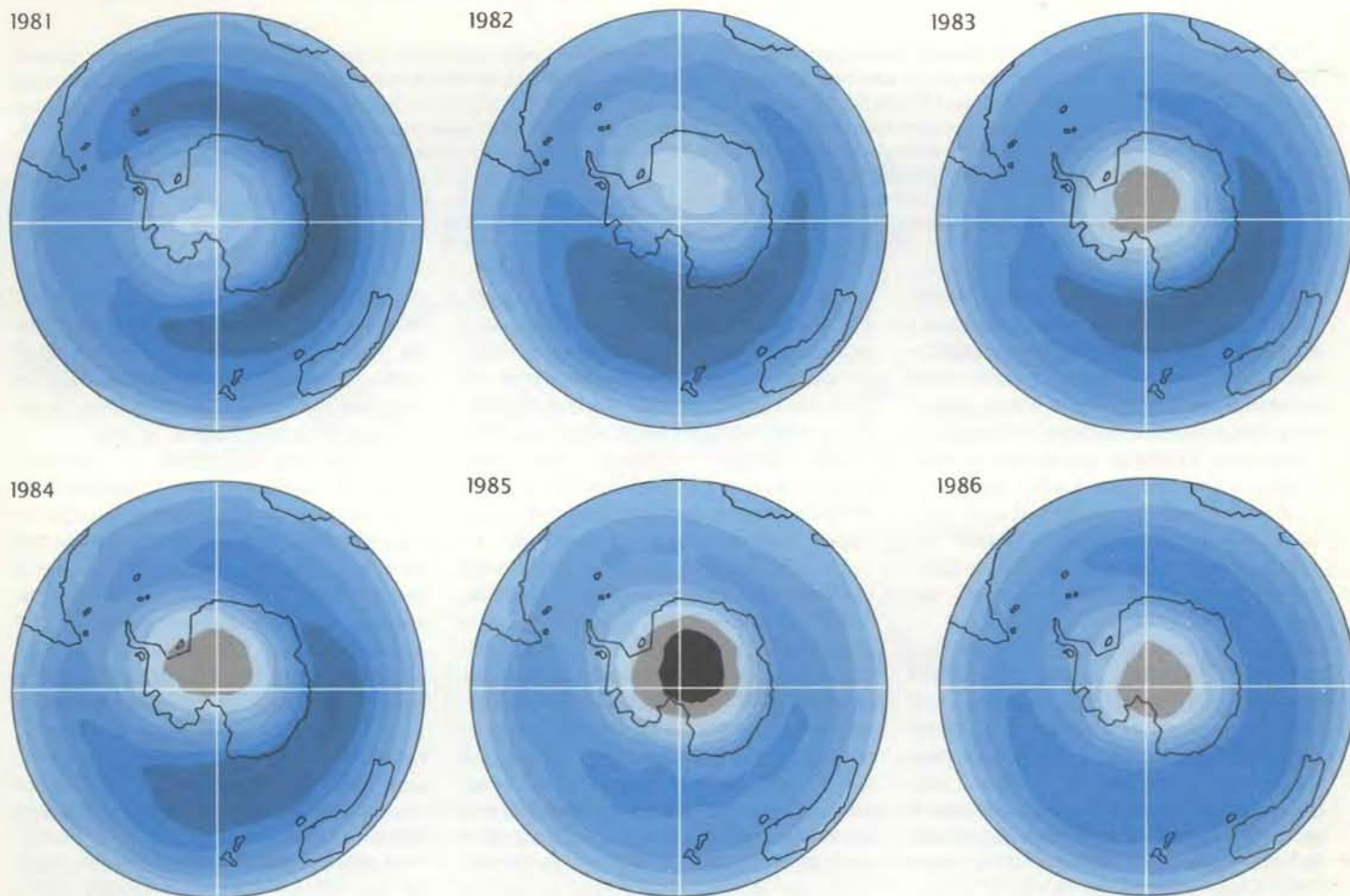
лу кислорода. Радикалы, т. е. молекулы с нечетным числом электронов, химически весьма активны. Когда монооксид хлора встречается со свободным атомом кислорода (важная ступень в каталитическом процессе!), атом кислорода отрывается от монооксида хлора под действием сильного притяжения к свободному атому кислорода; в результате образуется новая молекула кислорода. Атом хлора остается свободным и может атаковать новую молекулу озона.

Обычно этот каталитический процесс идет с некоторыми ограничениями. Существуют две основные реакции, которые, по крайней мере на средних высотах, препятствуют разрушению озона. В одном случае монооксид хлора вступает в реакцию с оксидом азота (NO). Атом кислорода из монооксида хлора переходит к оксиду азота, в результате чего образуются свободный атом хлора и диоксид азота (NO<sub>2</sub>). Когда последний поглощает видимый свет, его атом кислорода высвобождается и может образовать молекулу озона (см. рисунок

на с. 11). В результате содержание озона не изменяется.

Во втором, более важном, случае атом хлора или радикал монооксида хлора связывается с какой-то другой молекулой и образует стабильное соединение, которое служит временным «резервуаром» хлора. В таком виде хлор (а при нормальных условиях в атмосфере именно так он и проводит большую часть времени) не способен атаковать озон. Двумя важными резервуарами хлора являются нитрат хлора (ClONO<sub>2</sub>), образующийся при соединении монооксида хлора и диоксида азота (NO<sub>2</sub>), и хлористоводородная (соляная) кислота (HCl), образующаяся в результате соединения атома хлора и метана (CH<sub>4</sub>). В конце концов такая молекула-резервуар поглощает фотон или вступает в реакцию с какой-то другой молекулой, распадается и выделяет хлор, который получает возможность атаковать озон.

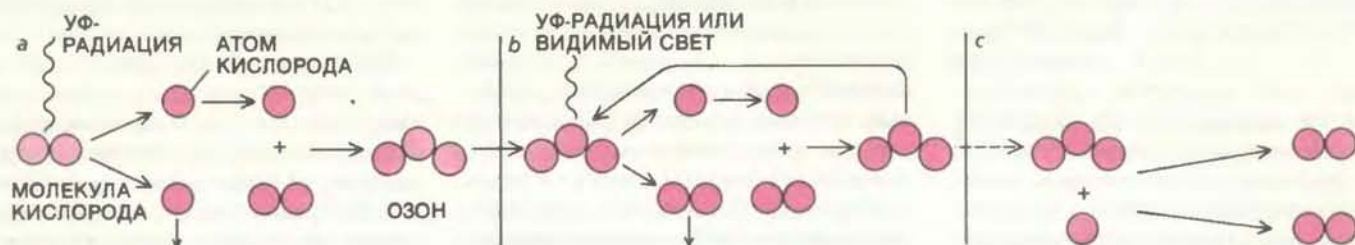
Наличие этих «противодействующих» реакций послужило основанием для того, чтобы специалисты, зани-



тверждение от НАСА, основанное на данных измерений со спутников (точки). Другие данные НАСА (справа) показали, что область пониженного содержания озона выходит за пределы Антарктиды и окружена областью повышенного

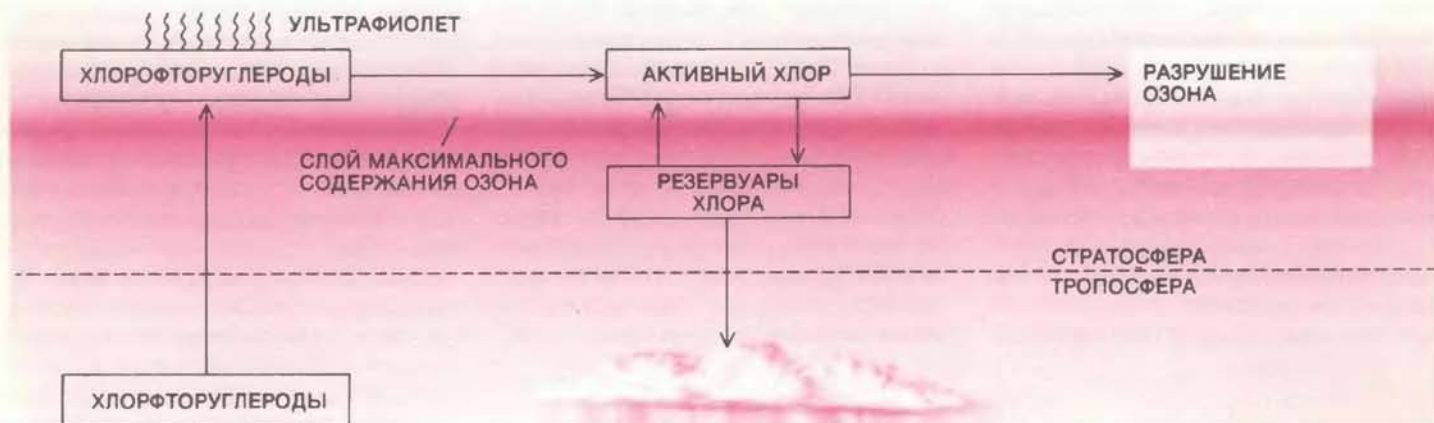
содержания озона (серповидная). Черная закраска соответствует содержанию озона в 150—180 добсонов, серая — большим значениям, темно-синяя — еще большим.





ОЗОН в атмосфере поглощает значительную часть солнечной ультрафиолетовой радиации. Этот газ образуется в результате следующего процесса. Когда высокоэнергичный ультрафиолетовый фотон (а) сталкивается с молекулой кислорода (O<sub>2</sub>), та распадается на два атома кислорода (O), которые соединяются с ближайшими молекулами

кислорода, образуя молекулы озона (O<sub>3</sub>). Поглотив ультрафиолетовый или видимый фотон, молекула озона распадается и отделившийся атом кислорода получает возможность образовать новую молекулу озона (b). Когда молекула озона сталкивается с атомом кислорода, вместо нее возникают две молекулы кислорода (c).



ХЛОРОФТОРУГЛЕРОДЫ — это искусственные химические вещества, которые, как считается, во многом ответственны за образование озонной дыры. Попав в атмосферу, эти инертные вещества постепенно поднимаются в верхние слои стратосферы, выше слоя, где концентрация озона (соответствует густоте окраски) максимальна. Поток ультрафиолетовой радиации там достаточно велик, чтобы молекулы хлорфторуглеродов распались, высвобождая ато-

марный хлор, который способен «атаковать» озон. Разрушительное воздействие хлора нейтрализуется, когда он соединяется с другими веществами и образует устойчивые соединения, служащие «резервуарами» хлора. Такие соединения могут распадаться под действием тепла и света, возвращая хлор в стратосферу, но некоторая их часть оседает в тропосфере, откуда они удаляются в результате различных процессов.

мающиеся моделированием химических процессов в атмосфере, пришли к выводу о незначительном воздействии хлорфторуглеродов на слой озона в глобальном масштабе. Если причину уменьшения весеннего содержания озона над Южным полюсом на 40% искать в воздействии хлора, входящего в хлорфторуглероды, следует признать, что противодействующие реакции антарктической весной почему-то ослабевают. Возникает вопрос: почему?

Сторонники хлорфторуглеродной гипотезы озонной дыры указывают на несколько процессов, которые могли бы уменьшить вклад этих реакций. Так, например, разрушение озона шло бы быстрее, если бы из стратосферы удалялись оксиды азота. В отсутствие оксидов азота хлор не мог бы соединяться с ними и образовывать резервуар в виде нитрата хлора. Кроме того, некоторые процессы могут в принципе видоизменять резервуары хлора, заставляя их выделять активный хлор в виде свободных атомов или монооксида хлора, разрушающих озонный слой.

**М**НОГИЕ исследователи считают, что на перечисленные процессы оказывают влияние полярные стратосферные облака. Эти высотные облака, которые гораздо чаще наблюдаются над Антарктикой, чем над Арктикой, образуются зимой, когда при отсутствии солнечного света и в условиях изоляции Антарктиды температура в стратосфере падает до  $-80^{\circ}\text{C}$ .

Можно предположить, что зимой соединения азота конденсируются, замерзают и остаются связанными с облачными частицами и поэтому лишаются возможности вступать в реакцию с хлором. В то же время облачные частицы могут облегчать превращение резервуаров хлора в активный хлор. Некоторые химические реакции, которые протекают медленно в чисто газовой среде, могут идти с большой скоростью на поверхностях твердых частиц. Во время полярной ночи многие химические реакции практически «замораживаются». Тем не менее возможно, что частицы полярных стратосферных облаков захватывают резервуары хлора и заставляют их изменяться: идет своего

рода подготовка к тому, чтобы при первых лучах солнца монооксид хлора начал быстро высвобождаться. К сожалению, до сих пор неизвестно, из чего состоят облачные частицы и какие реакции протекают на них.

Хлорфторуглеродная гипотеза озонной дыры должна объяснить не только, почему «нормальные» противодействующие реакции замедляются во время антарктической весны, но и как ликвидируется эта уникальная полярная аномалия. Полярной весной солнце все еще находится низко над горизонтом; в результате распад молекул озона под воздействием солнечной радиации замедлен, а значит, меньше концентрация свободных атомов кислорода, которые могли бы участвовать в каталитическом цикле хлора.

Присутствие определенного количества брома (Br) в полярных стратосферных облаках могло бы компенсировать нехватку атомарного кислорода. Химические соединения, которые выбрасываются в атмосферу при распаде природного метилбромиды, а также фумигантов и некоторых ве-



ществ, применяемых при тушении пожаров, могут взаимодействовать с озоном, образуя радикал монооксида брома ( $\text{BrO}$ ) и кислород. В свою очередь монооксид брома может вступать в реакцию с монооксидом хлора, в результате чего образуется другая молекула кислорода и высвобождается свободный хлор. (Окончательным результатом является превращение озона в кислород.) Такой комбинированный каталитический цикл брома и хлора может идти без затруднений, даже если свободные атомы кислорода относительно редки в окружающей среде. Бром может также быть непосредственным виновником разрушения озона: он инициирует цепь реакций, похожих на те, в которых участвует хлор, но не требующих свободных атомов кислорода.

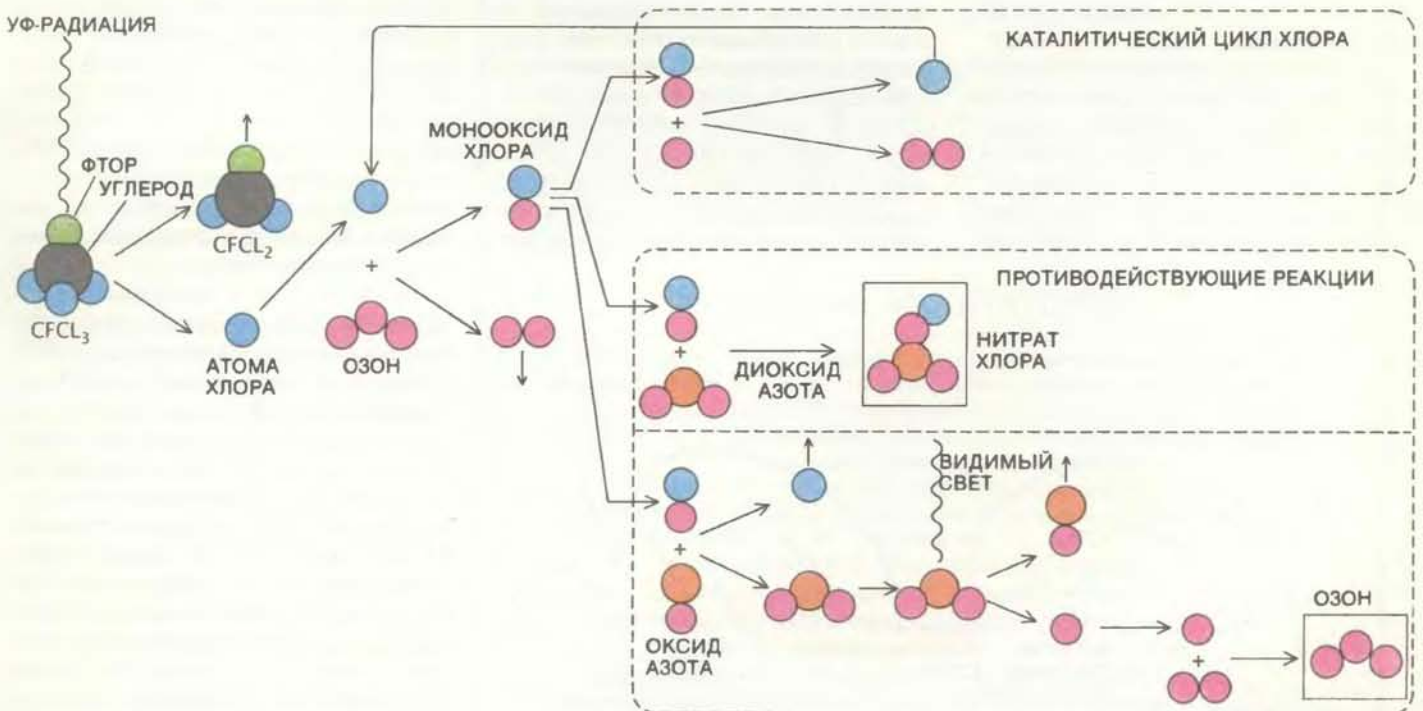
Хотя в картине химических процессов, которые могли бы приводить к разрушению озона в стратосфере над Антарктидой, остается много неясного, данные комплексных измерений, проведенных в 1986 г. в районе пролива Макмердо в Антарктиде, и предварительные результаты Самолетного антарктического озонного экспери-

мента 1987 г. в определенной степени свидетельствуют в пользу хлорфторуглеродной гипотезы. Так, например, выяснилось, что в весеннее время содержание монооксида хлора в озонной дыре увеличено по сравнению со средними широтами. Имеются и свидетельства того, что концентрация оксидов азота в дыре сильно понижена по сравнению со средними широтами.

Результаты измерений подтверждают также предположение о том, что резервуары хлора (нитрат хлора и хлористоводородная кислота) изменяются под влиянием облаков. В начале антарктической весны (когда дыра образуется) содержание обоих резервуаров в газообразной форме невелико, а затем оно повышается. Из этого следует, что большое количество газов запасается в такой форме (например, оседает на облачных частицах), что обнаружить их невозможно. Игрет ли важную роль во всем этом также бром, как предполагает теория, неясно. Предварительные результаты указывают, что в стратосфере над Антарктидой его концентрация может быть и не особенно большой.

**ДАННЫЕ**, свидетельствующие в пользу химической гипотезы озонной дыры, не исключают возможности, что существенными могут быть естественные процессы, связанные с динамикой атмосферы. Динамические процессы не разрушают озонный слой, они лишь перераспределяют озон.

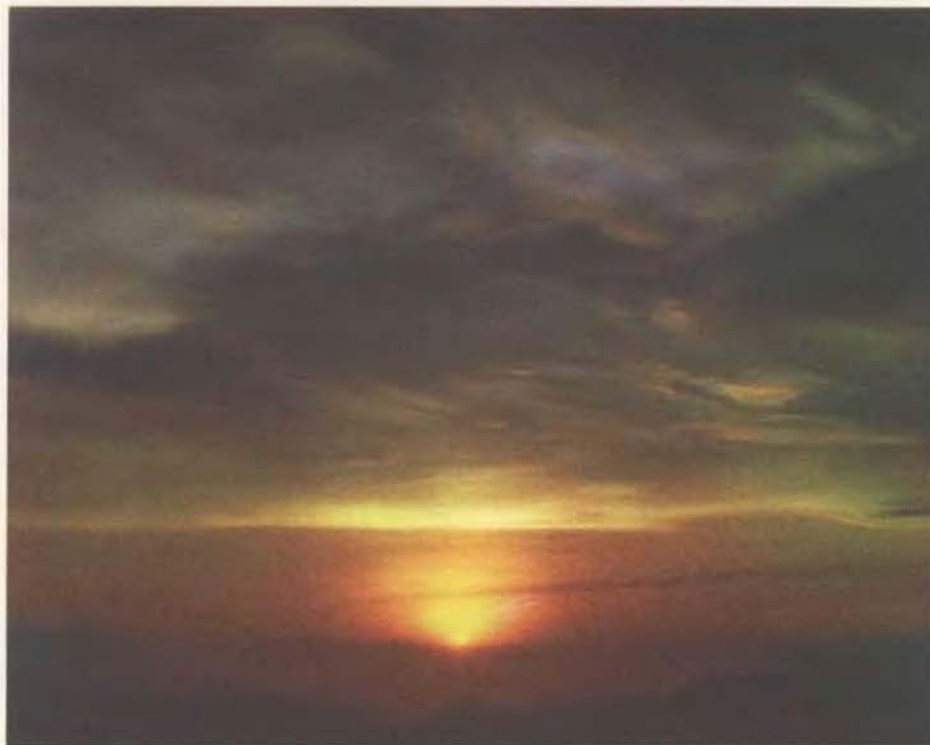
Возможность участия динамических процессов в разрушении озона вытекает из того факта, что атмосфера не статична. Поскольку воздух в атмосфере находится в постоянном движении, изменяется не только положение слоя озона и его «мощность», но и распределение и концентрация влияющих на него химических веществ. Если бы на содержание озона (которое всегда флуктуирует в определенной степени) оказывала влияние только солнечная радиация, можно было бы ожидать, что больше всего озона окажется в местах, подверженных наибольшему облучению, т. е. на очень больших высотах и на очень низких широтах. На самом деле максимум в распределении озона приходится не на верхнюю границу стратосферы, а на ее середину, и не на рай-



КАТАЛИТИЧЕСКИЙ ЦИКЛ ХЛОРА включает процессы, которые способствуют разрушению озона, и процессы, которые препятствуют этому. Атом хлора может разрушать озон, играя роль катализатора (вверху): иными словами, его количество в результате реакций не изменяется. Вначале хлор отбирает атом кислорода у молекулы озона, образуя монооксид хлора ( $\text{ClO}$ ) и устойчивую молекулу кислорода. Когда молекула  $\text{ClO}$  сталкивается с другим атомом кислорода, атомы кислорода легко соединяются, а атом хлора высвобождается и может «атаковать» новую молекулу озона. В этот каталитический цикл вмешиваются дру-

гие процессы. Например, если диоксид азота ( $\text{NO}_2$ ) соединяется с монооксидом хлора, он образует резервуар хлора (в середине); хлор, вовлеченный в этот процесс, не может вступать в реакцию с озоном. В каталитический цикл вмешивается также оксид азота ( $\text{NO}$ ) (внизу). Он отбирает атом кислорода у молекулы монооксида хлора, поглощает видимый фотон, опирающееся на химические процессы, подразумевает, что своеобразные климатические условия над Южным полюсом сводят к минимуму все эти вмешательства, так что каталитический цикл может идти без помех.





**ПОЛЯРНЫЕ СТРАТОСФЕРНЫЕ ОБЛАКА** над Антарктикой. Они образуются при очень низкой температуре зимой, когда конденсируется и замерзает водяной пар и, возможно, некоторые газы, такие как пары азотной кислоты. Высказывалось предположение, что облака могут облегчать разрушение резервуаров хлора; в результате весной, когда солнце вновь появляется из-за горизонта, высвободившийся хлор получает возможность атаковать озон.

он экватора, где концентрация озона достигает лишь 260 добсонов, а на полярные области.

Такое распределение озона возникает из-за того, что в целом стратосферный воздух, несущий «свежий» озон, течет от тропиков к полюсам, причем с больших высот на меньшие. В Северном полушарии стратосферный воздух проникает до самого по-

люса, где среднее содержание озона поздней зимой или ранней весной достигает 450 добсонов. В Южном полушарии на протяжении большей части года воздух не распространяется южнее 60° ю. ш. (здесь пиковая концентрация озона составляет 380 добсонов); в силу особых метеорологических условий, в частности из-за полярного вихря, богатый озоном воз-



**СТРАТОСФЕРНАЯ ЦИРКУЛЯЦИЯ**, показанная весьма схематично, включает поток воздуха, направленный от экватора к полюсам с больших высот на меньшие и несущий с собой озон. Вследствие этого содержание озона достигает максимума не на экваторе, где больше всего озона образуется, а вблизи Северного полюса и у 60° ю. ш. (Дальше на юг озон не распространяется, поскольку на этой широте воздушный поток как бы наталкивается на препятствие.) Тот факт, что на содержание озона оказывают влияние особенности атмосферной циркуляции, позволяет предположить, что в образовании озонной дыры определенную роль играет изменение движения воздушных масс в Южном полушарии.

дух не может продвинуться далеко на юг вплоть до конца весны.

Отчасти из-за особенностей циркуляции количество озона в атмосфере над Антарктидой оставалось в прошлые годы практически постоянным (на уровне 300 добсонов) в течение почти всей зимы и весны. В конце весны, когда полярный вихрь исчезал, открывая путь воздуху с низких широт, содержание озона начинало быстро возрастать почти до 400 добсонов. В последние годы концентрация озона остается почти постоянной на протяжении зимы, но весной быстро падает до 200 добсонов.

Динамическая гипотеза весеннего уменьшения озона, выдвигавшаяся ранее, основывалась на предположении, что аэрозоль (взвешенные в воздухе частицы), образовавшийся в результате извержения в 1982 г. вулкана Эль-Чичон в Мексике, поглощает солнечную радиацию, а это должно приводить к нагреванию стратосферы и «фонтанированию» богатого озоном воздуха вверх и в стороны из слоя, расположенного над Антарктикой. В настоящее время значительная часть вулканической пыли осела, поэтому содержание озона должно было бы начать восстанавливаться. Согласно другой гипотезе, подъем воздуха происходит из-за того, что движение богатого озоном воздуха в направлении к Южному полюсу из более теплых районов ослабевает, а вместо него возникает обратное движение воздуха, который увлекает богатый озоном полярный воздух из нижней стратосферы вверх и в направлении к экватору. Ему на смену должен поступать обедненный озоном воздух из ниже лежащей тропосферы.

Свидетельства в поддержку динамической гипотезы можно было бы найти в распределении температуры. Если весной воздух не мог достичь полярных областей, то там должно было бы происходить понижение температуры и уменьшение содержания озона. Никаких значительных изменений температуры в стратосфере над Антарктикой в августе или сентябре, когда формируется дыра, замечено не было, однако исследователи обнаружили, что в октябре средняя температура падает. Последнее может отражать задержку в весеннем притоке теплого воздуха в эту область.

Однако падение октябрьской температуры можно интерпретировать иначе, скажем отнести его на счет химических процессов, уменьшающих количество стратосферного озона, а не на счет изменений атмосферной циркуляции. Поскольку озон поглощает солнечную радиацию, разрушение озонового слоя весной должно было бы приводить к уменьшению



поглощения солнечной радиации по сравнению с нормальными условиями, а это в свою очередь привело бы к охлаждению атмосферы.

Существуют и более определенные свидетельства того, что динамические процессы вносят свой вклад в образование озонной дыры. Самолетный антарктический озонный эксперимент 1987 г. показал, что в один из дней, 5 сентября, содержание озона уменьшилось примерно на 10% на площади почти в 3 млн. км<sup>2</sup>. Химические процессы вряд ли способны вызвать такое быстрое и значительное изменение; объяснение этого события следует, по-видимому, искать в особенностях движения воздуха. Например, бедный озоном воздух мог на какое-то время вторгнуться в указанную область из нижних слоев стратосферы. Вместе с тем, измерив концентрации газов, которые служат трассерами при слежении за воздушными потоками, исследователи не обнаружили никаких свидетельств устойчивого крупномасштабного подъема воздуха в стратосфере.

Динамические и химические гипотезы привлекают и для того, чтобы объяснить уменьшение количества стратосферного озона весной во всей области Южного полушария к югу от 45° ю. ш. Разумеется, свою роль в этом может играть ослабление поступления воздуха из средних широт, но важными могут быть и химические процессы, идущие в стратосфере. Например, в результате смещения обедненного соответствующими химическими компонентами воздуха из полярного вихря с окружающим воздухом количество озона должно уменьшаться.

**В**ЗЯТЫЕ в совокупности последние данные усиливают растущие подозрения, что хлорфторуглероды вносят существенный вклад в образование озонной дыры. Они показывают также, что на образование дыры влияют особые метеорологические условия в Антарктике (полярный вихрь, низкая температура стратосферы, полярные стратосферные облака) и, вероятно, изменения циркуляции воздуха в Южном полушарии. Какой вывод можно сделать из этого относительно опасности, грозящей глобальному озоновому «экрану»?

В принципе резкое уменьшение количества озона на Южном полюсе может быть и локальным явлением, не характерным для более теплых регионов, однако такой вывод не выглядит убедительным. Одно ясно: хлорфторуглероды могут служить причиной изменений содержания атмосферного озона. Более того, хлор,

который уже попал в стратосферу, будет разрушать озон еще в течение десятков лет.

По этим причинам особую важность приобретает подписанная недавно конвенция, предусматривающая контроль за производством хлорфторуглеродов. Хотя дебаты относительно того, являются ли меры, предусмотренные конвенцией, достаточными или, наоборот, чересчур жесткими, продолжаются, этот вопрос вскоре может быть решен. Полностью данные Самолетного антарктического озонного эксперимента станут доступными к середине 1988 г. В 1989 г. результаты будут проанали-

зированы и подоспеют к запланированному на 1990 г. уточнению монреальской конвенции.

В настоящее время проблема озонной дыры имеет один положительный аспект. В дополнение к тому, что она убедила мировое сообщество в необходимости сотрудничества в целях снижения давления на окружающую среду, она подвигла ученых более детально изучить химию и динамику атмосферы. Усилия в этом направлении произвели революцию в наших представлениях о том, как озон взаимодействует с другими газами и какое влияние оказывают на эти взаимодействия метеорологические условия.

## Издательство МИР предлагает:

### АЭРОКОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

Ежемесячный журнал в переводе с английского

Если раньше журнал «Аэрокосмическая техника» ориентировался на специалистов узкого профиля, то с 1987 года его тематическая направленность изменилась: многие публикуемые в нем информационные статьи, сообщения и фотоснимки представляют интерес и для широкого круга читателей. В каждый выпуск теперь включаются оперативные материалы из нового для советского читателя научно-популярного журнала

«Аэрокосмическая Америка» (Aerospace America) в соответствии с контрактом, заключенным издательством «Мир» и Американским институтом авиации и аэронавтики (AIAA).

Вместе с тем редакция «Аэрокосмическая техника» по традиции и по-прежнему в большом объеме продолжает публикацию наиболее актуальных и значимых статей из других уже известных читателям пяти научных вестников AIAA.

### ВНИМАНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ!

В ограниченном объеме журнал поступает в розничную продажу через магазины «Московский Дом книги» (121019, Москва, просп. Калинина, 26) и «Мир» (121315, Москва, Ленинградский просп. 78). В них же принимаются предварительные заказы на отдельные выпуски журнала (цена одного номера 3 р. 10 коп.).

Проживающим вне Москвы журналы высылаются по почте наложенным платежом. Предварительные заказы направлять по адресу: 129820, Москва, И-110, 1-й Рижский пер., д. 2, издательство «Мир», редакция журнала «Аэрокосмическая техника».

Подписка на журнал «Аэрокосмическая техника» (годовая, полугодовая, квартальная) принимается без ограничений во всех агентствах «Союзпечати», почтовых отделениях связи.

Журнал включен в «Каталог газет и журналов зарубежных стран», раздел «Переводные научные и научно-технические журналы». Индекс 91345.





# Как клетки-убийцы убивают

*Эти клетки иммунной системы узнают клетку-мишень, прочно к ней прикрепляются, обхватывая своими псевдоподиями, и выделяют на ее поверхность белок, образующий поры в клеточной мембране. Содержимое клетки-мишени вытекает через поры, и она погибает*

ДЖОН ДИН-Е ЮН, ЖАНВИЛЬ А. КОН

**И**ММУННУЮ систему часто сравнивают с армией, а входящие в ее состав клетки — с солдатами. Нигде эта аналогия не кажется более подходящей, чем в случае киллерных клеток (от англ. killer, что значит «убийца»). Основная обязанность этих клеток — выявлять и уничтожать собственные клетки организма, в которых что-то нарушилось: они убивают опухолевые клетки и клетки, зараженные вирусами (а также, возможно, и другими чужеродными агентами). Киллерные клетки выполняют свою работу с высокой эффективностью: они выискивают клетку-нарушительницу, прочно к ней прикрепляются и, наконец, делают что-то, что вызывает ее гибель. При этом оказавшиеся рядом нормальные клетки остаются невредимыми. Вся эта последовательность событий известна уже несколько лет. Но что же конкретно делают киллерные клетки со своими жертвами? Иными словами, как они убивают?

Ответ на этот вопрос начал проясняться. Говоря военным языком, киллерная клетка, прикрепившись к клетке-мишени, нацеливается на ее поверхность и простреливает в ней множество дырок. Снарядами служат молекулы специального белка. Эти молекулы внедряются в наружную мембрану клетки-мишени и образуют в ней поры. Содержимое клетки вытекает и вскоре она погибает.

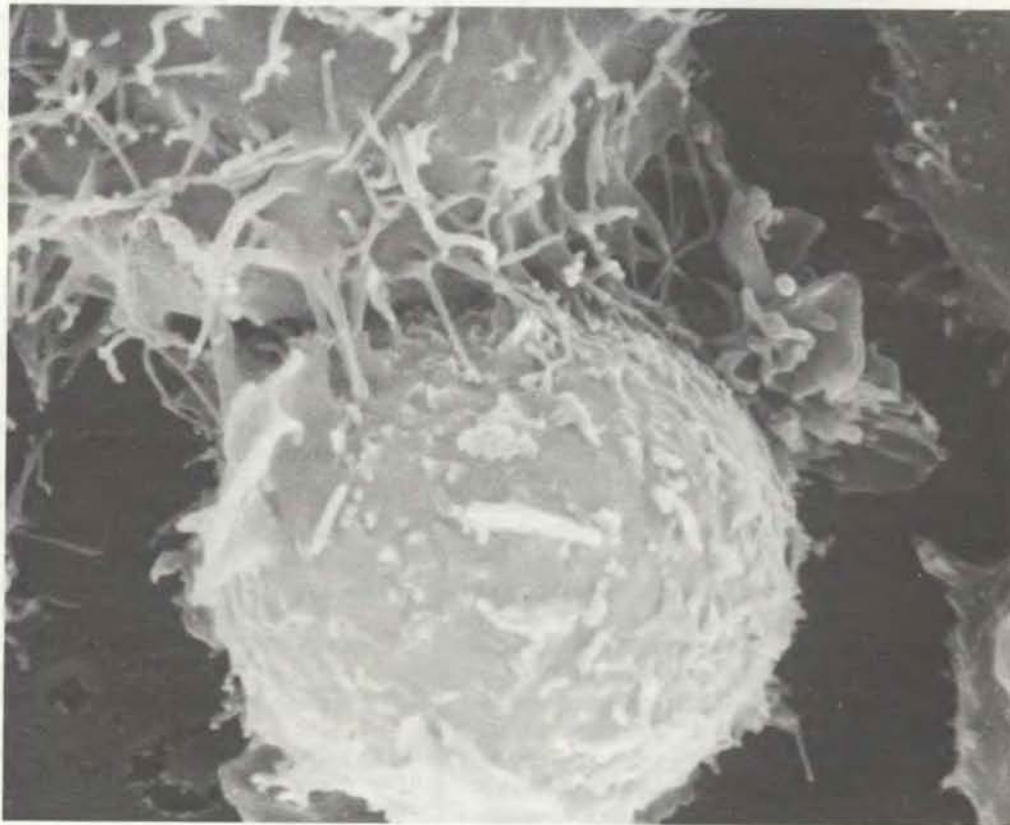
Эксперименты, проведенные в нескольких лабораториях, в том числе в нашей лаборатории в Рокфеллеровском университете, показали, что образующий поры белок входит в состав вооружения киллерных клеток двух типов: цитотоксических Т-клеток и так называемых естественных киллеров, или НК-клеток (от англ. natural killer). Белок со сходной функцией мы обнаружили и в других клетках, участвующих в иммунных

реакциях — эозинофилах. Более того, такой же или очень похожий белок участвует, по-видимому, в нападении амебы, вызывающей тяжелую дизентерию, на клетки человека. Белки, образующие поры, — это, вероятно, основной тип оружия, используемого в разнообразных процессах уничтожения одних клеток другими.

Знания об этих белках важны для медицины. Возможно, блокируя их, удастся лечить амебную дизентерию и некоторые другие болезни, вызываемые паразитами, грибами и бактериями. Пожалуй, еще важнее найти

путь усилить способность клеток иммунной системы образовывать поры: в принципе, это может оказаться полезным при лечении рака и вирусных заболеваний, например такого трудноизлечимого, как СПИД.

**Д**ЛЯ ТОГО чтобы понять, каким образом киллерные клетки действуют столь специфично и столь неотвратимо, необходимо представлять себе их место и роль в организации и функционировании всей иммунной системы. Эта система состоит из двух частей: клеточной, к которой от-



КИЛЛЕРНАЯ КЛЕТКА разрушает опухолевую клетку. Слева: цитотоксическая Т-клетка (сверху) прочно связывается с меньшей по размерам клеткой-мишенью. В середине: клетка-мишень уже повреждена. Белок, выделяемый киллерной клеткой, образовал в ее мембране множество дырок. Мембрана стала прони-



носятся, в частности, киллерные клетки, и гуморальной. Гуморальная система защищает организм прежде всего от бактерий и токсичных веществ. Ее оружие — это антитела, или иммуноглобулины, которые синтезируются и секретируются клетками, называемыми В-лимфоцитами. Каждая В-клетка синтезирует антитела одного определенного типа, распознающие определенный антиген; в организме имеются миллионы различных В-клеток. Молекулы синтезируемого В-клеткой антитела выставлены на ее поверхности. Когда лимфоцит сталкивается с бактерией или токсином, несущими соответствующий антиген, лимфоцит начинает размножаться. Часть его потомства становится клетками памяти, которые в будущем обеспечивают быструю реакцию на данный антиген, если он снова попадает в организм. Основная же часть потомков этого лимфоцита превращается в плазматические клетки, которые производят и секретируют молекулы нужного антитела в большом количестве.

Антитела связываются с соответствующими им антигенами. Токсины вследствие этого связывания осаждаются или как-то иначе нейтрализуются. Если же антиген расположен на поверхности чужеродной клетки, то связывание с ним антитела вы-

зывает каскад реакций, в которых участвуют белки сыворотки крови, называемые белками комплемента. В результате этих реакций клетка, на поверхности которой они происходят, погибает.

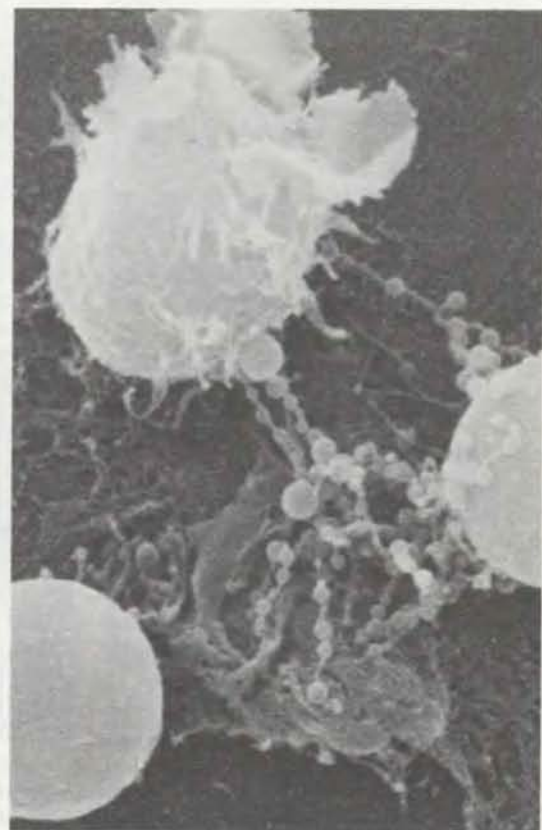
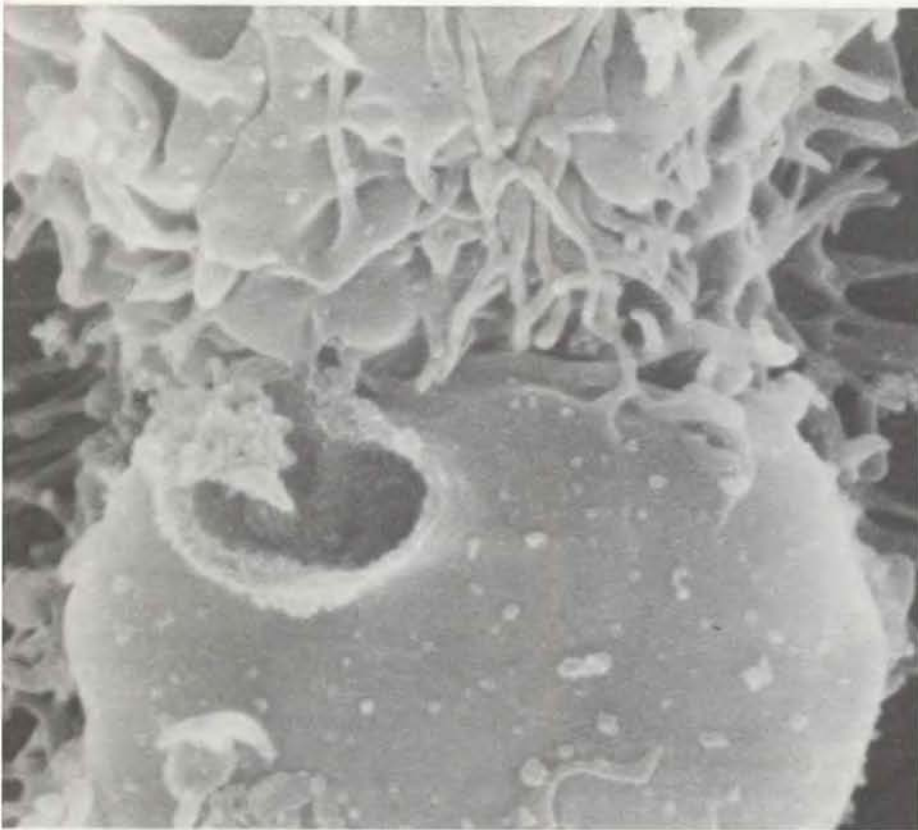
Клетки, дающие начало В-лимфоцитам, одновременно являются предшественниками другого большого семейства лимфоцитов — разнообразных Т-клеток, составляющих основу клеточной иммунной системы. Некоторые Т-клетки, а именно хелперные (от англ. helper — помощник) и супрессорные (т. е. подавляющие), регулируют работу и гуморальной, и клеточной системы, секретируя сигнальные химические вещества, называемые лимфокинами. Главное действующее лицо клеточной иммунной системы — это цитотоксические Т-лимфоциты, или киллерные Т-клетки. Их основной мишенью являются клетки, зараженные вирусами. Киллерные клетки другого типа — НК-клетки — тоже представляют собой лимфоциты, но их происхождение точно не известно; скорее всего, они близко родственны цитотоксическим Т-клеткам. Считается, что их мишенью являются опухолевые клетки, а также, возможно, клетки, зараженные чужеродными агентами невирусной природы.

Как и в случае В-лимфоцитов, функ-

ция Т-лимфоцитов зависит в первую очередь от правильного распознавания мишени. На поверхности Т-клеток расположены специфические рецепторы, очень похожие на антитела В-клеток. Эти рецепторы связываются с определенными антигенами клеточной поверхности. Т-клетки более избирательны, чем В-клетки: они взаимодействуют с антигеном только в том случае, если он находится на поверхности клетки-мишени в сочетании с одной из молекул так называемого главного комплекса гистосовместимости — белков МНС (от англ. major histocompatibility complex). НК-клетки не так разборчивы в отношении объекта атаки; их рецепторы менее избирательны и не зависят от МНС.

Узнав свою мишень, киллерная клетка — будь то цитотоксический Т-лимфоцит или НК-клетка, — прочно к ней прикрепляется. Этот тесный контакт активирует механизм уничтожения. Такой способ активации обеспечивает безопасность для оказавшихся рядом нормальных клеток.

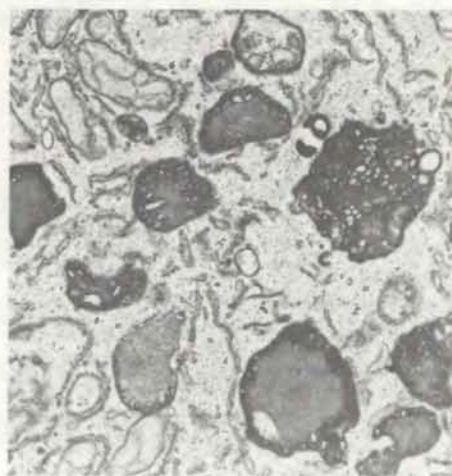
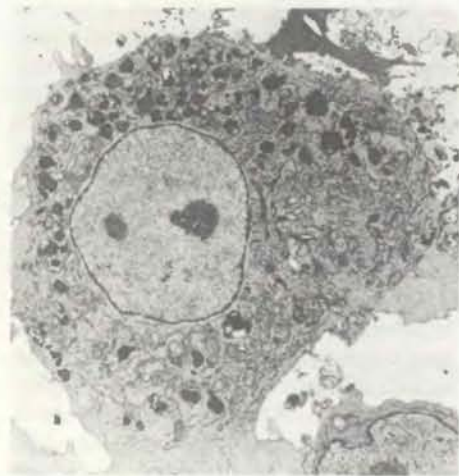
Все это было известно еще десять лет назад, но в чем заключается процесс убийства и каков его механизм, оставалось тайной за семью печатями. Первые шаги к ее разгадке были сделаны в начале 70-х годов в нескольких лабораториях: в группе Э. Марца



цаемой, входящая внутрь вода раздула клетку, и та, потеряв большинство своих микроворсинок, лопнула; в мембране виден большой разрыв. Справа: от опухолевых клеток ничего не осталось кроме ядер и каких-то фраг-

ментов. Препараты были получены Чау Чин Лю и сфотографированы с помощью сканирующего электронного микроскопа Дж. Каплан. (На левых двух снимках увеличение  $\times 5700$ , на правом  $\times 4200$ .)





ЦИТОТОКСИЧЕСКАЯ Т-КЛЕТКА в культуре (слева; увеличение  $\times 1400$ ) и темные гранулы в ее цитоплазме (справа; увеличение  $\times 7600$ ). Гранулы имеют электроноплотную наружную мембрану. Их аморфное содержимое включает смертоносный белок перфорин. Фотографии получены с помощью электронного микроскопа Г. Хенгартнером и Э. Подаком.

из Массачусетского университета в Амхерсте, К. Хенни из фирмы Immunex Corporation в Сизтле, У. Кларка из Калифорнийского университета в Лос-Анджелесе, П. Голстейна из Иммунологического центра в Марселе и Г. Берка из Вейцманновского института в Израиле. Результаты их экспериментов позволили представить весь процесс убийства как последовательность отдельных этапов.

Вначале лимфоцит и клетка-мишень вступают в тесный контакт и образуют так называемый конъюгат. Затем киллерная клетка оказывает на клетку-мишень некое воздействие, повреждающее ее так, что впоследствии она гибнет; необходимым условием является присутствие в среде ионов кальция. Гибель этой клетки-мишени происходит даже в том случае, если конъюгат распадается и киллерный лимфоцит прикрепляется к другой клетке. Создавалось впечатление, что киллерная клетка приводит в действие какую-то программу — предопределенную цепочку событий, неизбежно завершающуюся гибелью клетки-мишени.

Хенни и Марц одними из первых предположили, что лимфоцит убивает свою жертву, повреждая ее плазматическую (наружную) мембрану. Основанием к этому послужило то наблюдение, что радиоактивные молекулы, введенные в клетку-мишень в качестве маркеров, быстро ее покидают после того, как клетку повреждает лимфоцит. При этом мембрана поврежденной клетки становится проницаемой только для маркеров не крупнее определенного размера; можно было думать, что мембрана не просто рвется, а в ней возникают дырки, или поры.

Эта гипотеза обрела реальную по-

чву в 1980 г. Р. Дурмашкин, П. Хенгарт из Национального института рака и их коллеги исследовали поверхность поврежденной клетки-мишени с помощью электронного микроскопа при большом увеличении и обнаружили кольцеобразные структуры, которые можно было интерпретировать как дырки в мембране. Через три года их открытие подтвердили Э. Подак из Нью-Йоркского медицинского колледжа и Г. Деннерт из Медицинской школы Университета Южной Калифорнии, изучавшие действие культивируемых киллерных клеток на опухолевые клетки. Они установили, что поверхность клетки-мишени испещрена дырками с внутренним диаметром от 5 до 20 нм.

ОСТАВАЛОСЬ, однако, совершенно не ясным, образуются ли поры именно под действием лимфоцита или же их возникновение просто отражает последнюю стадию гибели клетки, которая вызывается совсем другим фактором. Поиски ответа на этот вопрос долгое время затрудняло отсутствие надежного источника киллерных клеток. Но в 1977 г. С. Джиллис из Immunex Corporation, К. Смит из Дартмутской медицинской школы и группа Р. Галло в Национальном институте рака нашли условия для поддержания в культуре мышинных лимфоцитов — как цитотоксических Т-клеток, так и НК-клеток. Это удалось благодаря тому, что были идентифицированы питательные вещества и факторы роста, необходимые для существования таких клеток в культуре. Одним из ключевых факторов оказался лимфокин, называемый интерлейкином-2. Теперь можно было выращивать клоны лимфоцитов, полученные из клеток с известными свойст-

вами, что дало в руки исследователей неиссякаемый источник гомогенных культур цитотоксических Т-клеток и НК-клеток и тем самым расчистило путь для детального анализа этих клеток методами клеточной биологии и биохимии.

Одно из свойств киллерных лимфоцитов сразу же привлекло внимание исследователей. С помощью электронной микроскопии в цитоплазме этих клеток обнаруживалось множество мелких темных органелл (внутриклеточных элементов) наподобие запасных гранул, характерных для секреторных клеток. Обычно в таких гранулах накапливаются вещества, которые должны поступать в окружающую среду в нужный момент сразу в большом количестве. Это происходит путем экзоцитоза: гранулы движутся к поверхности клетки, сливаются с ее плазматической мембраной, и их содержимое изливается наружу.

Несколько исследователей наблюдали, что, когда киллерный лимфоцит приступает к уничтожению клетки-мишени, гранулы концентрируются в той его части, которая ближе к месту контакта с мишенью. А. Купфер и С. Сингер из Калифорнийского университета в Сан-Диего, а также Деннерт показали, что аппарат Гольджи, в котором формируются гранулы, тоже направляется к месту контакта. В ориентации аппарата Гольджи и гранул, по-видимому, принимает участие цитоскелет (внутренняя волокнистая сеть) киллерной клетки. Те же исследователи показали, что вскоре после установления контакта с клеткой-мишенью цитоскелетные структуры киллерной клетки определенным образом перегруппируются.

Переориентация цитоскелета и движение стопок аппарата Гольджи и гранул происходит только после связывания лимфоцита с мишенью. Р. Тсен из Калифорнийского университета в Беркли показал, что связывание вызывает быстрое и значительное увеличение концентрации ионов кальция внутри лимфоцита; это в свою очередь активирует экзоцитоз. Дж. Янелли и В. Энгельгарду из Виргинского университета удалось провести микрокиносъемку переориентации гранул в цитоплазме и их слияния с плазматической мембраной.

Все эти данные позволили думать, что в ответ на контакт с клеткой-мишенью секреторный аппарат киллерной клетки направляется на жертву и летальный агент, содержащийся в гранулах, «выстреливается» в нее. Чтобы проверить эту гипотезу, необходимо было доказать, что гранулы действительно выполняют ту же



функцию, что и зарядные ящики в артиллерии, а затем выяснить, что же представляют собой сами снаряды.

**П**ЕРВОЙ задачей было выделить гранулы и посмотреть, могут ли они сами по себе убивать клетки. Это было сделано в 1984 г. Хенкартом и Подаком и независимо нашей группой. Мы применяли различные методы фракционирования внутриклеточных структур. В результате таких экспериментов удается, разрушив клетку на составные части, определить, в какой из них содержится тот или иной фермент или сосредоточена та или иная функция. Киллерные лимфоциты подвергали воздействию азота под высоким давлением, что приводило к их разрушению. Суспензию разрушенных клеток наносили на градиент плотности, созданный инертными частицами, и затем вращали в высокоскоростной центрифуге. Под действием центробежной силы различные органеллы перемещались ко дну пробирки и, попадая в область с плотностью, равной своей собственной, останавливались. В результате все органеллы распределялись вдоль центрифужной пробирки в виде дискретных полос. Каждую фракцию градиента затем исследовали при помощи электронного микроскопа, определяли ее ферментативную активность и способность убивать клетки.

Одна из фракций по данным электронной микроскопии состояла почти исключительно из гранул, содержала определенный набор ферментов и, главное, могла убивать клетки: когда изолированные гранулы смешивали с эритроцитами или опухолевыми клетками в среде, содержащей ионы кальция, клетки гибли через несколько минут. На электронных микрофотографиях было видно, что поверхность этих клеток содержала кольцеобразные структуры, неотличимые от тех, которые формируются в мембране клетки-мишени под действием живых киллерных клеток. Таким образом мы показали, что гранулы киллерных клеток действительно содержат тот летальный агент, с помощью которого эти клетки убивают.

Вскоре был идентифицирован сам этот агент. В 1985 г. в сотрудничестве с Подаком и Г. Хенгартнером из больницы Цюрихского университета мы обнаружили белок, который в присутствии ионов кальция вызывал такие же повреждения клеточной мембраны, как и живые киллерные клетки или выделенные из них гранулы. Этот белок мы получили в чистом виде, пропустив экстракт гранул через хроматографические колонки (где белки разделялись в зависимости от электрического заряда и молеку-

лярной массы) и проверив каждую фракцию на способность вызывать лизис эритроцитов, т. е. повреждение наружной мембраны, в результате которого клетки набухают и лопаются. Независимо белок-«убийцу» выделили Д. Мэссон и Ю. Чопп из Университета в Лозанне. За способность образовывать поры он назван перфорином.

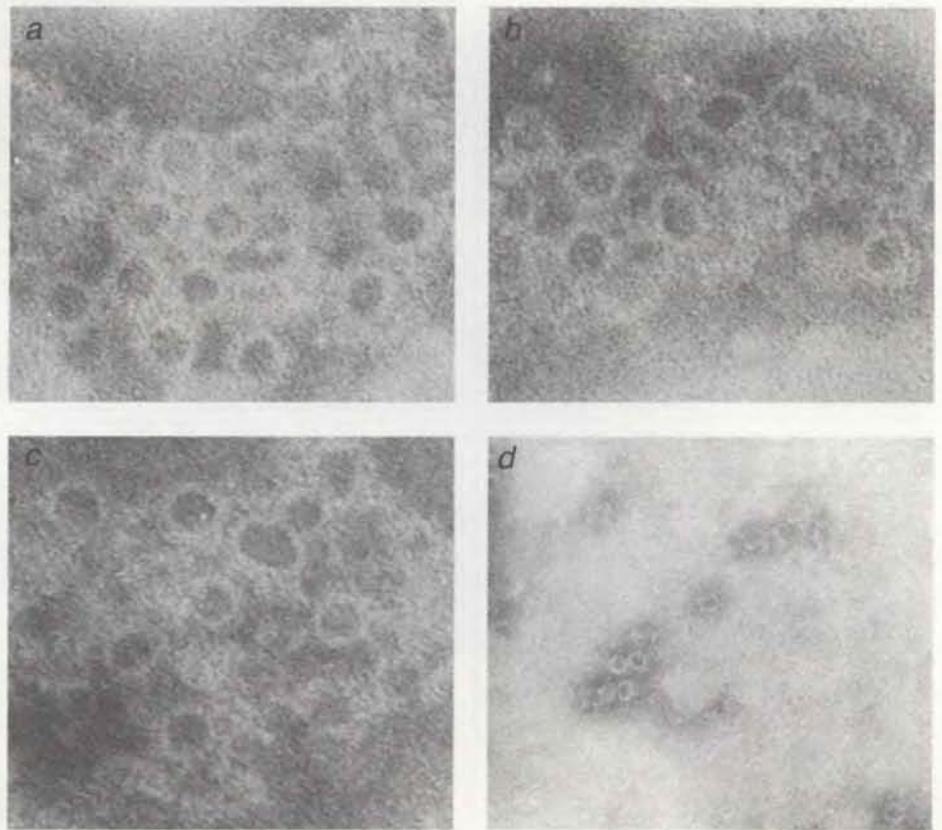
К настоящему времени в гранулах цитотоксических Т-лимфоцитов и NK-клеток обнаружен только один образующий поры белок — этот самый перфорин. Его молекулярная масса 70 тыс. дальтонов. Если клетки инкубировать с перфорином в присутствии ионов кальция, они через несколько минут лизируются. Однако если ионы кальция добавить к перфорино до того, как он свяжется с клетками, то белок совершенно не проявляет свою лизирующую способность. Этот парадоксальный на первый взгляд факт многое проясняет в механизме действия перфорино на клетки.

**К**ИЛЛЕРНАЯ клетка выделяет молекулы перфорино, и эти молекулы встраиваются в мембрану клетки-мишени. Там они полимеризуются, т. е. соединяются друг с другом. Полимеризация происходит только в

присутствии ионов кальция. Образующийся полимер может принимать различные конфигурации, но в оптимальных условиях конечный продукт полимеризации имеет форму цилиндра. При электронной микроскопии он выглядит как кольцо, если ориентирован вдоль пучка электронов, и как две параллельных линии — если поперек. Внутренний диаметр цилиндра, по данным Подака и Деннерта, варьирует от 5 до 20 нм.

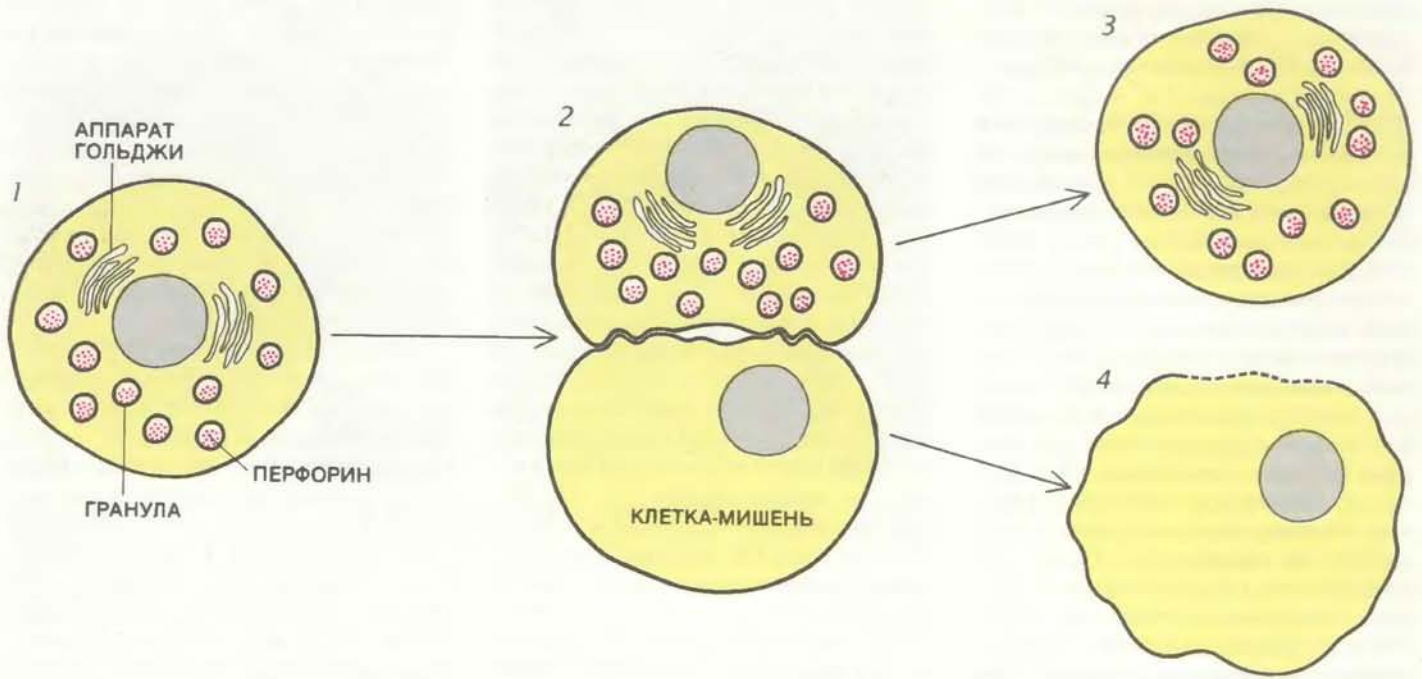
Чтобы перфорин повредил клетку-мишень, его полимеризация должна происходить внутри мембраны, так как внедриться в мембрану могут только мономеры перфорино. Если полимеризация произойдет в растворе, то полимер не сможет проникнуть затем в мембрану и убить клетку. Смысл этого понятия: оказавшись во внеклеточном пространстве или кровотоке, где в избытке имеется кальций, перфорин быстро полимеризуется и становится неактивным, что исключает возможность случайного повреждения других, нормальных клеток организма.

Образование в клеточной мембране пор в результате полимеризации перфорино приводит к быстрому и легко наблюдаемому изменению состояния



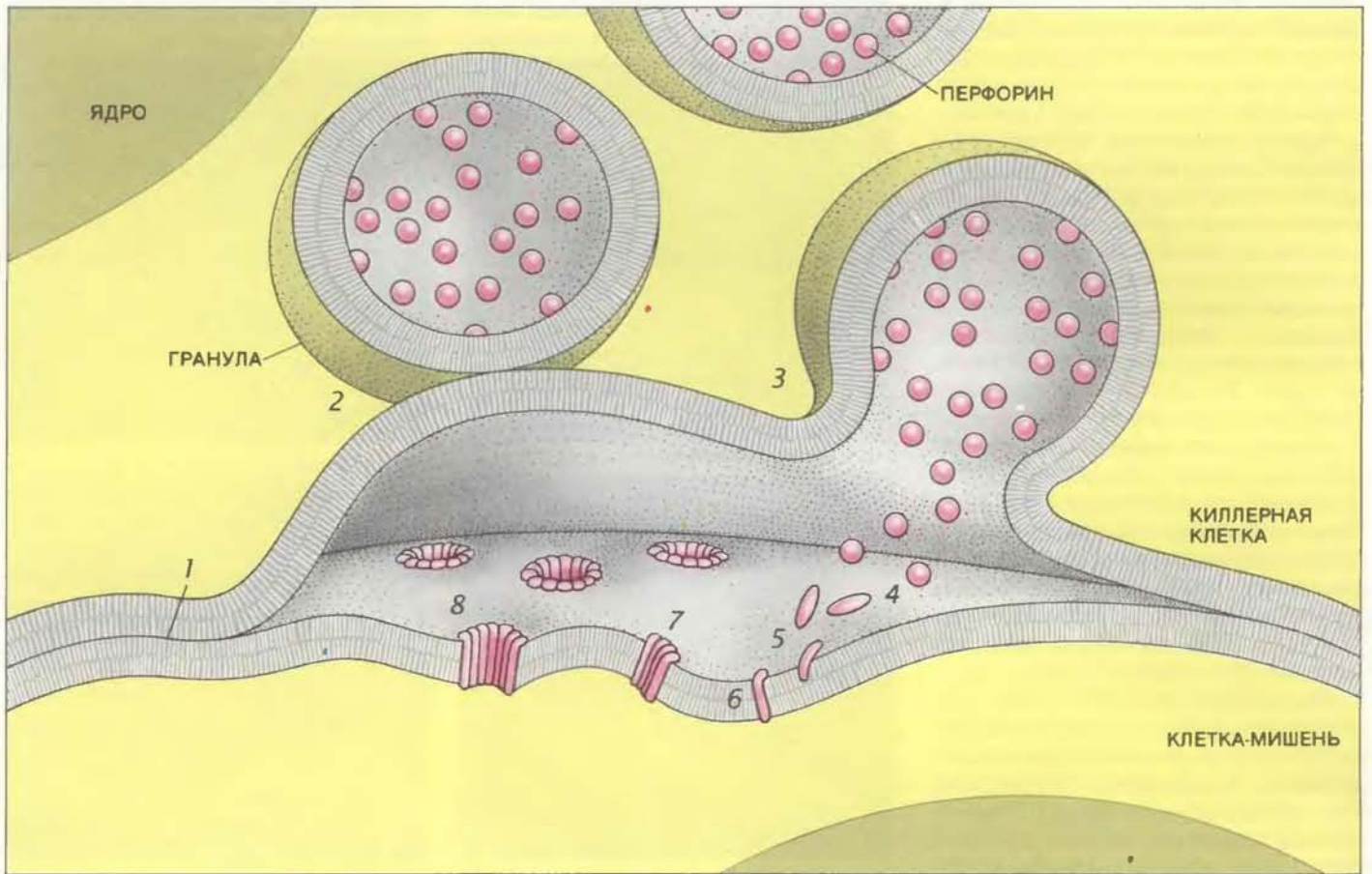
**ПОВРЕЖДЕНИЯ** мембраны клетки-мишени, нанесенные ей киллерным лимфоцитом, представляют собой трубчатые поры с внутренним диаметром от 5 до 20 нм. На этих электронных микрофотографиях негативно окрашенных мембран они выглядят как кольца. Повреждения мембраны имеют одинаковый вид, вызваны ли они лимфоцитами (а), выделенными из них гранулами (b) или же очищенным перфорином (с). Аналогичный белок, полученный из амеб *Entamoeba histolytica*, образует более мелкие поры — от 2 до 3 нм в диаметре (d).





**ПРОЦЕСС УБИЙСТВА** клетки-мишени киллерным лимфоцитом начинается с того, что киллерная клетка (1) распознает клетку-мишень и прикрепляется к ней (2). После этого в лимфоците внутриклеточные гранулы и стопки аппарата Гольджи, из которых образуются гранулы, переориентируются в направлении клетки-мишени. Из лимфоцита выде-

ляется специальный белок перфорин, который образует поры в мембране клетки-мишени (см. рисунок внизу). Применяв свое оружие, киллерная клетка отсоединяется от своей жертвы, и теперь она готова к новой атаке (3). Поврежденная клетка-мишень неотвратно погибает через несколько минут (4).



**МЕХАНИЗМ ВОЗДЕЙСТВИЯ** киллерного лимфоцита на клетку-мишень состоит в следующем. Увеличение концентрации ионов кальция в лимфоците, вызываемое, по-видимому, связыванием рецепторов киллерной клетки с поверхностью клетки-мишени (1), активирует экзоцитоз, т. е. слияние гранул с клеточной мембраной и опорожнение их содержимого наружу (2, 3). При этом находившийся

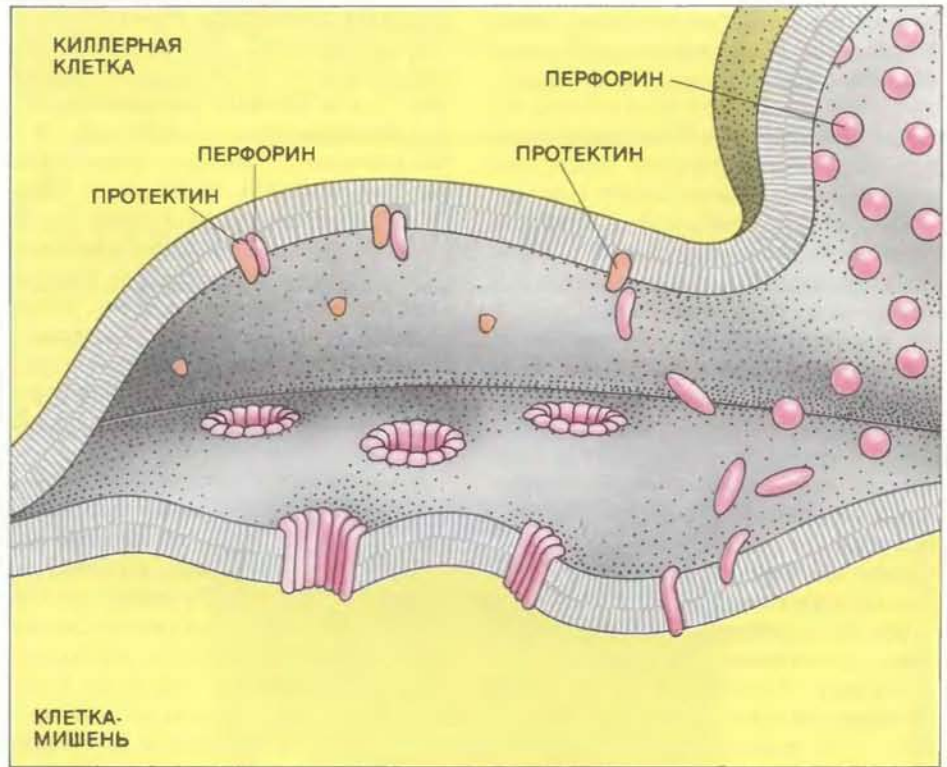
в гранулах перфорин оказывается в небольшом пространстве между клетками. Присутствующий там кальций вызывает изменение конформации одиночных молекул перфорина (4), после чего они связываются с мембраной клетки-мишени (5) и встраиваются в нее (6). В мембране эти молекулы полимеризуются (7) и формируют поры (8). Поры пропускают воду и соли, и клетка-мишень погибает.



клетки. Наружная мембрана живой клетки удерживает внутри нее белки и другие крупные молекулы (за исключением тех, которые должны секретироваться). Кроме того, она обеспечивает разделение ионов, так что одни из них концентрируются внутри клетки, а другие остаются снаружи. Вследствие неравномерного распределения положительно и отрицательно заряженных ионов существует мембранный электрический потенциал: внутреннее содержимое клетки имеет отрицательный заряд по отношению к внеклеточной среде. Когда целостность мембраны нарушается, ионы и вода перераспределяются в соответствии со своими электрохимическими градиентами, стремясь к равновесию, и мембранный потенциал исчезает. Если дырки невелики по размерам, то возникает так называемый эффект Доннана: крупные молекулы не могут выйти из клетки, так как дырки для них малы, а вода и соли из окружающего раствора проникают через мембрану внутрь. В результате клетка набухает и в конце концов лопается.

С помощью введенных в клетку-мишень микроэлектродов нам удалось зарегистрировать значительное падение мембранного потенциала вскоре после добавления перфорина. Чувствительное электронное оборудование позволило даже измерить поток ионов, проходящий через индивидуальную пору. Полученные результаты согласовались с предсказаниями теории эффекта Доннана. Наши данные, кроме того, свидетельствовали, что образованные перфорином поры — это стабильные структуры и внутренний канал поры постоянно открыт. Установив, какие ионы и молекулы проходят через поврежденную перфорином мембрану, мы оценили внутренний диаметр поры. Он оказался в пределах 1—10 нм, что несколько меньше, чем следовало из электронных микрофотографий (5—20 нм).

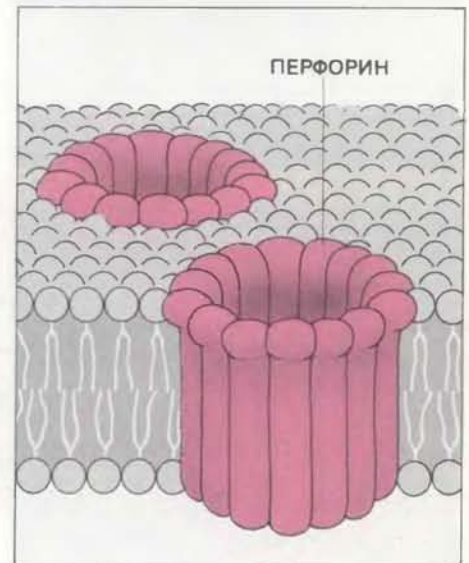
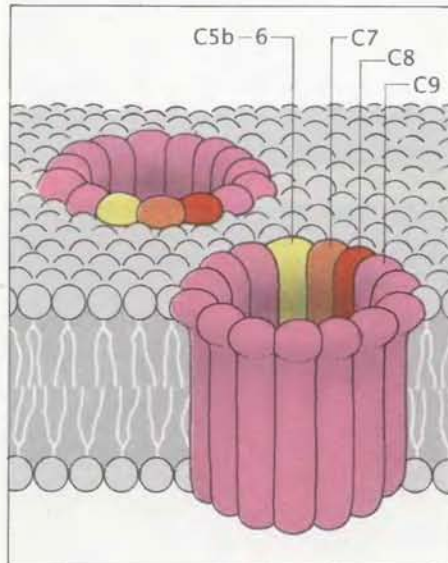
**ПЕРФОРИН** вызывает гибель любых клеток. Каким же образом обеспечивается специфичность, которой обладают лимфоциты-убийцы? Выше отмечалось, что случайное повреждение клеток перфорином, покинувшим область контакта киллерного лимфоцита с клеткой-мишенью, предотвращается тем, что перфорин в присутствии кальция полимеризуется. Повреждение посторонних клеток в результате контакта с киллерным лимфоцитом также маловероятно, так как лимфоциты способны распознавать своих будущих жертв — по наличию у них вирусных или опухолевых антигенов. Таким образом, спе-



**ЗАЩИТНЫЙ МЕХАНИЗМ**, предотвращающий гибель самой киллерной клетки, согласно гипотезе авторов статьи, основан на том, что мембрана лимфоцита содержит белок протектин, очень похожий на перфорин. Протектин связывается с мономерами перфорина, тем самым не давая им полимеризоваться, и они не могут образовать поры в мембране киллерной клетки.

цифичность действия киллерной клетки основана исключительно на необходимости тесного контакта между ней и ее жертвой. Этот контакт достигается за счет взаимодействия антигенов на поверхности клетки-мишени с рецепторами киллерного лимфоцита.

Но что защищает киллерную клетку от нее самой? Ведь ее наружная мембрана постоянно контактирует с секретируемым перфорином. Один из авторов этой статьи, а именно Юн, и работавший в нашей лаборатории аспирант Чау Чин Лю в сотрудничестве с Кларком показали недавно, что даже



**ГУМОРАЛЬНАЯ И КЛЕТочНАЯ СИСТЕМЫ ИММУННОЙ ЗАЩИТЫ** используют очень сходные механизмы образования пор в клеточной мембране. В гуморальной системе связывание антител с поверхностью клетки-мишени инициирует каскад системы комплемента, приводящий к тому, что белок C5b-6 связывается с мембраной клетки-мишени, а к нему присоединяются белки C7, C8 и много молекул белка C9, образуя пору (слева). В клеточной системе поры возникают вследствие контакта киллерного лимфоцита с клеткой-мишенью; они формируются из молекул лишь одного белка — перфорина (справа).



очищенный перфорин не убивает цитотоксические Т-лимфоциты и NK-клетки. Механизм их самозащиты неизвестен. Наша гипотеза на этот счет состоит в следующем. Предполагается, что мембрана киллерной клетки содержит специальный белок (мы назвали его протектином), который очень похож на перфорин. Сходство этих двух белков должно приводить к «обманной» полимеризации перфорина: протектин будет связываться со всяким мономером перфорина, проникшим в мембрану киллерной клетки, предотвращая тем самым встраивание перфорина в мембрану или же нормальную полимеризацию перфориновых молекул между собой, приводящую к формированию поры. Сейчас мы ведем поиски этого гипотетического белка.

Все исследования, о которых мы здесь рассказали, проводились на культурах мышинных лимфоцитов. В принципе не исключалось, что перфорин — это лишь лабораторный курьез, а не истинное оружие лимфоцитов, действующее в живом организме. Вместе с Б. Перуссия из Вистаровского института в Филадельфии и Лю мы попытались найти перфорин в лимфоцитах, полученных из крови человека, но ничего не обнаружили. Однако,

когда эти лимфоциты стимулировали интерлейкином-2, они начинали размножаться и синтезировать перфорин. Такая картина наблюдалась и с цитотоксическими Т-клетками, и с NK-клетками. Похожие результаты были получены Л. Залман и Г. Мюллером-Эберхардом из Научно-исследовательского института Скриппсовской клиники и их коллегами. Наблюдаемый «в пробирке» эффект интерлейкина-2, по-видимому, отражает его действие в организме, где он производится хелперными Т-клетками и стимулирует различные иммунные реакции.

Влияние интерлейкина-2 на лимфоциты, замеченное нами в лаборатории, позволяет дать объяснение его клиническому действию, о котором в 1984 г. сообщил С. Розенберг из Национального института рака. Он разработал новый метод лечения определенных случаев рака. Из крови больного берут лимфоциты, стимулируют их интерлейкином-2 и затем вводят обратно в организм. У некоторых пациентов наблюдалась регрессия опухоли: вероятно, под действием интерлейкина-2 их лимфоциты стали более эффективно убивать раковые клетки. Эта процедура далеко не безопасна, и потому ее применение до сих

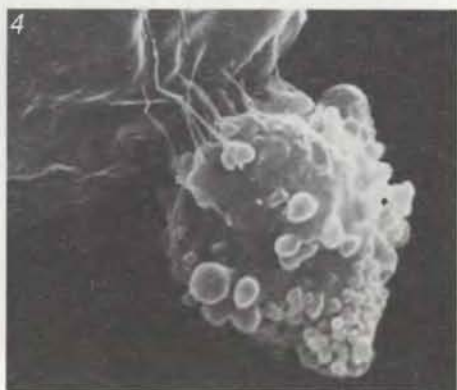
пор находится на экспериментальной стадии. Но очевидно, что понимание того, каким образом вызывается выделение перфорина киллерными лимфоцитами, очень важно для разработки методов иммунотерапии рака.

**Х**ОТЯ не вызывает сомнения, что киллерные клетки убивают клетки-мишени, делая дырки в плазматической мембране жертвы, не исключено, что у лимфоцитов могут быть и другие виды оружия. Дж. Рассел из Университета Вашингтона в Сент-Луисе для объяснения механизма процесса, ведущего к гибели клетки-мишени, выдвинул гипотезу «внутреннего разрушения». Она основывается на том наблюдении, что на ранних этапах разрушения клетки разрывается мембрана, окружающая ядро, и ДНК распадается на мелкие фрагменты. Рассел и некоторые другие исследователи считают, что клетка-мишень погибает в результате разрушения ее ДНК, которое каким-то образом вызывает киллерная клетка. Эта гипотеза подробно не разрабатывалась, но по крайней мере наши результаты ее не отвергают. Возможно, у киллерных клеток существует несколько способов убивать клетки.

Действительно, мы обнаружили, что некоторые линии цитотоксических Т-лимфоцитов, поддерживаемые в культуре, некоторое время сохраняют способность убивать клетки, несмотря на то что они не секретизируют перфорин. Быть может, они производят и выделяют какой-то другой смертоносный агент? По нашим предварительным данным, киллерные клетки содержат такое вещество; мы назвали его лейколексином. В отличие от перфорина оно убивает клетки не за несколько минут, а за несколько часов.

Вполне вероятно, что перфориновые поры, которые вначале пропускают только воду и соли и слишком малы для того, чтобы через них проходили белковые молекулы, со временем в результате дополнительной полимеризации увеличиваются, и в клетку проникают молекулы белка, разрезающего ДНК, — возможно, эту роль играет лейколексин. Или же вследствие формирования пор каким-то образом усиливается эндоцитоз, с помощью которого клетки поглощают крупные молекулы, и в результате внутрь клетки попадают белки, разрезающие ДНК.

Может быть, образование пор в плазматической мембране и не единственный механизм, с помощью которого киллерные лимфоциты убивают свои жертвы, но ясно, что этот механизм весьма эффективен. Он ис-



ПАРАЗИТИЧЕСКАЯ АМЕБА может убивать клетки посредством белка, имеющего тот же механизм действия, что и перфорин. На этих микрофотографиях, полученных Дж. Каплан с помощью сканирующего электронного микроскопа, видно, как *Entamoeba histolytica* (большая клетка) приближается к своей жертве — макрофагу (1) и вытягивает псевдоподию (2). Вступив в контакт с клеткой-мишенью, амеба может просто поглотить ее (3) или же выделить образующий поры белок, в результате действия которого клетка разбухает (4) и погибает.



пользуется для уничтожения клеток-мишеней в системе не только клеточного, но и гуморального иммунитета: в результате каскада реакций, обеспечиваемого системой комплемента, в мембране бактерий, связавших антитела, также образуются поры. Белки, участвующие в последних стадиях каскада, полимеризуются и формируют поры, очень похожие на перфориновые; внутренний диаметр этих структур 10 нм. Мы совместно с Подаком и независимо от нас Чопп обнаружили, что белки последних стадий каскада комплемента имеют значительную гомологию с перфорином: аминокислотные последовательности перфорины и этих белков во многих участках идентичны. Такое сходство между элементами гуморальной и клеточной иммунных систем не может быть случайным. Мы полагаем, что белки-убийцы обеих систем произошли от одного предкового белка и со временем дивергировали, специализируясь каждый для своей роли. Вообще, по видимому, в результате действия естественного отбора эффективные механизмы, возникшие в ходе эволюции, сохраняются, и впоследствии они могут использоваться в различных целях.

Убивать другие клетки способны не только клетки иммунной системы и даже не только клетки высших организмов, но и определенные виды бактерий, грибов и простейших. В качестве оружия многие из них тоже используют белки, образующие дырки в мембране клетки-мишени. Один из таких видов мы выбрали для изучения, надеясь при этом лучше понять механизм действия лимфоцитов. Некоторые вирулентные штаммы амебы *Entamoeba histolytica*, распространенные во всем мире, поражают кишечник (а часто и другие органы) человека, вызывая тяжелую дизентерию. В условиях лабораторной культуры они могут убивать самые разнообразные клетки, причем для этого требуется тесный контакт с жертвой.

В 1982 г. К. Джитлер из Вейцманновского института и независимо мы выделили из *E. histolytica* белок, образующий поры в мембране клеток-мишеней. В очищенном виде этот белок обладает мощным цитотоксическим действием. Он гораздо меньше по размерам, чем перфорины (молекулярная масса 14 тыс. дальтонов), но также полимеризуется, формируя при этом в мембране клетки большие трубчатые структуры с внутренним диаметром 2—3 нм. Мы предполагаем, что амеба убивает свои жертвы, связываясь с ними и продырявливая их плазматическую мембрану множеством полимеров этого белка. Сходство ме-

ханизма действия клеток, атакующих организм, и клеток, защищающих его, — это прекрасный пример конвергентной эволюции. У амеб и у лим-

фоцитов человека независимыми путями возникли очень похожие белки, образующие поры и имеющие одно и то же назначение — убивать клетки.

Издательство МИР предлагает:

## ВИРУСОЛОГИЯ. МЕТОДЫ

Под ред. Б. Мейхи  
Перевод с английского



Книга английских авторов дает прописи для работы с вирусами, представляющими интерес в качестве возбудителей заболеваний животных либо инструментов для исследования проблем молекулярной и клеточной биологии. Каждый раздел включает подробное описание методов выращивания вирусов опреде-

ленной группы, способы концентрации и очистки, определение биологической активности. Несмотря на небольшой объем, книга охватывает основные приемы работы с вирусами животных.

Для вирусологов, генетиков, молекулярных биологов, генных инженеров.

1988, 22 л. Цена 2 р. 10 к.





# Реальность квантового мира

*Эйнштейн считал, что квантовая механика дает неполное описание физических систем. Лабораторные эксперименты показывают, что он, по-видимому, ошибался и мы должны смириться со «странностями» квантового мира*

АБНЕР ШИМОНИ

**М**Ы ЖИВЕМ в замечательную эпоху, когда философские проблемы наконец находят свое разрешение на основе экспериментальных результатов. Ни в одной области науки не было получено столь захватывающих результатов, как в квантовой механике. Начиная с 20-х годов эта теория неоднократно подтверждалась в экспериментах. Великолепно оправдались ее предсказания относительно многих явлений атомной, молекулярной и ядерной физики, оптики, физики твердого тела и элементарных частиц. Однако законы квантовой механики причудливы и не находят опоры в наших интуитивных представлениях, почерпнутых из обыденной практики. Поэтому, невзирая на успехи квантовой механики, многие ученые, в том числе и Эйнштейн, полагали, что квантовомеханическое описание физических систем неполно, что к нему необходимо еще что-то добавить. Недавно проведенные эксперименты приводят к выводу, что такое мнение, скорее всего, ошибочно. Полученные результаты отчетливее чем когда-либо показывают, что мы живем в странном «квантовом мире», не поддающемся интерпретации на основе очевидного здравого смысла.

Вот несколько новых необычных выводов, справедливость которых мы вынуждены признать. Во-первых, два объекта, разделенных многометровым расстоянием и никак между собой не связанных, тем не менее «чувствуют» присутствие друг друга. Их поведение поразительным образом скоррелировано, так что измерения, выполненные над одним из них, мгновенно влияют на результаты измерений, выполняемых над другим. Этот вывод невозможно объяснить с точки зрения классической науки, но он полностью согласуется с квантовой механикой. Во-вторых, фотон — квант электромагнитного излучения — может вести себя и как частица, и как волна. В таком неопределенном состоянии он существует до тех пор, пока над ним не проведут какого-

то физического измерения. Если при этом измеряются частицеподобные характеристики, то фотон предстанет перед нами частицей; если будут измеряться его волновые характеристики, то он будет вести себя подобно волне. Пока не указаны условия эксперимента, невозможно сказать, является ли фотон волной или частицей. Наконец, идея квантовых неопределенностей вышла за пределы атомного и субатомного мира. Ученые обнаружили, что при некоторых условиях макроскопические системы существуют в таком состоянии, когда наблюдаемые макроскопические величины не имеют определенного значения. Каждый из этих выводов коренным образом изменяет представления об окружающем нас мире.

**Ч**ТОБЫ понять суть проведенных экспериментов и оценить их влияние на философские концепции, нужно хотя бы бегло познакомиться с основными идеями квантовой механики. При любом обсуждении этой теории самым существенным понятием является квантовое состояние, описываемое волновой функцией. Конкретное квантовое состояние определяет все численные характеристики физической системы в той степени, в какой это вообще можно сделать. Последняя оговорка крайне важна, так как, согласно квантовой механике, не все характеристики системы могут одновременно иметь определенные значения. Так, известный принцип неопределенности Гейзенберга гласит, что частица не может занимать определенное положение и иметь при этом определенный импульс. Это, возможно, самый известный пример приведенного выше утверждения.

В квантовой механике ясно и недвусмысленно можно говорить лишь о вероятностях каждого возможного исхода конкретного эксперимента, выполняемого над системой, находящейся в данном квантовом состоянии. Если эта вероятность оказывается равна единице, то результат эксперимента предопределен. Если она

оказывается равной нулю, то данный исход эксперимента невозможен. Но если вероятность заключена между единицей и нулем, то заранее нельзя сказать, каков будет исход каждого отдельного эксперимента. В таком случае можно предсказать лишь среднее число для результатов, если один и тот же эксперимент выполняется над большим числом идентичных систем.

Представим себе, что мы проводим измерения с фотоном. Квантовое состояние фотона фиксируется тремя величинами: направлением распространения, частотой и линейной поляризацией (т. е. направлением вектора электрического поля, связанного с фотоном). Подходящим прибором для измерения поляризации является так называемая поляризующая пленка. Если свет линейно поляризован вдоль некоторого направления на пленке, которое называется оптической осью, то идеальная пленка полностью пропустит его. Если же поляризация перпендикулярна этой оси, то свет будет поглощен. (Здесь и далее имеется в виду, что свет падает на пленку под прямым углом.)

Вращая пленку, можно поставить ряд экспериментов. Если свет поляризован вдоль оптической оси, то вероятность его прохождения через пленку равна единице. Если свет линейно поляризован перпендикулярно оси, то вероятность его прохождения равна нулю. Мы не обсуждали еще случая, когда фотон линейно поляризован в направлении, составляющем некоторый угол с оптической осью. Тогда вероятность прохождения света есть число между нулем и единицей (точнее, квадрат косинуса этого угла). Если, скажем, угол равен  $45^\circ$ , то вероятность прохождения равна  $1/2$ . Это означает, что из 100 фотонов, линейно поляризованных в данном направлении, в среднем только 50 пройдут сквозь пленку.

Другая основная идея квантовой механики — принцип суперпозиции, согласно которому из любых двух квантовых состояний системы можно



получить другие состояния, представляющие «смесь» первых двух. Физически такая операция сводится к получению состояния, которое «перекрывает» каждое из исходных состояний. Идею можно проиллюстрировать на примере двух квантовых состояний фотона, в которых направления линейной поляризации взаимно перпендикулярны. Из них можно получить несколько квантовых состояний, также имеющих линейную поляризацию, направление которой, однако, составляет произвольный угол по отношению к направлениям поляризации исходных состояний.

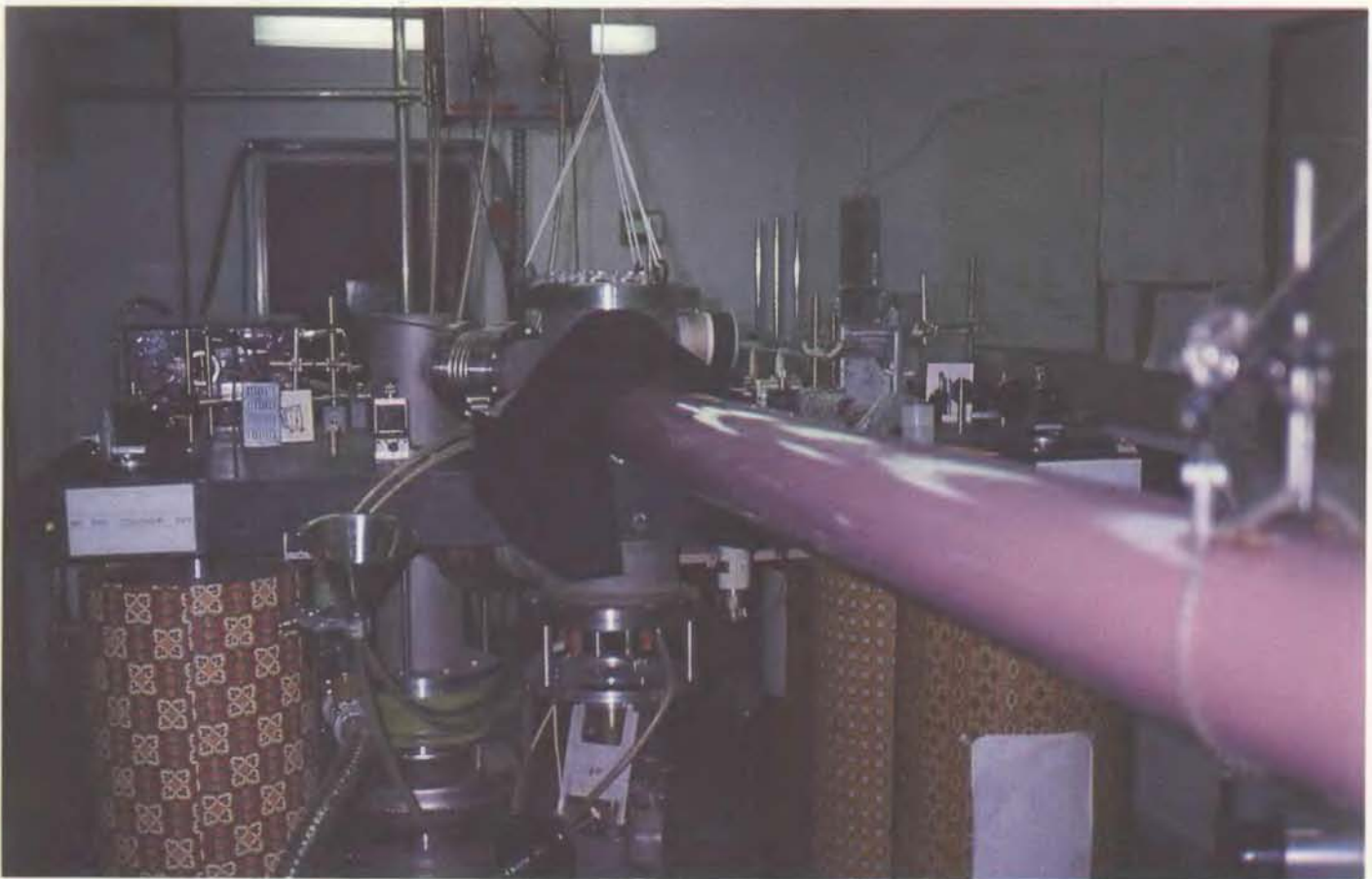
**УЖЕ ТОЛЬКО** из двух основных идей — принципа неопределенности и принципа суперпозиции — становится ясно, что квантовая механика в сильной степени противоречит так называемому здравому смыслу. Если квантовое состояние системы дает ее полное описание, то величина, не имеющая в данном состоянии

определенного значения, не просто неизвестна ученому, стремящемуся описать эту систему. Неопределенность этой величины носит объективный характер. Кроме того, поскольку исход эксперимента по измерению объективно неопределенной величины не детерминирован квантовым состоянием, а последнее является носителем полной информации о системе, этот исход принципиально случаен. Случаен даже не в смысле его непредсказуемости ученым. Вероятность каждого возможного исхода измерения есть объективная вероятность. Классическая физика не вступает в столь разительное противоречие со здравым смыслом.

Еще к более поразительным выводам приводит квантовая механика при описании системы, состоящей из двух удаленных друг от друга частей. Представим себе два фотона, разлетающихся в противоположных направлениях. Одно из возможных квантовых состояний этой системы

есть состояние, в котором фотоны поляризованы вдоль вертикальной оси. Другое возможное состояние — поляризация обоих фотонов вдоль горизонтальной оси. Нет ничего странного или удивительного в таких двухфотонных квантовых состояниях, за исключением уже обсуждавшихся особенностей, присущих однофотонным состояниям. Но если принять во внимание принцип суперпозиции, то могут возникнуть необычные эффекты.

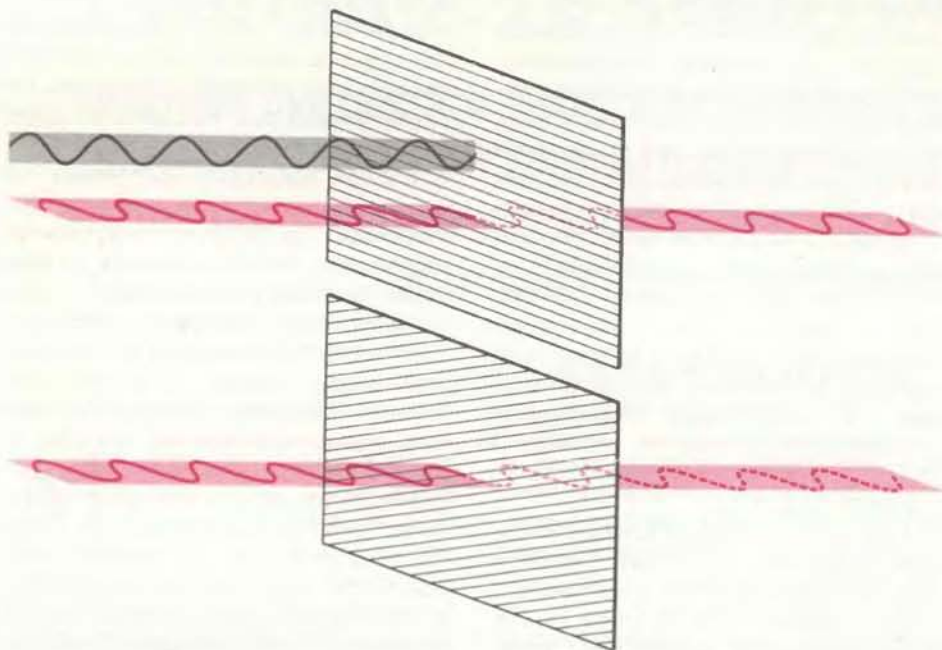
В частности, используя принцип суперпозиции, можно получить смешанное состояние, содержащее равные вклады вертикально и горизонтально поляризованных состояний. Такое состояние нам еще неоднократно встретится в дальнейшем, поэтому мы обозначим его  $\Psi_0$  (так как греческая буква «пси» обычно используется для обозначения квантовых состояний). Свойства  $\Psi_0$  на самом деле удивительны. Например, представим, что на пути фотонов помещены поляризующие пленки, оптические оси ко-



**ЭКСПЕРИМЕНТЫ** проливают свет на такие проблемы квантовой механики, которые прежде были предметом чисто философских дискуссий. Опыты на этой установке были выполнены А. Аспектом и его коллегами из Оптического института Парижского университета. Лазеры, расположенные на фотографии слева и справа, возбуждают в вакуумной камере (в центре) отдельные атомы кальция. При возвращении в основное (невозбужденное) состояние каждый атом испускает пару фотонов. (Фотон — элементарная частица, квант электромагнитного излучения.) Фо-

тоны разлетаются в противоположных направлениях, путешествуя внутри трубы длиной 6,5 м. Те из них, которые проходят сквозь поляризационные анализаторы, попадают на фотодетекторы. Согласно квантовой механике, должна существовать тонкая корреляция между поляризациями разлетающихся фотонов. Такая корреляция противоречит классическим теориям, называемым моделями со скрытыми параметрами. Описанный эксперимент подтвердил квантовомеханические представления.





НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ квантовой системы демонстрируется на примере фотона. Поляризующая пленка пропускает весь свет, падающий на нее под прямым углом, если свет линейно поляризован вдоль некоторого направления на пленке, называемого оптической осью (показана штриховкой). Такая поляризация фотона изображена на верхнем рисунке цветной волнообразной линией. Пленка задерживает весь свет, падающий на нее под прямым углом, если свет линейно поляризован в направлении, перпендикулярном оптической оси (волнообразная серая линия на верхнем рисунке). Предположим теперь, что фотон линейно поляризован под каким-то углом между  $0^\circ$  и  $90^\circ$  к оптической оси (нижний рисунок). Тогда нельзя дать определенного ответа на вопрос, пройдет ли фотон сквозь пленку. Вероятность прохождения фотона есть число между нулем и единицей (точнее, она равна квадрату косинуса указанного угла).

торых направлены вертикально. Поскольку  $\Psi_0$  содержит равное число вертикально и горизонтально поляризованных состояний, вероятность прохождения обоих фотонов через поляризующие пленки будет равна  $1/2$ . Вероятность того, что оба они будут задержаны, также равна  $1/2$ . Такого просто не может случиться, чтобы один фотон прошел, а второй был бы задержан пленкой. Иными словами, имеется сильная корреляция результатов экспериментов с двумя разными фотонами.

Такая же ситуация будет иметь место, если пленки расположены под углом  $45^\circ$  к горизонтали: либо оба фотона пройдут сквозь пленку, либо оба будут задержаны. Только один фотон пройти через пленку не может. В действительности результаты поляризационных экспериментов не зависят от ориентации пленок, при условии что они одинаковы. Таким образом, можно указать бесконечное множество поляризационных экспериментов, результаты которых сильно коррелируют. (Конечно, на практике можно выполнить только один из них.) Каким-то образом второй фотон в паре «знает», проходить ему через пленку или нет в соответствии с

тем, прошел или не прошел первый фотон. При этом оба фотона могут находиться на значительном расстоянии друг от друга, и ни у одного из них нет механизма передачи информации другому. В подобных ситуациях квантовая механика бросает вызов релятивистской концепции локальности, согласно которой никакое воздействие не может передаваться со скоростью, превышающей скорость света (в частности, невозможно мгновенное действие на расстоянии).

СЛЕДУЕТ подчеркнуть, что все обсуждавшиеся выше особенности квантовомеханических законов — объективная неопределенность, случайность, вероятность и нелокальность — существенно зависят от предположения о том, что квантовое состояние системы дает ее полное описание. Некоторые теоретики считают, однако, что квантовое состояние просто описывает ансамбль одинаково полученных систем, и потому хорошие предсказания могут быть сделаны только относительно статистических результатов одного и того же эксперимента, выполняемого над всеми системами, входящими в ансамбль. В то же время, утверждают

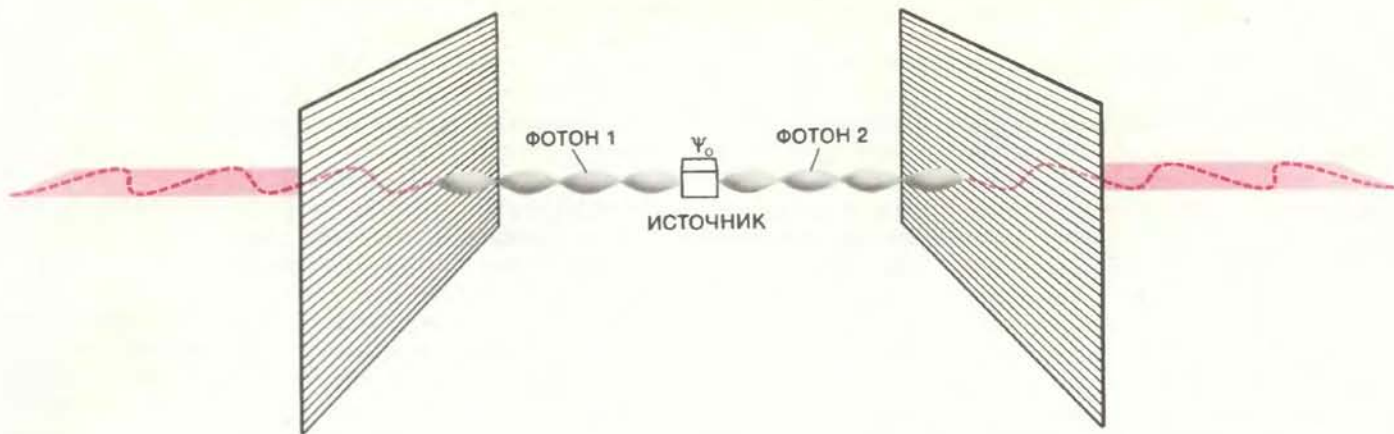
они, каждый член ансамбля отличается от других чем-то, что не находит отражения в их квантовом состоянии. Поэтому и различаются результаты отдельных экспериментов. Свойства индивидуальных систем, не описываемые квантовым состоянием, определяются так называемыми скрытыми параметрами.

Если правы теоретики, придерживающиеся идеи скрытых параметров, то объективной неопределенности не существует. Тогда дело просто в том, что ученые не знают значений скрытых параметров, характеризующих рассматриваемую индивидуальную систему. Далее, не существует объективной случайности и объективной вероятности. Самое важное то, что факт корреляции свойств разделенных систем становится не более удивительным, чем совпадение двух экземпляров одной и той же газеты, напечатанных в одной типографии, но разосланных по почте в разные города.

В 1964 г. Дж. Белл из Европейской организации ядерных исследований (ЦЕРН) в Женеве показал, что предсказания локальных моделей со скрытыми параметрами несовместимы с предсказаниями квантовой механики. Размышления над некоторыми моделями со скрытыми параметрами, которые развивались Д. Бомом из Беркбек-Колледжа в Лондоне и Л. де Бройлем, привели Белла к доказательству важной теоремы. Суть ее в том, что ни одна модель, обладающая свойством локальности (в строго определенном смысле), не может быть согласована со статистическими предсказаниями квантовой механики. Иными словами, имеются физические ситуации, в которых предсказания квантовой механики будут отличаться от предсказаний любой локальной модели со скрытыми параметрами (см. Bernard d'Espagnat. The Quantum Theory and Reality, "Scientific American", November, 1979).

Идею Белла можно представить, по крайней мере частично, обратившись вновь к квантовому состоянию  $\Psi_0$ . Как было отмечено выше, результаты поляризационных экспериментов над парой фотонов в этом состоянии должны сильно коррелировать между собой, если угол между оптическими осями поляризационных пленок равен нулю (например, когда обе оси направлены вертикально). Не должен вызвать особого удивления и тот факт, что по крайней мере частичная корреляция результатов измерений будет иметь место при любом угле между осями пленок. (Точнее, если один из фотонов проходит через пленку, то вероятность прохождения второго фотона равна квадрату коси-





КОРРЕЛЯЦИИ между поляризациями двух фотонов возникают в том случае, когда фотоны находятся в некотором квантовом состоянии, обозначаемом  $\Psi_0$  (использована буква «пси» греческого алфавита). Такое состояние образуется при суперпозиции двух состояний, в первом из которых оба фотона линейно поляризованы вдоль вертикальной оси, а во втором — вдоль горизонтальной. Состояние  $\Psi_0$  содержит равные числа вертикально и горизонтально поляризованных состояний. Представим теперь, что на пути фотонов помещены поляризующие пленки с горизонтально направленными оптическими осями. Поскольку состояние  $\Psi_0$  содержит равные числа линейно поляризованных состояний, то с вероятностью 1/2 оба фотона пройдут

сквозь соответствующие пленки и с вероятностью 1/2 оба будут ими задержаны. Не может быть такого случая, чтобы один фотон был пропущен, а второй — задержан. Иными словами, имеется сильная корреляция между возможными исходами поляризационных экспериментов. В действительности, конкретная ориентация поляризующих пленок роли не играет: важно лишь, чтобы их оптические оси были направлены одинаково. Несмотря на то что оба фотона разделены довольно большим расстоянием, каждый из них каким-то образом «узнает», прошел ли он сквозь пленку или нет в зависимости от того, прошел или был задержан другой фотон.

нуса угла между оптическими осями пленок.)

Соответственно в моделях со скрытыми параметрами (которые согласовывались бы со всеми статистическими предсказаниями квантовой механики) каждой паре фотонов в ансамбле должны быть приписаны значения параметров столь тонким образом, чтобы была обеспечена сильная или частичная корреляция измерений при любом угле между оптическими осями пленок. Но условие локальности требует, чтобы значения параметров, приписываемые каждому фотону в паре, не зависели от ориентации пленки, на которую падает другой фотон, и от того, пройдет он сквозь пленку или задержится. Именно требования локальности делают невозможной тонкую «регулировку», необходимую для воспроизведения сильной и частичной корреляции, следующей из квантового состояния  $\Psi_0$ .

ТАКИМ образом, теорема Белла утверждает, что в принципе экспериментально можно определить, какая из теорий верна: квантовая механика или локальные модели со скрытыми параметрами. Такие опыты были важны хотя бы потому, что, несмотря на огромное число подтверждений квантовой механики, к моменту, когда Белл привел доказательство своей теоремы, не были проверены именно те узловы моменты, где квантовая механика несомненно

вступает в противоречие со здравым смыслом.

В 1969 г. Дж. Клаузер (работавший тогда в Колумбийском университете), М. Хорн из Бостонского университета, Р. Хольт из Гарвардского университета и я предложили проект соответствующего эксперимента. Пары фотонов с коррелированными линейными поляризациями должны были получаться путем возбуждения атомов до нужного начального состояния. При последующем возвращении в невозбужденное состояние атомы должны были излучать по два фотона. С помощью фильтров и линз можно было добиться того, чтобы при разлетании фотонов в противоположных направлениях один из них падал на первый поляризационный анализатор, а другой — на второй. Изменяя относительную ориентацию анализаторов и регистрируя число фотонных пар, прошедших через них при четырех возможных комбинациях относительного расположения, можно было измерить корреляцию в прохождении фотонных пар.

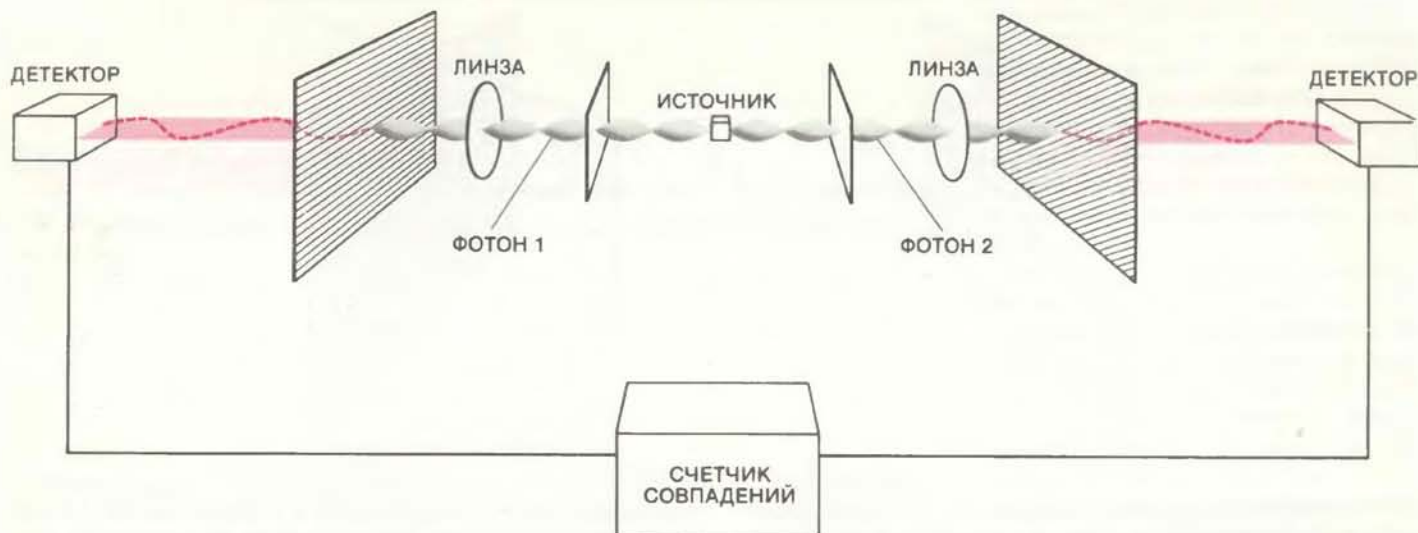
Мы предложили использовать в качестве поляризационных анализаторов кристаллы кальцита или стопки зеркального стекла, которые гораздо более эффективно задерживают фотоны, поляризованные в направлении, перпендикулярном оптической оси, чем обычные поляризующие пленки. За анализаторами помещались фотодетекторы, регистрирую-

щие определенную долю проходящих фотонов. Если каждый детектор регистрирует фотон, причем время между регистрацией не превысит 20 нс ( $1 \text{ нс} = 10^{-9} \text{ с}$ ), то вероятность того, что оба фотона были испущены одним и тем же атомом, будет велика. Поскольку линзы собирают пары фотонов, испущенных в некотором конечном интервале углов, квантовое состояние фотонов не совпадает точно с квантовым состоянием  $\Psi_0$ , а представляет собой несколько модифицированное состояние  $\Psi_0$ , в котором также имеют место корреляции, не воспроизводимые никакой локальной моделью со скрытыми параметрами.

Такой эксперимент был выполнен в 1972 г. С. Фридманом и Клаузером в Калифорнийском университете в Беркли, Э. Фрайем и Р. Томпсоном в Техасском университете в 1975 г. и после этого еще рядом других групп. Большая часть экспериментальных результатов согласуется с предсказаниями корреляций на основе квантовой механики и несовместима с предсказаниями моделей со скрытыми параметрами. Кроме того, под сомнение была поставлена достоверность тех экспериментов, где были получены другие результаты, так как обнаружались слабые места в методике их проведения.

Тем не менее до недавнего времени все эксперименты оставляли возможность, позволявшую сторонникам





ПОИСК КОРРЕЛЯЦИЙ между фотонами проводился в 70-е годы несколькими группами исследователей. Пары фотонов испускались атомами кальция и ртути при их переходах из одного энергетического состояния в другое. Каждый фотон попадал на поляризационный анализатор. Квантовая механика предсказывает тонкие эффекты, когда имеется корреляция между прохождением или задержкой фотонов в анализаторах, несмотря на то что фотоны

как-будто не имеют средств для обмена информацией. В основном эти эксперименты подтвердили выводы квантовой механики, но они оставили «лазейку» для иных моделей. Дело в том, что ориентация обоих анализаторов фиксировалась до испускания фотонов. Поэтому нельзя было исключить возможности, что каким-то образом информация может быть передана от одного анализатора к другому.

скрытых параметров еще на что-то надеяться. Дело в том, что поляризационные анализаторы сохраняли свою относительную ориентацию примерно в течение минуты, что вполне достаточно для обмена информацией между ними с помощью какого-нибудь гипотетического механизма. В результате сторонники скрытых параметров могли утверждать, что из специальной теории относительности в конкретных условиях данных экспериментов еще не следует выполнение требования локальности Белла. Поэтому такие опыты нельзя рассматривать как критические эксперименты, устанавливающие справедливость квантовой механики или моделей со скрытыми параметрами.

**Ч**ТОБЫ исключить и эту возможность, А. Аспект, Ж. Далибар и Ж. Роже из Оптического института Парижского университета выполнили эффектный эксперимент, в котором выбор ориентаций поляризационных анализаторов производится оптическими переключателями во время полета фотонов. Эксперимент потребовал восьми лет работы и был закончен только в 1982 г. Каждый переключатель представляет собой небольшой сосуд с водой, в котором ультразвук периодически возбуждает стоячие волны. Эти волны играют роль дифракционной решетки, которая может весьма эффективно отклонять падающие фотоны. При возбуждении стоячей волны фотон отклоняется на анализатор с одной ориента-

цией, а при «выключении» стоячей волны фотон лежит прямо к другому анализатору с иной ориентацией.

Процесс переключения ориентаций занимает около 10 нс. Генераторы, питающие оба переключателя, действуют независимо, хотя сам процесс имеет, скорее, периодический, чем случайный характер. Это обстоятельство, к сожалению, не позволяет с полной определенностью интерпретировать результаты эксперимента. Расстояние между анализаторами составляло 13 м, так что сигнал с максимальной возможной скоростью (равной, согласно специальной теории относительности, скорости света) распространится от одного анализатора до другого за 40 нс. Это означает, что выбор ориентации первого поляризационного анализатора не должен повлиять на прохождение фотоном второго анализатора, и наоборот. Таким образом, в эксперименте удовлетворяется условие локальности Белла. Следовательно, в соответствии с теоремой Белла должны были бы наблюдаться некоторые нарушения предсказаний квантовой механики относительно корреляций.

Однако все дело в том, что эксперимент привел к совсем иным результатам. Данные о корреляции в пределах экспериментальных ошибок согласуются с квантовомеханическими предсказаниями, сделанными на основе квантового состояния  $\Psi_0$ . Кроме того, полученные данные более чем на пять стандартных отклонений отличаются от предельных значений, допускаемых теоремой Белла для лю-

бой локальной модели со скрытыми параметрами.

Несмотря на то что эксперимент Аспекта и его коллег не дает вполне однозначного ответа, большинство ученых считают, что шансы на то, что будущие эксперименты опровергнут полученные результаты, чрезвычайно малы. Возможность спасения семейства локальных моделей со скрытыми параметрами представляется практически невероятной. Похоже, что странные свойства квантового мира — объективные неопределенность, случайность и вероятность, а также нелокальность — навсегда утвердились в физике.

Одно из самых странных свойств квантового мира — нелокальность. При некоторых обстоятельствах измерения, проводимые над одним из фотонов, по-видимому, мгновенно влияют на результаты измерений над другим фотоном. Можно ли использовать этот факт для передачи послания со скоростью, превышающей скорость света? К счастью, для специальной теории относительности ответ на этот вопрос отрицателен. Главное предположение этой теории, что никакой сигнал не может превысить скорости света, остается в силе.

**М**ОЖНО кратко пояснить, почему так происходит. Представим себе двух людей, которые собираются обменяться сообщениями с помощью прибора, аналогичного устройству по проверке моделей со скрытыми параметрами. Пусть источник коррелированных пар фотонов находится между



наблюдателями. У каждого из них имеется поляризационный анализатор и фотодетектор. Наблюдатели могут произвольным образом ориентировать оптические оси своих анализаторов.

Предположим, что оба наблюдателя договорились направить оптические оси вертикально. Тогда всякий раз, как будет испущена пара фотонов, должна наблюдаться сильная корреляция конечных результатов: либо оба фотона пройдут через анализаторы, либо оба фотона будут задержаны. Но пока наблюдатели изолированы друг от друга, эта сильная корреляция не проявится для каждого из них. Первый наблюдатель увидит, что половина фотонов в среднем проходит через анализатор, а половина — задерживается. Второй наблюдатель на своем анализаторе обнаружит такую же картину. Иными словами, каждый из изолированных наблюдателей обнаружит только случайную картину прохождения и задержки фотонов в анализаторах.

Теперь вообразим, что первый наблюдатель пытается закодировать некое послание своему коллеге, изменяя ориентацию своего анализатора. В зависимости от этой ориентации на каждом детекторе должна существовать сильная или частичная корреляция между событиями. Однако снова каждый из наблюдателей увидит, что в половине случаев фотоны проходят сквозь анализатор, а в половине слу-

чаев — задерживаются. Таким образом, независимо от взаимной ориентации анализаторов каждый из изолированных наблюдателей увидит статистически идентичные случайные распределения актов прохождения и поглощения фотонов. Квантовые корреляции между фотонами можно обнаружить, лишь сравнивая данные, полученные на каждом детекторе. Поэтому попытка использовать квантовые корреляции для передачи информации быстрее скорости света обречена на неудачу.

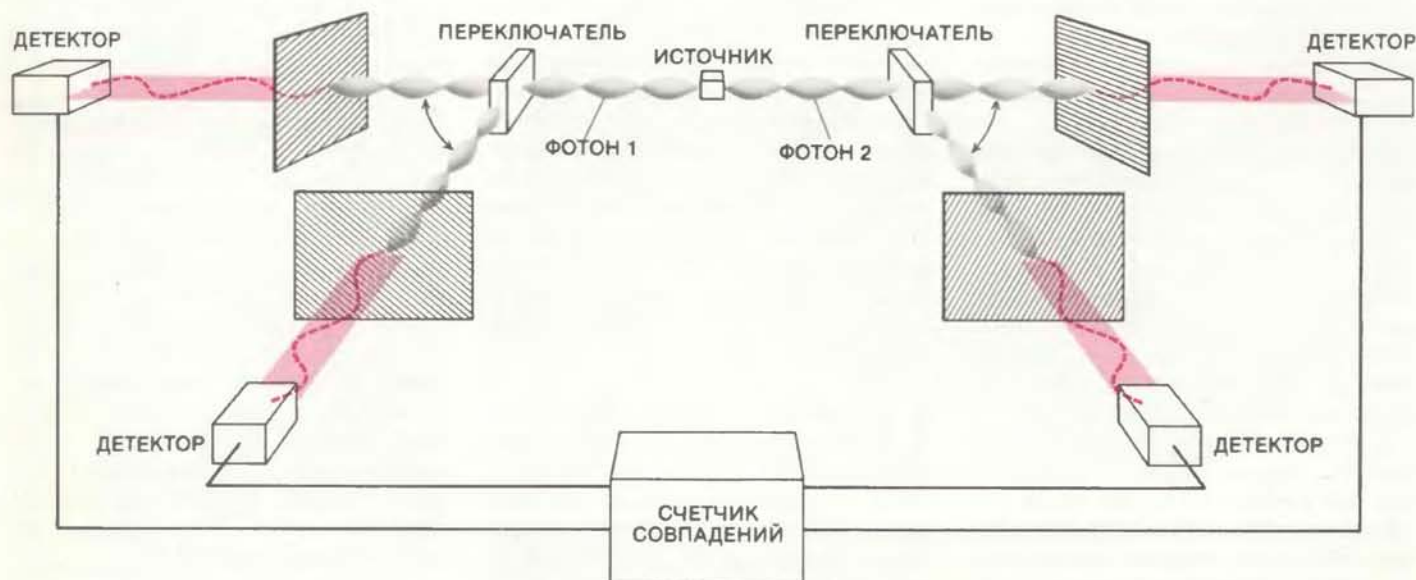
В этом смысле между квантовой механикой и специальной теорией относительности установилось мирное сосуществование, даже вопреки квантовомеханической нелокальности. Поэтому обманчиво и даже просто неверно утверждение, что квантовая механика возвращает нас к действию на расстоянии, которое было присуще дорелятивистским теориям, как, например, ньютоновской теории тяготения. Соблазнительно представить квантовомеханическую нелокальность как «страсть на расстоянии». Такой образ не претендует на объяснение странных корреляций, а лишь подчеркивает, что с их помощью нельзя передать никакого физического воздействия со скоростью, превышающей скорость света.

**ДРУГОЙ** эксперимент, называемый экспериментом с запаздывающим выбором, был предложен в

1978 г. Дж. Уилером, работавшим тогда в Принстонском университете. Он также демонстрирует странности квантового мира. Основной частью установки является интерферометр, в котором световой луч может быть расщеплен и вновь сложен. Лазерный импульс направляется на расщепитель луча, который ориентирован так, чтобы половина луча проходила через него, а другая половина отражалась под прямым углом к направлению распространения исходного импульса. Если затем световые лучи, прошедшие разными путями, вновь соединяются, то возникает интерференционная картина, доказывающая волновую природу света.

Предположим теперь, что интенсивность лазерного излучения уменьшена настолько, что в любой момент времени в интерферометр попадает только один фотон. В этом случае можно задать два различных вопроса. Летит ли фотон по одному из двух путей, так что он либо проходит через расщепитель, либо отклоняется им, т. е. проявляет свойства частицы? Или фотон в некотором смысле одновременно и проходит, и отклоняется, так что интерферирует сам с собой, проявляя тем самым свойства волны?

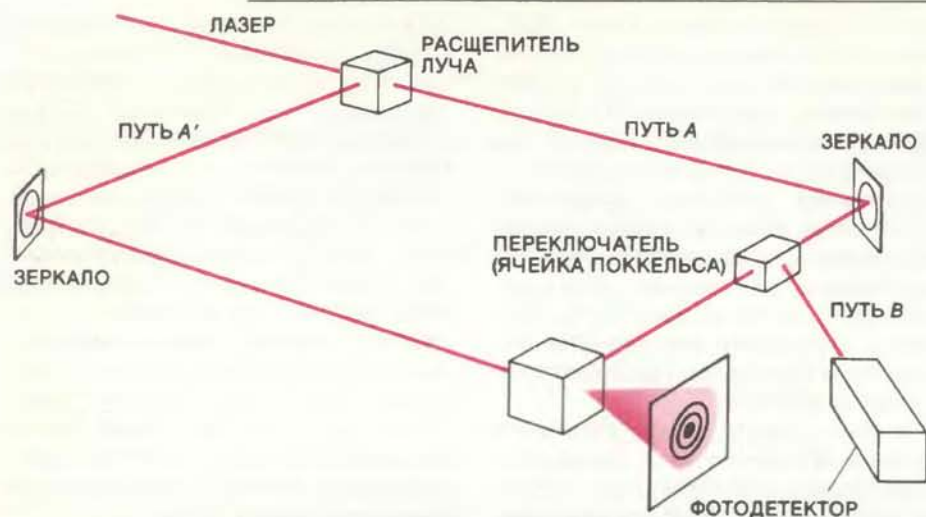
Ответ недавно был дан К. Аллеем, О. Якубовичем и У. Виксом из Университета шт. Мэриленд в Колледж-Парке и независимо Т. Хельмутом, Г. Вальтером и А. Зайонцем из Мюн-



**БЫСТРОЕ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕ** ориентаций анализаторов, выполняемое во время полета фотонов, стало характерной особенностью эксперимента А. Аспекта с коллегами (см. рисунок на с. 23), завершено в 1982 г. При одном «положении» переключателя фотон отклоняется к анализатору, имеющему некоторую ориентацию. При другом — фотон движется прямо к другому анализатору с иной ориентацией. Время, за которое свет проходит расстояние между анализаторами, превышает время, необходимое

для переключения с одной ориентации на другую. Поэтому выбор ориентации для каждого анализатора не может повлиять на результаты наблюдений на другом анализаторе. (К сожалению, для полной определенности эксперимента нужно было бы, чтобы переключение носило случайный, а не периодический характер.) Этот эксперимент подтвердил необычные квантовомеханические представления, и, по-видимому, мы должны признать их.





**ЭКСПЕРИМЕНТ С ЗАПАЗДЫВАЮЩИМ ВЫБОРОМ** другим способом выявляет «странный» квантового мира. Фотон падает на расщепитель луча. Выберет ли фотон определенный путь, т. е. отклонится в расщепителе или пройдет сквозь него? Если так, то фотон проявит свойства частицы. Или фотон в некотором смысле и пройдет, и отклонится в расщепителе, проявив волновые свойства? Чтобы ответить на эти вопросы, на одном из двух возможных путей (здесь путь А), которые фотон может выбрать после взаимодействия с расщепителем, помещен переключатель. При его включении свет отражается в фотодетектор (путь В), давая информацию о маршруте фотона и подтверждая тем самым его частицеподобные свойства. При выключении переключателя фотон может интерферировать сам с собой (пути А и А'). Получающаяся на экране интерференционная картина демонстрирует волновые свойства фотона. Результаты эксперимента показывают, что фотон ведет себя как волна, когда измеряются его волновые характеристики, и, наоборот, он ведет себя как частица, если мы изучаем его частицеподобные свойства. Замечательно то, что переключатель запускался после взаимодействия фотона с расщепителем луча — фотону негде было «узнать», как ему следует себя вести: как частице, выбрав какой-то определенный маршрут, или как волне, распространяясь сразу по обоим путям.

хенского университета. Обе группы нашли, что фотон ведет себя как частица, когда измеряются частицеподобные свойства, и как волна, когда измеряются волновые свойства. Замечательным новшеством, внесенным этим экспериментом, является то, что решение измерять частицеподобные или волновые свойства принимается после взаимодействия каждого фотона с расщепителем луча. Следовательно, в самый критический момент взаимодействия с расщепителем фотон еще не «проинформирован», как ему следует себя вести (как частице или как волне), т. е. выбрать один из двух возможных путей или распространяться по обоим сразу.

Длина обоих путей составляет около 4,3 м, так что фотон преодолевает это расстояние за 14,5 нс. Ясно, что обычные механические устройства не могут за столь короткое время переключиться с измерения частицеподобных свойств на измерение волновых. Однако такую «ловкость» может проявить так называемая ячейка Поккельса, которая срабатывает за время, меньшее 9 нс. Ячейка Поккельса содержит кристалл, который во внешнем электрическом поле способен расщепить световой луч на две ча-

сти. Так происходит из-за того, что свет, поляризованный вдоль одной из осей кристалла, распространяется с иной скоростью, чем свет, поляризованный в перпендикулярном направлении. Подобранным образом электрическое поле и геометрию прибора, можно добиться того, что поляризованный свет, попадающий в ячейку, выходит поляризованным в перпендикулярном направлении. Ячейка Поккельса устанавливается на одном из возможных путей, по которым летит фотон после взаимодействия с расщепителем луча в интерферометре (см. рисунок сверху).

**ПОЛЯРИЗИРУЮЩАЯ** пленка является вторым основным элементом, необходимым для переключения с измерения частицеподобных свойств фотона на измерение его волновых свойств. Свет, выходящий из ячейки Поккельса, попадает на пленку. Если ячейка «включена», то свет поляризуется таким образом, что отражается пленкой в фотодетектор. В этом случае мы получаем ответ на вопрос, по какому пути прошел фотон, т. е. измеряем его частицеподобные свойства. Если же ячейка «выключена», то поляризация выходящего из

нее света такова, что он проходит сквозь пленку и складывается затем со светом, прошедшим по другому пути. В этом случае интерференционные эффекты подтверждают волновую природу фотона.

Обе группы исследователей сообщили о результатах, которые прекрасно согласуются с квантовой механикой. Их работы доказали, что выбор между двумя возможностями действительно можно сделать и после взаимодействия фотона с расщепителем луча в интерферометре.

Как интерпретируются результаты, полученные в экспериментах с запаздывающим выбором? Прежде всего стоит отмежевываться от выдвигаемой иногда экстравагантной интерпретации, согласно которой квантовая механика допускает в некотором смысле «путешествия в прошлое». Квантовая механика не может сделать так, чтобы в прошлом произошло нечто, чего там не происходило. В частности, квантовая механика не может заставить фотон выбрать в нулевой момент времени один из двух возможных для него путей, если спустя 12 нс включается ячейка Поккельса. Она не может заставить фотон выбрать сразу оба пути, если после того как выбор сделан, ячейка выключается.

Более естественной представляется интерпретация, согласно которой объективное состояние фотона в интерферометре оставляет многие его свойства неопределенными. Если квантовое состояние полностью учитывает все свойства фотона, то такой вывод не вызывает удивления: в любом квантовом состоянии некоторые свойства остаются неопределенными. Но такое заключение приводит к следующему вопросу: как и когда неопределенные свойства становятся определенными? Ответ Уилера гласит, что «ни одно элементарное квантовое явление не существует как явление, пока оно не наблюдается». Другими словами, переход от неопределенности к определенности не завершён до тех пор, пока не произошел «необратимый акт увеличения», например почернение зерен фотоэмульсии. Однако исследователи основ квантовой механики не согласны с ответом Уилера. Следующий эксперимент показывает, почему вопрос все еще остается открытым.

**В** 1935 г. Э. Шредингер предложил знаменитый мысленный эксперимент. Пусть фотон падает на полутражающую посеребренную пластинку, так что вероятности его прохождения и отражения равны 1/2. Если фотон проходит через зеркало, он запускает устройство, которое разби-



вает бутылку с цианистым калием и тем самым убивает кошку, сидящую в закрытой коробке. Пока коробка не будет открыта, невозможно определить, жива кошка или убита.

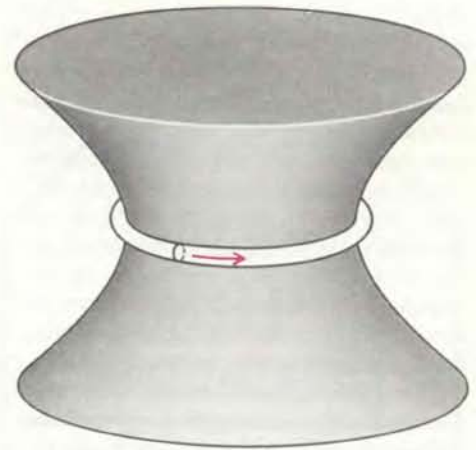
В таком положении дел не было бы ничего удивительного, если бы прохождение фотона через зеркало имело объективный характер, но оставалось совершенно неизвестным наблюдателю. Однако прохождение фотона принципиально неопределенно. Тогда столь же неопределенно событие с разрушением бутылки и в конечном итоге вопрос о жизни или смерти кошки. Другими словами, кошка находится между жизнью и смертью до тех пор, пока не будет подвергнута прямому наблюдению. Вывод парадоксален, но по крайней мере он касается только мысленного эксперимента.

В наше время уже труднее отвергнуть этот парадокс, поскольку нечто подобное мысленному эксперименту Шредингера было воплощено на практике несколькими группами ученых. Этим занимались Р. Восс и Р. Вебб из Исследовательского центра им. Уотсона фирмы IBM в Йорктаун-Хайтс, Л. Джакель из AT&T Bell Laboratories, М. Деворе из Беркли и Д. Шварц из Университета шт. Нью-Йорк в Стоуни-Брук. В определенной степени их работа основывалась на вычислениях, выполненных А. Леггетом из Иллинойского университета в Эрбана-Шампейн и С. Чакраварти из Стоуни-Брук и другими учеными.

Установка состоит из сверхпроводящего кольца, разомкнутого тонким слоем изолятора (так называемый джозефсоновский контакт). Однако электрический ток может циркулировать по такому кольцу благодаря «туннелированию» электронов через изолятор. Этот ток порождает магнитное поле.

В данной системе интерес представляет магнитный поток через кольцо, который (если поле однородно) равен произведению площади кольца на компоненту магнитного поля вдоль направления, перпендикулярного плоскости кольца. Если бы кольцо не было разомкнуто, то магнитный поток находился бы внутри кольца в «ловушке». Изолятор позволяет магнитному потоку «скользнуть» с одного значения на другое. С помощью современных магнитометров величину магнитного потока можно измерить с фантастической точностью. Магнитный поток следует рассматривать как макроскопическую величину, поскольку он создается движением огромного числа (около  $10^{23}$ ) электронов. Полученные результаты позволяют утверждать, что можно получить такие состояния сверхпрово-

МАКРОСКОПИЧЕСКАЯ СИСТЕМА может при некоторых обстоятельствах находиться в таком состоянии, что некая макроскопическая величина не будет иметь определенного значения. Иными словами, проявление квантовых неопределенностей не ограничено только микромиром, т. е. системами, подобными фотону. На рисунке изображено сверхпроводящее кольцо с зазором. Концы кольца разделены тонким слоем изолятора. Электрический ток может циркулировать по кольцу благодаря «туннелированию» через изолятор. Ток порождает магнитное поле. Если бы кольцо было полностью замкнутым, то магнитный поток через кольцо имел бы определенное значение. (Магнитный поток — это произведение площади кольца на величину перпендикулярной ему компоненты магнитного поля.) В присутствии изолятора маг-

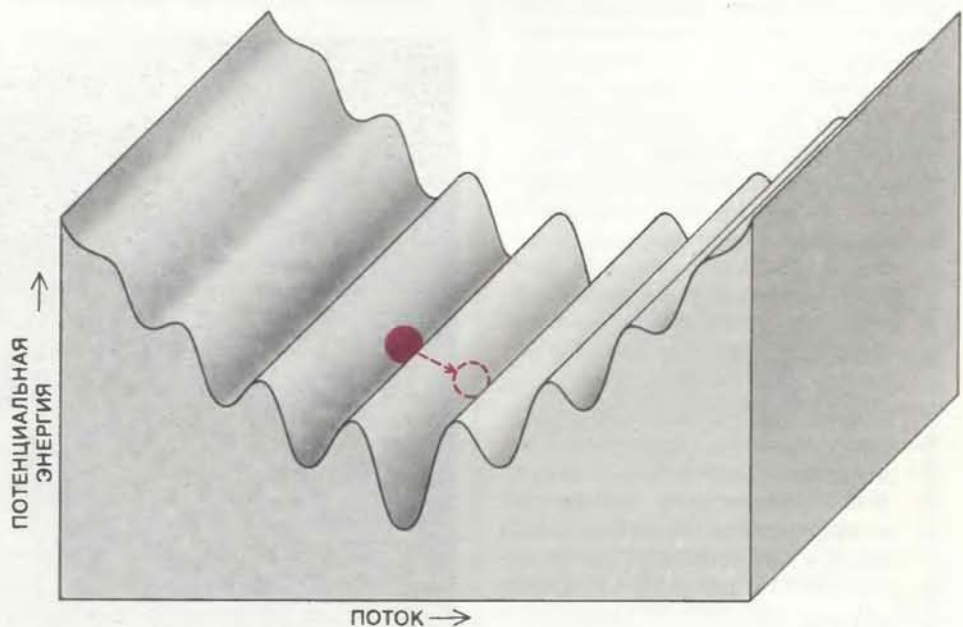


нитный поток может меняться от одного возможного значения к другому. Удивительно, что при этом величина магнитного потока не имеет определенного значения.

дящего кольца, в которых магнитный поток не имеет определенного значения. Это и есть проявление квантовомеханических закономерностей, ранее наблюдавшихся только в микроскопических системах.

Чтобы понять, каким образом в этом эксперименте устанавливается квантовая неопределенность, необходимо учесть, что при каждом значении потока кольцо обладает некото-

рой потенциальной энергией. Казалось бы, поток через кольцо не может самопроизвольно измениться, так как потенциальный барьер отделяет два соседних значения потока друг от друга. Согласно классической физике, переходы между двумя значениями потока запрещены, если какой-нибудь внешний источник энергии, как правило тепловой, не помогает перейти через потенциальный барьер. Однако с



НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ в системе, изображенной на верхнем рисунке, можно пояснить с помощью следующей схемы. При каждом значении магнитного потока сквозь сверхпроводящее кольцо система имеет некоторую потенциальную энергию. Казалось бы, поток не может самопроизвольно изменить своего значения, так как соседние значения потока разделены потенциальным барьером. Эти барьеры можно представить себе холмиками, а состояние системы — мячиком, помещенным в долину между холмиками. Согласно классической физике, перемещение мячика из одной долины в другую требуют использования внешней энергии (нужной мячику, чтобы он смог перевалить через вершину холмика). Согласно квантовой механике, мячик может «просочиться» сквозь барьер без внешнего источника энергии. Такой туннельный эффект видимым образом проявляется в неопределенности магнитного потока.



точки зрения квантовой механики можно без всякого внешнего источника энергии «просочиться» сквозь барьер (туннельный эффект). Упомянутые выше группы экспериментаторов показали, что поток действительно меняется от одного значения к другому и что это изменение не может полностью происходить за счет тепловой энергии. Наблюдаемое туннелирование по крайней мере частично должно быть квантовомеханическим, особенно при очень низких температурах. Но квантовомеханическое туннелирование приводит к принципиальной неопределенности потока, который из-за этого не может быть локализован точно или близко к тому или иному значению.

Экспериментальная демонстрация квантовой неопределенности макроскопической переменной самим фактом своего существования не противоречит цитируемому выше утверждению Уилера. Отсюда, однако, следует, что «увеличение», т. е. переход с микроскопического на макроскопический уровень, еще не избавляет от квантовомеханической неопределенности. Ударение в утверждении Уилера относительно «необратимого акта увеличения» следует поставить на слове «необратимый». Вопрос об условиях, при которых происходит такой необратимый процесс, еще далек от разрешения в современной теоретической физике. Некоторые исследователи (включая меня) считают, что нужны новые физические принципы, чтобы понять особенности той необратимости, которая возникает, когда в процессе измерения неопределенная наблюдаемая становится определенной.

**ИССЛЕДОВАНИЯ** «странностей» квантового мира продолжают. Недавно выполнены и другие эксперименты, некоторые из них еще не завершены. Здесь следует упомянуть эксперименты двух типов, хотя у нас нет возможности обсудить их детально. В экспериментах с нейтронными интерферометрами, проведенных Г. Раухом и А. Зайлингером из Атомного института австрийских университетов, С. Вернером из Университета шт. Миссури в Колумбии и К. Шуллом из Массачусетского технологического института и их сотрудниками, волновая функция нейтрона расщепляется кристаллической пластинкой и затем соединяется одной или несколькими другими пластинками. При рекомбинации возникают интерференционные эффекты, которые демонстрируют ряд замечательных свойств, включая неопределенность пути нейтрона через интерферометр. Наконец, Р. Чамберс из Бристоль-

ского университета, Г. Мюлленштедт из Университета в Тьбингене и А. Тономура из Hitachi, Ltd. подтвердили с помощью электронных интерферометров знаменитый эффект Ааронова—Бома. Эффект заключается в том, что электрон «чувствует» присутствие магнитного поля в некоторой области, хотя вероятность обнаружения электрона в этой области равна нулю. Это впечатляющая де-

монстрация некоторого вида нелокальности, отличной от нелокальности, проявляемой при корреляциях пары фотонов, хотя и как-то с ней связанной. Полное понимание связи между нелокальностью двух видов, равно как и многих других озадачивающих результатов, полученных в экспериментах по изучению природы квантового мира, требует дальнейшей работы.

## Наука и общество

### Оптимальность под обстрелом

**М**НОГИЕ животные, будь то хищники или травоядные, в отношении пищи ведут себя так, будто стремятся максимально увеличить суммарное количество поглощаемой энергии. Например, обычная в Европе певчая птица большая синица, как правило, отказывается от истощающегося источника корма, когда интенсивность поглощения энергии падает ниже величины, которая может быть обеспечена при перемене места кормежки. Ушастый окунь в условиях выбора добычи избегает «второсорт-

ных» пищевых объектов, потребление которых снизило бы общую интенсивность поглощения энергии.

Такое поведение подтверждает предсказания теории оптимальной стратегии питания (optimal foraging), представляющей собой выдающийся пример применения в биологии математической концепции оптимальности. Однако эта теория подвергается жестокой критике. Недавно против нее на страницах экологического журнала скандинавских стран «Oikos» выступили Г. Пирс и Дж. Олласон из Абердинского университета. Заглавие их статьи весьма красноречиво: «Восемь доводов к вопросу о том, почему



КОРОБЧАТАЯ ЧЕРЕПАХА лакомится ежевикой. Согласно теории, исходящей из ортодоксального дарвинизма, всякая стратегия питания оптимальна. Эта теория сейчас подвергается серьезной критике. (Снимок предоставлен телепередачей Animals, Animals.)



заниматься теорией оптимальной стратегии питания — это напрасная трата времени».

Теория оптимальной стратегии питания основывается на ортодоксальном дарвинизме. Предполагается, что миллионлетний естественный отбор создал животных, поведение которых направлено на увеличение приспособленности, определяемой (довольно расплывчато) как способность индивида передать свои гены следующим поколениям. Собственно приспособленность трудно измерить, и поэтому взамен изучается поведение животного с точки зрения более удобного для измерения аспекта его жизнедеятельности. В теории оптимальной стратегии питания мерой служит средняя интенсивность поглощения энергии в единицу времени, затрачиваемого на кормежку. Идея состоит в том, что особи, которые успешнее кормятся, оставят больше потомков.

Математические модели, учитывающие такие факторы, как общая калорийность различных пищевых объектов и распределение этих объектов, служат для расчета наилучшей стратегии питания, оцениваемой выбранной мерой. Если наблюдаемое поведение животного подтверждает теоретические предсказания, считается, что мера и исходные посылки модели выбраны правильно; в противном случае модель пересматривается. По мнению сторонников теории оптимальной стратегии питания, тот факт, что модели в рамках этой теории предсказывают поведение многих животных, доказывает универсальность принципа естественного отбора.

Большинство возражений, приведенных Пирсом и Оллсоном, впервые было выдвинуто С. Гоулдом и Р. Левонтином из Гарвардского университета. Эти ученые утверждают, что поведение животного, связанное с его питанием, обусловлено многими факторами помимо самой потребности в пище и ее поисках, — например, необходимостью следить за врагами. Кроме того, эволюция поведения может продолжаться и сейчас: организмы и условия их существования изменяются на протяжении миллионов лет. Вообще возможно, что «оптимальный» признак никогда не появится, так как гены возникают в результате случайных мутаций и притом сложным образом взаимодействуют между собой. Все эти соображения означают, что даже хорошее согласие модели с реальностью может быть не более чем совпадением.

Дж. Кребс из Оксфордского университета — один из основных защитников теории оптимальной стратегии питания — старается доказать,

что оптимизация является общим правилом процесса естественного отбора и результаты ее широко распространены: «Стоит только посмотреть вокруг, чтобы убедиться, что объекты живой природы, даже части вашего собственного тела, устроены наилучшим образом для той роли, которую они выполняют». Кребс и Д. Стивенс из Массачусетского университета в Амхерсте в своей книге под названием «Foraging Theory» пишут, что возражения критиков теории оптимальной стратегии питания объясняют, почему приверженцы этой теории могут быть неправы, но не объясняют, почему они обязательно должны быть неправы. По мнению Кребса, некоторые ранние работы по теории оптимальной стратегии питания действительно претендовали на слишком многое. «В ретроспективе оптимальность — это не закон природы, а способ разобраться в поведении животных». По словам Оллсона, действия животных явно имеют смысл, и он не оспаривает мощь естественного отбора. Тем не менее, как сказал этот исследователь, заявлять, будто поведение оптимально — это просто самообман, поскольку число имеющих значение факторов огромно. Он и Пирс отмечают, что поскольку предсказания моделей редко полностью совпадали с действительностью, их следует считать, по существу, неверными. Стивенс отвечает на это, что результаты значительного большинства исследований по выбору пищевых объектов и стратегии фуражировки по меньшей мере качественно согласуются с предсказаниями теории оптимальной стратегии питания и что явные расхождения немногочисленны.

Левонтин признает: концепция оптимальности иногда может давать верное объяснение биологических явлений, но он ставит ее сторонникам в вину то, что несложные исследования, появляющиеся в поддержку теории оптимальной стратегии питания, принимаются некритически, в то время как они не доказывают ничего, кроме искусства авторов в изобретении разумных моделей. Поскольку убедительно продемонстрировать оптимальность очень трудно, Левонтин задается вопросом, не следует ли эволюционистам ограничиться выявлением разнообразия живой природы без объяснения конкретных событий. Философ Ф. Китчер из Калифорнийского университета в Сан-Диего более оптимистичен: судьба теории оптимальной стратегии питания, по его мнению, зависит от того, годятся ли модели для широкого спектра видов или же их в каждом частном случае надо «подгонять». Он полагает, что

мы еще не достигли в своих знаниях той стадии, когда можно разграничить эти две ситуации.

## Издательство МИР предлагает:

А. Гупта, Д. Лилли,  
Н. Сайред  
ЗАКРУЧЕННЫЕ  
ПОТОКИ

Перевод с английского  
Монография зарубежных специалистов А. Гупты, Д. Лилли (США) и Н. Сайреда (Великобритания) посвящена экспериментальным и численным методам исследования внутренних закрученных течений. Рассмотрены вопросы, связанные со структурой течений при слабой и сильной закрутке, характеристики турбулентности, особенности колебательных явлений на выходе из закручивающих устройств, условия распада вихря и т. д. Особое внимание уделено вопросам горения в закрученных потоках. Рассмотрены вопросы практического использования закрученных потоков в различных отраслях техники: авиационной теплоэнергетике, химической технологии и т. д. Приведено описание и дан практический анализ различного рода технических устройств, в том числе вихревых горелок, циклонных камер, сепараторов, камер сгорания газотурбинных двигателей внутреннего сгорания. Рассмотрены вопросы математического моделирования процессов течения и горения с использованием современных моделей турбулентности и численных методов. Сделан анализ применимости этих методов. Подробно рассмотрены современные методы экспериментальных исследований с применением лазерной диагностики.

Для специалистов в области прикладной газовой динамики, теплообмена и теплоэнергетики.

1988, 36 л. Цена 5 р. 80 к.





# Антенная решетка со сверхдлинной базой

*Решетка из 10 антенн, размещенных на территории США, позволит получать изображения Вселенной с самыми мелкими «детальями». С ее помощью астрономы смогут изучать такие загадочные космические процессы, как энерговыделение в квазарах*

КЕННЕТ И. КЕЛЛЕРМАНН, А. РИЧАРД ТОМПСОН

С ТЕХ ПОР как 400 лет назад Галилей нацелил свой телескоп на ночное небо, астрономы заняты созданием все более сложных приборов для наблюдения Вселенной. Каждое усовершенствование, повышающее разрешающую способность, позволяло им рассматривать все более мелкие «детали» Вселенной и обнаруживать новые ранее неизвестные объекты. Телескоп Галилея повысил разрешающую способность в 20 раз и позволил впервые разглядеть фазы Венеры, кольца Сатурна, четыре ярких спутника Юпитера, кратеры и горы на Луне и несчетные звезды Млечного Пути. Гигантские современные оптические приборы, такие как телескоп Хейла, установленный в обсерватории «Маунт-Паломар», могут обнаруживать объекты в миллион и более раз менее яркие, чем те, что видел Галилей. Однако из-за турбулентности атмосферы удается различать детали всего в десять раз более мелкие, чем видимые с помощью простейшего телескопа, каким пользовался Галилей.

Развитие радиотехники во время второй мировой войны открыло совершенно новое окно во Вселенную. Когда астрономы нацелили радиотелескопы в небо, они начали открывать ранее совершенно неизвестные солнечные и планетные радиовспышки, квазары, пульсары, радиогалактики, гигантские молекулярные облака и космические мазеры. Радиоволны не только открывают новый мир астрономических явлений, но и (благодаря тому, что они значительно длиннее световых волн) не испытывают столь сильных искажений, вызываемых турбулентностью атмосферы или мелкими дефектами телескопа.

В то же время большая длина радиоволн создала немало серьезных препятствий для первых радиоастрономов. Разрешающая способность

телескопа зависит от отношения длины волны к апертуре, и для получения разрешающей способности, сравнимой с достигаемой на оптическом телескопе при работе на типичной длине волны  $5000 \text{ \AA}$  ( $5 \cdot 10^{-7} \text{ м}$ ), радиотелескоп, работающий на длине волны 1 м, должен иметь размеры в миллион раз большие. Поэтому, хотя ранее обнаруживали сигналы от далеких галактик, невидимых или едва различимых даже в самые большие оптические телескопы, они не всегда могли разрешать отдельные источники вследствие недостаточной разрешающей способности. Даже самая большая подвижная антенна (в ФРГ), представляющая собой параболическое зеркало диаметром 100 м и работающая на длине волны около 1 см, обеспечивает разрешающую способность всего в  $1'$ , что примерно соответствует разрешающей способности невооруженного человеческого глаза. Для построения радиотелескопа с разрешающей способностью  $1''$ , сравнимой с разрешающей способностью телескопа Хейла, потребовалась бы антенна с диаметром зеркала в десятки километров.

К счастью, существует возможность обойти эту трудность. Примерно 25 лет назад радиоастрономы поняли, что обрабатывая сигналы от нескольких небольших антенн, разнесенных на значительные расстояния, можно синтезировать разрешающую способность, эквивалентную разрешающей способности одной антенны с огромной апертурой. При этом эффективная апертура была бы примерно равна наибольшему расстоянию между антеннами. Такой метод синтеза изображения, основанный на интерференции радиоволн, получил название радиointерферометрии со сверхдлинной базой\*. Радиоастрономы США в настоящее время со-

здают систему апертурного синтеза — радиointерферометр со сверхдлинной базой (РИСДБ), в состав которого должны войти 10 антенн, разбросанных по всей стране — от Виргинских до Гавайских островов, что позволит синтезировать радиотелескопную систему с размером апертуры 8000 км, что почти равно диаметру Земли. Разрешающая способность системы РИСДБ будет лучше одной тысячной секунды дуги, т. е. примерно на три порядка величины лучше, чем у крупнейших наземных оптических телескопов. Астрономы с нетерпением ожидают завершения построения этой системы в начале следующего десятилетия; она, помимо всего прочего, должна обеспечить беспрецедентное проникновение в ядра галактик и квазаров и позволить раскрыть физический механизм, ответственный за генерацию в них огромной энергии излучения, который, как считают в настоящее время, связан с аккрецией газа на массивную черную дыру.

## Радиointерферометрия

Действие РИСДБ основано на принципах работы обычного радиointерферометра — системы, синтезирующей сигналы источника, принятые двумя или более антеннами. Получаемая при этом интерференцион-

\* Метод радиointерферометрии со сверхдлинной базой впервые предложен советскими учеными и обсужден на международной встрече ученых в Центре дальней космической связи в Крыму в июле 1963 г. (См.: В. Lovell. «Out of the Zenith Jodrell Bank». Oxford, 1973). Первая отечественная публикация по этому вопросу: Матвеев Л. И., Кардашев Н. С., Шоломицкий Г. Б. О радиointерферометре с большой базой. «Известия ВУЗ. Радиофизика», 1965, № 4, с. 651. — Прим. ред.



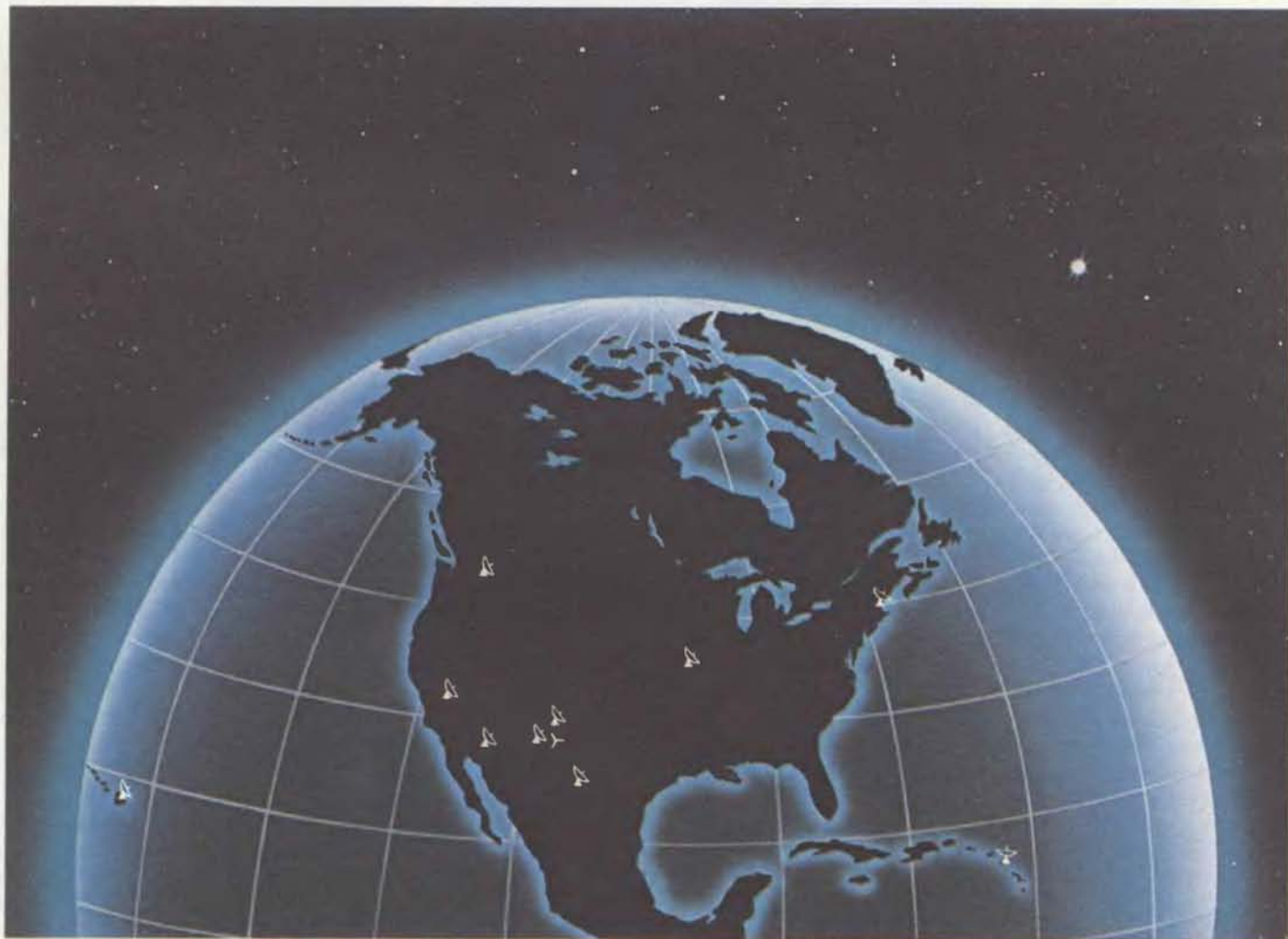
ная картина позволяет определить разность хода лучей от источника сигнала до антенны. При разности хода, равной целому числу длин волн, гребни волн поступают на антенны синфазно (т. е. одновременно), что приводит к максимальной интенсивности суммарного сигнала. И наоборот, если разность хода составит нечетное число полуволн, гребни одной волны будут совпадать с впадинами другой, что приведет к их взаимной компенсации, и суммарный сигнал при этом окажется минимальным. Поскольку разность хода определяется разностью расстояний от источника до каждой из антенн, то получаемая интерференционная картина содержит информацию о мельчайших структурных деталях источника излучения и может быть использована для построения его изображения.

При наблюдении небесного тела с помощью радиоинтерферометра вращение Земли вызывает изменения разности хода, так что принимаемый

сигнал колеблется между синфазным и противофазным, создавая синусоидальное распределение минимумов и максимумов, именуемых интерференционными полосами. При коротких базовых линиях Земля за время перехода интерференционной картины от одного максимума к следующему должна повернуться на больший угол, чем при длинных базах. Таким образом, антенны, расположенные относительно близко друг к другу, формируют широкие полосы и реагируют только на крупные детали источника. Когда антенны разнесены на большие расстояния, они реагируют на детали меньшего размера. Для сбора полной информации о строении изучаемого объекта необходима решетка антенн с различными длинами базовых линий. Более того, для получения хорошего плоскостного изображения ориентации базовых линий должны быть тщательно распределены. Вращение Земли само по себе укорачивает базовую линию и меняет ее

ориентацию по отношению к источнику излучения; таким образом, серия наблюдений за заметный промежуток времени как бы создает дополнительные базовые линии к используемой решетке.

Сегодня самым мощным радиотелескопом является гигантская Y-образная решетка VLA (Very Large Array), развернутая в США на высокогорном плато в штате Нью-Мексико. Она состоит из 27 подвижных параболических антенн, размещенных по направлению трех ответвлений, или плеч, Y-образной конфигурации. Вдоль каждого ответвления проложена железнодорожная колея длиной 21 км с фиксированными станциями, определяющими базы между антеннами. С помощью проложенных под землей волноводов антенны подключены к центральному устройству, которое осуществляет сложение сигналов для получения интерференционных полос. Девять антенн вдоль каждого ответвления могут перемещать-



АНТЕННАЯ РЕШЕТКА СО СВЕРХДЛИННОЙ БАЗОЙ (радиоинтерферометр, РИСДБ) из 10 антенн с максимальным расстоянием между антеннами 8000 км планируется построить в США. Разрешающая способность системы будет не хуже разрешающей способности одной антенны, имеющей такой же диаметр, как у земного шара. Принятые каждой

антенной радиосигналы от космических источников будут записываться на магнитную пленку и передаваться в центр управления для формирования интерференционных картин, на основании которых можно строить изображения исследуемых космических объектов. Символом Y отмечено место, где расположена антенная решетка VLA.

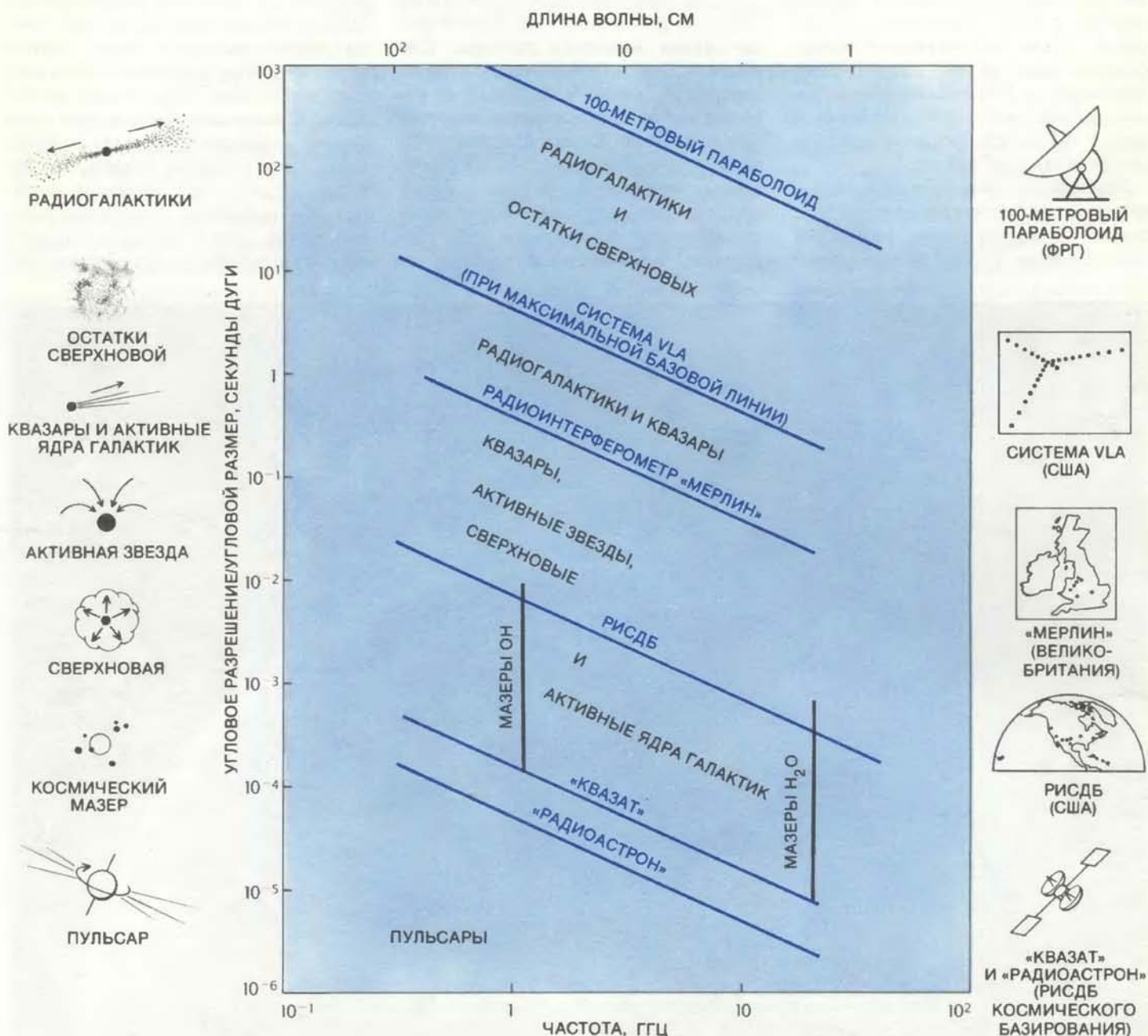


ся по железнодорожной линии, образуя четыре различные конфигурации, причем длина плеча может меняться в пределах от 600 м до 21 км. Антенны работают в нескольких диапазонах частот, от 330 МГц (длина волны 90 см) до 23 ГГц (длина волны 1,3 см). Эта система имеет высокую чувствительность и разрешающую способность, измеряемую десятками долями секунды дуги; так что качество получаемых изображений такое же или лучше, чем у самых мощных наземных оптических телескопов. С

помощью системы VLA астрономы получили радиоизображения таких объектов, как солнечные пятна, кольца Сатурна, темные туманности в нашей Галактике и таинственные мощные струйные выбросы от квазаров и центров радиогалактик.

Однако многие космические источники радиоизлучений, такие как загадочные квазары, слишком малы для наблюдения даже с помощью такой антенной решетки. Их можно наблюдать только при условии, если расстояния между антеннами увеличить до

нескольких тысяч километров. Такие огромные расстояния исключают возможность непосредственного физического соединения антенн между собой, поэтому принятые каждой антенной сигналы записываются на магнитные ленты, которые поступают в центральную лабораторию, где они «проигрываются» одновременно; так имитируется высокая разрешающая способность одной огромной антенны. Такой метод, который, как уже говорилось, носит название радиоинтерферометрии со сверхдлин-



РАЗРЕШАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ РАДИОТЕЛЕСКОПОВ как функция частоты излучения наблюдаемых источников для различных антенн и антенных решеток. Чем больше эффективная апертура антенны, тем выше ее разрешающая способность (измеряемая углом, соответствующим наименьшей различимой детали на объекте). На графике приведены также угловые размеры различных космических источников радиоизлучений. Боннский радиотелескоп (ФРГ) представляет собой одиночную антенну диаметром 100 м. Система VLA состоит из 27 подвижных антенн, связанных волноводными трактами. Система «Мер-

лин», установленная в Великобритании Нуффилдской радиоастрономической лабораторией, представляет собой решетку из 7 антенн; максимальное расстояние между двумя антеннами равно 200 км; все антенны связаны радиолниями, работающими в диапазоне МКВ. В РИСДБ максимальная длина базовой линии составит 8000 км; запись данных будет производиться на магнитную ленту. Радиоинтерферометры «Квазат» и «Радиоастрон» будут размещены на околоземной орбите; передача данных будет осуществляться по линиям радиосвязи в диапазоне МКВ с записью на магнитную пленку.



ной базой (РИСДБ), успешно применяется с 60-х годов (см. статью: Э. Ридхед. Радиointерферометры со сверхдлинными базами в астрономии. «В мире науки», 1983, № 2, с. 51—61).

Каждые несколько месяцев радионаблюдения всего мира (в основном в США и Европе, но иногда включая и антенны, расположенные в Австралии, Бразилии, Канаде, Китае, Индии, Японии, ЮАР и Советском Союзе) координируют свои графики наблюдения выбранных небесных тел. Магнитные записи сигналов каждой из антенн затем воспроизводятся в одном из трех центров обработки: Институте радиоастрономии им. Макса Планка в Бонне, Национальной радиоастрономической обсерватории в Шарлотвилле (шт. Виргиния, США) или Калифорнийском технологическом институте (США). В этом РИСДБ использовалось до 18 антенн, что обеспечило получение отличных изображений квазаров, активных ядер галактик, космических мазеров и других компактных источников радиоизлучений.

## Описание РИСДБ

Такой специализированный РИСДБ тем не менее оставляет желать много лучшего. Организовать длительные координированные наблюдения оказывается не так легко, а отдельные антенны расположены в местах, где невозможно получить изображения высокого качества. Более того, антенны неодинаковы по точности и чувствительности. Для наилучшего использования данного метода наблюдений Национальная радиоастрономическая обсерватория начала в 1985 г. строить РИСДБ в виде сети из 10 антенн; эта работа финансируется Национальным научным фондом США. Каждая из антенн будет иметь диаметр 25 м и работать в миллиметровом диапазоне на волнах длиной 3,5 мм. Антенны будут размещены на всей территории США в местах, выбранных так, чтобы распределение базовых линий обеспечило высокое качество изображения. При этом учитывалось также, чтобы в местах расположения антенн отсутствовали сильные промышленные радиопомехи от искусственных источников, чтобы влияние атмосферных водяных паров было минимальным и в то же время, чтобы основные транспортные центры и станции местного технического обслуживания находились неподалеку. Пять антенн разместят в горной местности с относительно сухим климатом, в безоблачных юго-западных штатах.

Каждая антенна будет управляться собственной ЭВМ, которая будет принимать команды по телефонным линиям из Центра управления, расположенного в Сокорро (шт. Нью-Мексико). Управление интерферометром будет осуществляться центральной ЭВМ по специальной программе, в задачу которой входит контроль за работой антенн и приемников, а также за погодными условиями в каждом пункте. Оператор, управляющий решеткой, сможет оперативно вмешиваться в процесс наблюдения в случае неожиданных космических явлений, как, например, при обнаружении сверхновой. Вмешательство оператора также не исключается и в случае возникновения технических неполадок или ухудшения атмосферных условий. При проведении специальных экспериментов, требующих получения изображения еще более высокого качества, предусматривается возможность использования до 10 других радиотелескопов, размещенных в различных точках земного шара.

Первая из антенн этой системы, расположенная в Пай-Тауне (шт. Нью-Мексико), в настоящее время вводится в эксплуатацию. Целиком система должна войти в строй в 1992 г. К середине 90-х годов астрономы надеются осуществить запуск в космос первой антенны, предназначенной для радиointерференционных исследований. К этому времени данные наземных наблюдений с помощью РИСДБ можно будет использовать совместно с данными, получаемыми из космоса. Это будет не только крупным достижением в области повышения разрешающей способности астрономических наблюдений, но и первым шагом на пути к созданию мощных интерферометров космического базирования.

## Часы и устройства записи

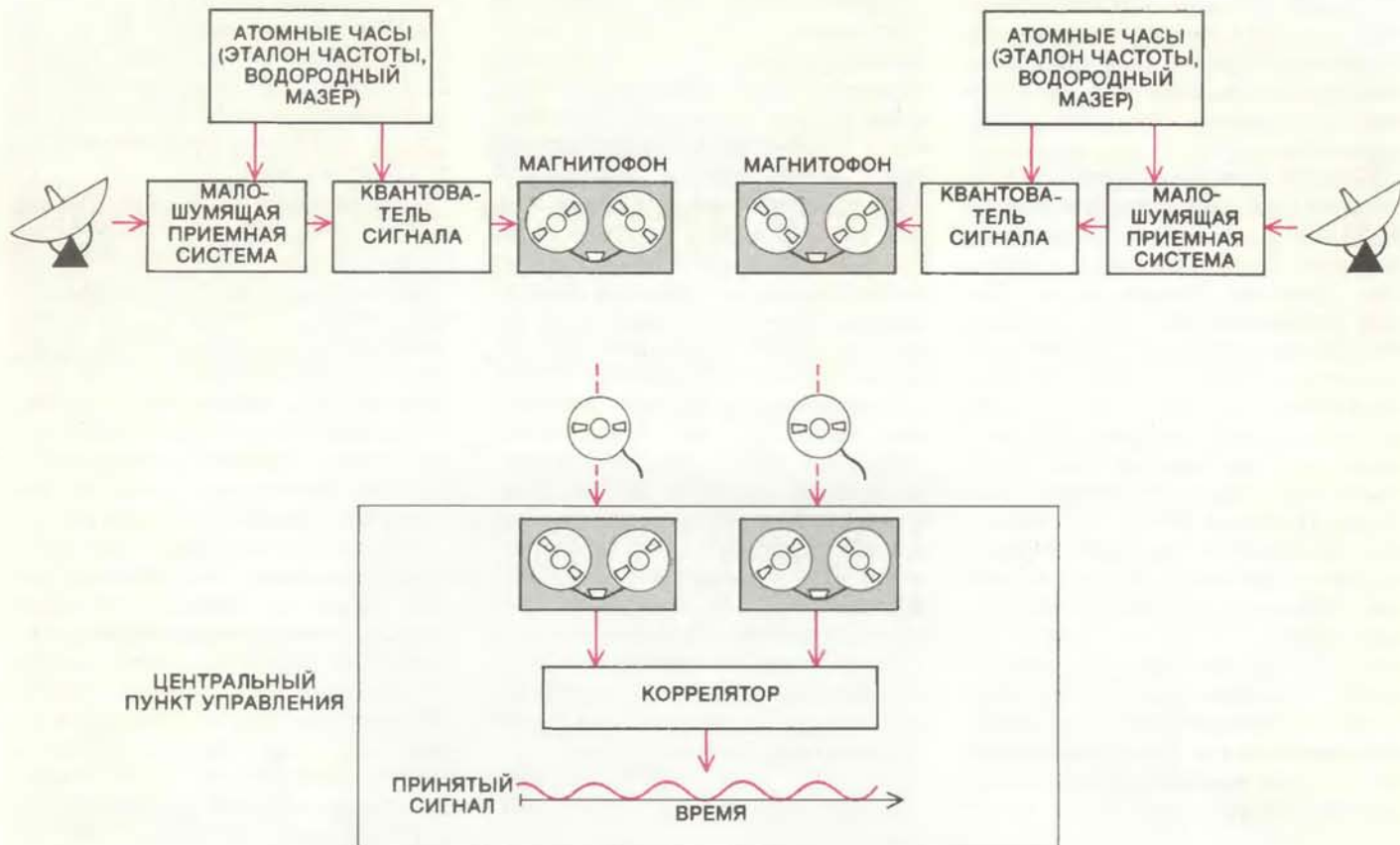
Пятьдесят лет технического прогресса, ознаменовавшихся многими достижениями — от водородных мазерных часов до бытовых кассетных видеомагнитофонов, — сделали возможным создание РИСДБ. Часы сверхвысокой точности необходимы для синхронизации данных, получаемых с различных антенн; запись на магнитную ленту позволяет хранить огромные объемы информации. Радиоприемники, подключаемые к каждой антенне, обладают самой высокой чувствительностью. Большинство из них имеют транзисторные предусилители, охлаждаемые до 15 К, чтобы свести к минимуму шумы внутри аппаратуры. Каждая антенна способна работать в девяти отдель-

ных диапазонах частот в интервале от 330 МГц (длина волны 90 см) до 43 ГГц (длина волны 7 мм); в будущем предполагается расширение этого интервала до 86 ГГц (длина волны 3,5 мм), что близко к рабочему пределу таких антенн.

Для нормальной работы РИСДБ необходимо, чтобы каждая антенна была оснащена точными часами. Они нужны для синхронизации принимаемых данных. Кроме того, поскольку принимаемые сигналы в процессе обработки преобразуются в более низкочастотные, необходимо наличие сверхстабильного эталона частоты, с тем чтобы сохранить фазовые соотношения получаемых на выходе сигналов. В создаваемом РИСДБ обе эти функции будут выполнять часы на водородном мазере, которые отсчитывают время по характеристической частоте атома водорода (мазер — это квантовый генератор, аналог лазера, но работающий в диапазоне МКВ). Частота таких часов стабильна, в течение одного часа она отклоняется на величину не более  $10^{-15}$ . Это означает, что на наивысшей рабочей частоте 43 ГГц сигналы от отдельных антенн РИСДБ могут быть синхронизированы с большой точностью в интервалах времени примерно в полчаса без заметного расхождения по фазам. Это позволяет сжимать получасовые отрезки данных путем их усреднения и тем самым резко снизить объем вычислений, необходимых для получения изображения.

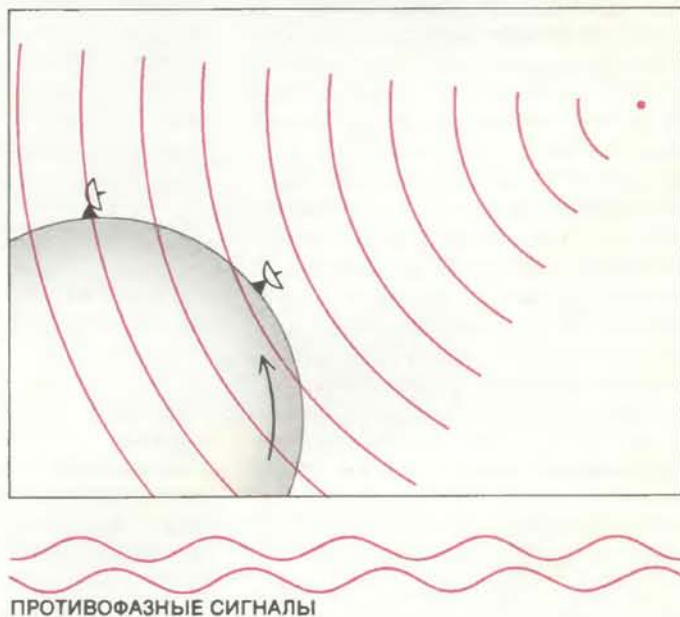
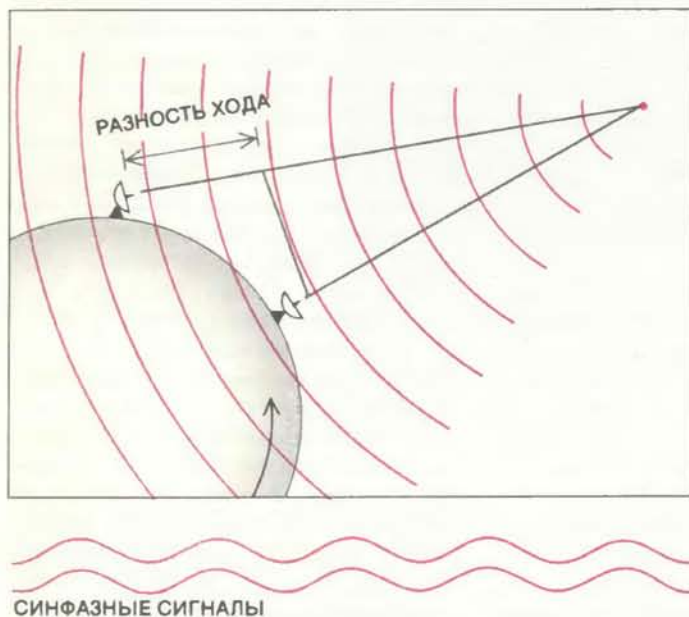
Сигналы в системе РИСДБ записываются на магнитную ленту в цифровом виде. Согласование во времени отдельных выборок контролируется мазерными часами, что исключает зависимость синхронизации от механических факторов, таких как стабильность скорости протягивания ленты. Когда в начале 60-х годов вошла в строй первая система РИСДБ, в ней использовались обычные магнитные ленты для ЭВМ, так что скорость записи данных была ограничена несколькими сотнями килобит в секунду. В настоящее время для этих целей используются модифицированные бытовые кассетные видеомагнитофоны, запись на которых производится со скоростью 4 Мбит/с. Эта новая система, получившая название «Марк II», обеспечивает 4 ч непрерывной записи сигнала с шириной полосы частот 2 МГц на одну кассету. Такими системами записи оснащены более 25 радиотелескопов во всем мире. Более новая система «Марк III» разработана на средства НАСА в обсерватории «Хайстек» Массачусетского технологического института. В ней применяется устройство записи с приводом, обеспечивающим скорость





РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТР СО СВЕРХДЛИННОЙ БАЗОЙ (РИСДБ) состоит из нескольких разнесенных на большие расстояния антенн и служит для наблюдения космических источников радиоизлучений. Атомные часы (водородный мазер) у каждой антенны обеспечивают синхронизацию наблюдений и служат эталоном частоты, что позволяет со-

хранить фазу сигналов при их записи на магнитную ленту. Записи поступают в центр управления; информация с них переносится в коррелятор, который производит сложение сигналов. По полученной интерференционной картине с помощью преобразований Фурье строят изображение объекта.



ВРАЩЕНИЕ ЗЕМЛИ приводит к тому, что сигналы от двух антенн радиоинтерферометра оказываются то в фазе, то в противофазе. Угол поворота, необходимый для изменения фазовых соотношений сигналов, зависит как от длины волны наблюдаемого радиоисточника, так и от расстоя-

ния между антеннами: чем короче длина волны и чем дальше разнесены антенны, тем меньше требуемый угол поворота. В свою очередь этот угол определяет разрешение системы из двух антенн.



записи до 224 Мбит/с в полосе частот 112 МГц; при такой скорости записи расход ленты составляет 10 000 футов (более 3 км) за 6 мин.

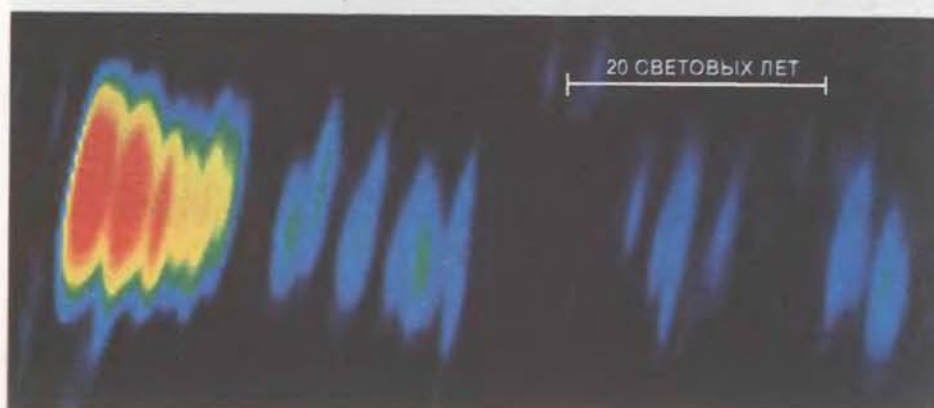
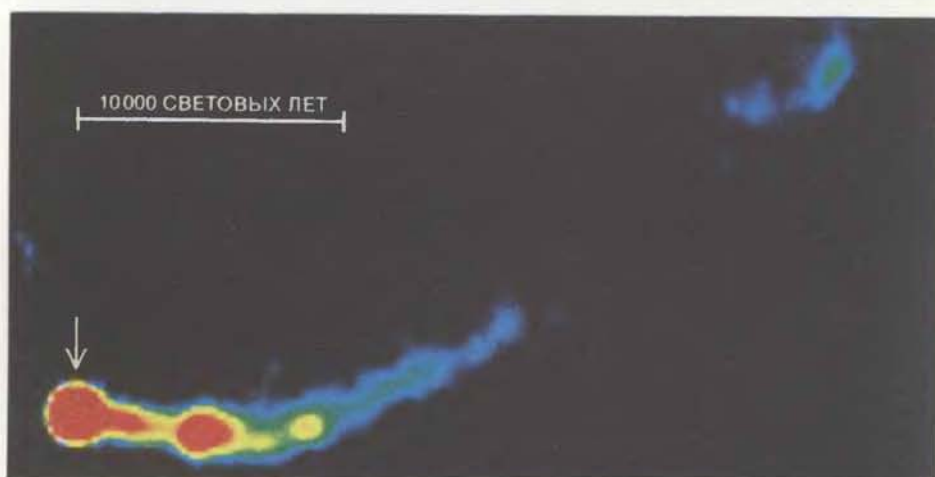
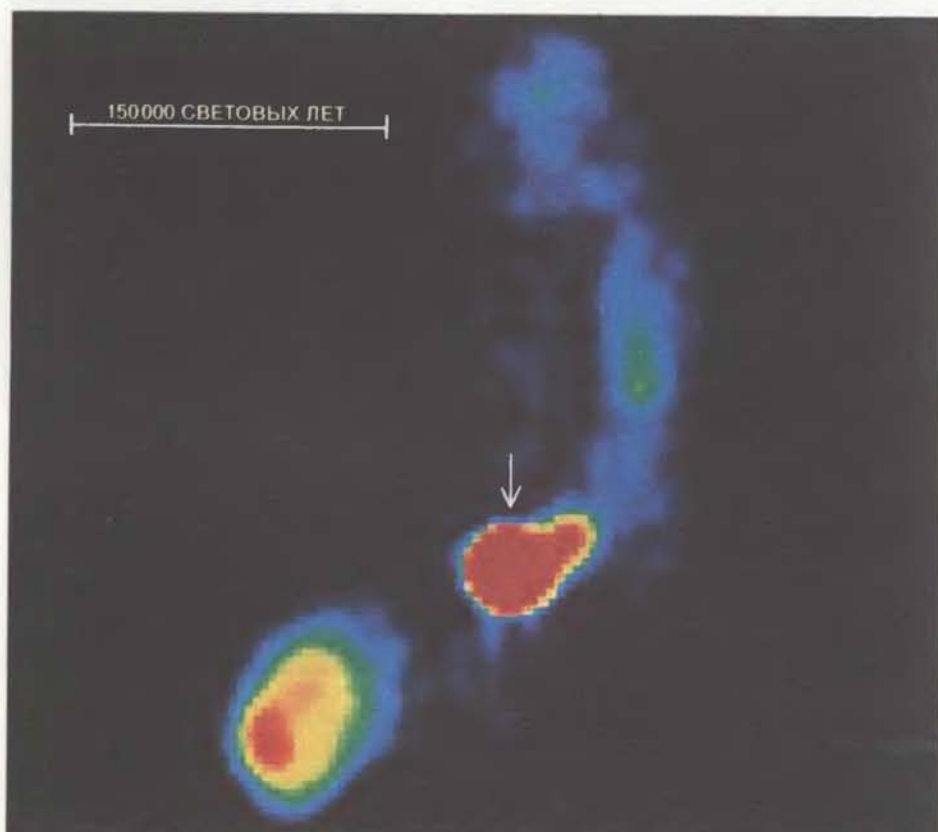
Для обеспечения требуемой чувствительности к слабому излучению небесных источников радиоизлучения ширина полосы частот РИСДБ должна быть не менее 100 МГц. При этом расход ленты не должен быть чрезмерным. Обсерватория «Хай-стек» разработала новую записывающую систему для РИСДБ с 512 дорожками и скоростью записи 256 Мбит/с, но потребляющую меньше ленты, чем «Марк III». На одну катушку с лентой шириной 16 дюймов (40,64 мм) и длиной 8 км можно вести запись в течение более 12 ч и записать порядка 7 триллионов бит данных (примерно такой объем информации содержится во всех номерах ежедневной газеты за 1000 лет издания).

Каждый день данные, получаемые с одной антенны, будут записываться на две такие катушки, на самолетах катушки доставят в центр управления, где их прокрутят и записанные на них данные «сочленят» с данными с других антенн. Предусмотрена возможность одновременного воспроизведения записей с 20 катушек, так что данные с других радиотелескопов, не входящих в систему РИСДБ, также могут использоваться для повышения чувствительности и улучшения разрешающей способности системы. Но даже при множестве базовых линий в общей совокупности данных могут содержаться пробелы, обусловленные наличием боковых лепестков у диаграммы направленности антенны, которые привнесут искажения в формируемые компьютером изображения. Однако это явление хорошо известно, оно может быть учтено в ал-

горитме, и его негативное влияние на точность получаемого изображения можно свести на нет. Причиной более серьезных ошибок могут оказаться непредсказуемые явления в земной атмосфере, но имеются алгоритмы для учета и таких явлений.

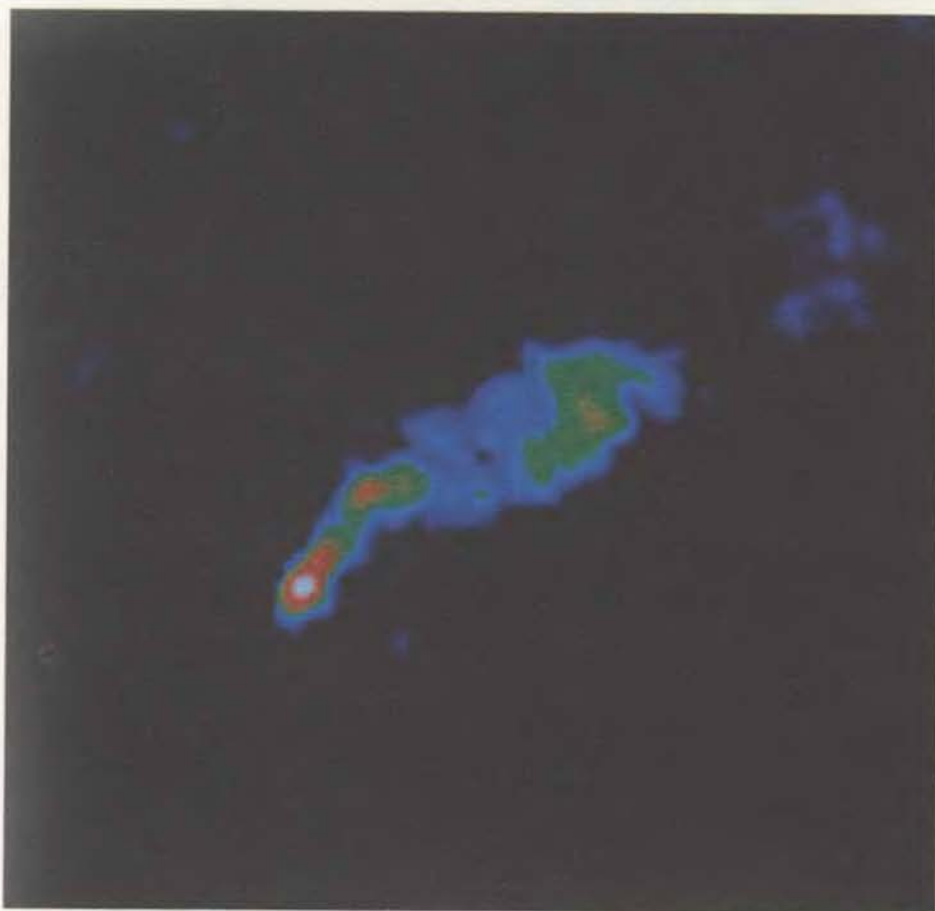
## Струи и эволюция звезд

РИСДБ позволит получать высококачественные радиоизображения с разрешением несколько десятитысячных секунды дуги, что эквивалентно углу, под которым горошина в Сан-

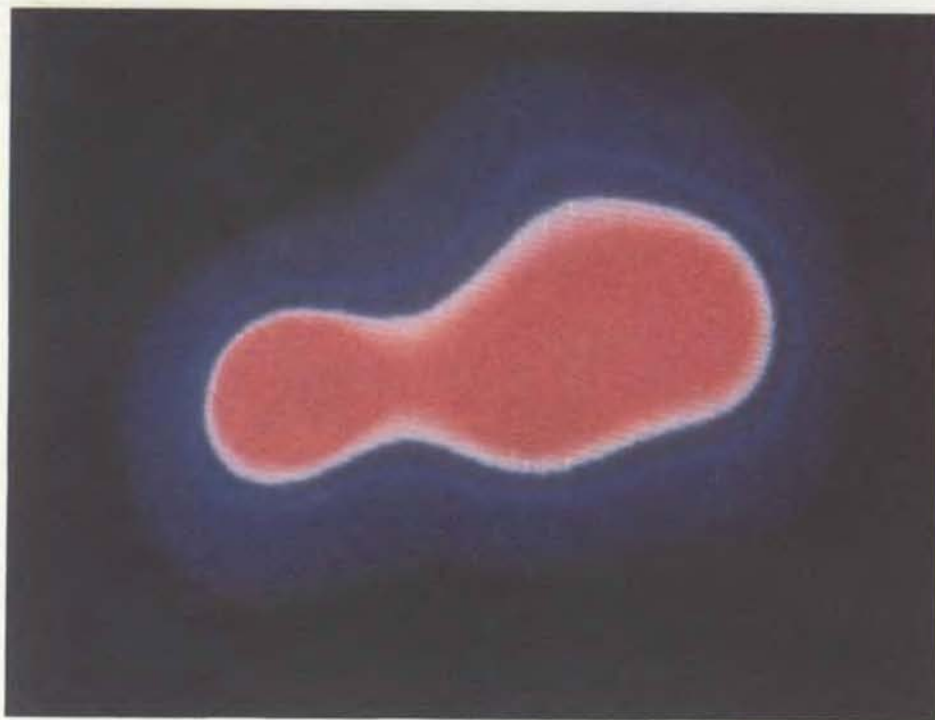


РАДИОГАЛАКТИКА 3С 120 удалена от Земли на 500 млн. световых лет; по мере улучшения разрешающей способности на изображении галактики можно различить все более мелкие детали. Верхнее изображение получено с помощью системы VLA (США) на частоте 1667 МГц при разрешающей способности  $9''$ . Изображение в середине получено на частоте 15 ГГц при максимальном удалении антенн на расстояние 21 км; разрешающая способность системы в этом случае равна  $0,15''$ . Здесь видна узкая струя, исходящая из активного ядра. Нижнее изображение получено с помощью радиоинтерферометра из 11 антенн на частоте 5 ГГц, имеющего разрешающую способность  $0,001''$ ; эти наблюдения позволили обнаружить «сверхсветовое» движение сгустков плазмы в струе, кажущаяся скорость которого оказалась примерно в 7 раз больше скорости света.





**МОЩНЫЙ ИСТОЧНИК РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ**, обнаруженный с помощью РИСДБ в квазаре 3C 380, виден на снимке как яркая точка диаметром менее 10 световых лет. Считается, что источником столь мощного излучения может быть только черная дыра. В деталях этот процесс можно будет изучить с помощью создаваемого РИСДБ.



**МОЩНАЯ ВСПЫШКА РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ** в двойной звезде UX Овна была зарегистрирована в июле 1983 г. Изображение, полученное с помощью 6-антенного радиointерферометра на частоте 5 ГГц, едва позволяет различить две компоненты двойной звезды. Считается, что радиоизлучение испускается релятивистскими электронами, ускоренными магнитным полем звезды. С помощью РИСДБ можно будет подробно изучить это явление, проследив орбитальный цикл двойной звезды.

Франциско видна из Нью-Йорка. В астрономических масштабах это соответствует способности обнаруживать объекты диаметром 100 млн. миль (160 млн. км) в любой точке нашей Галактики или объекты диаметром несколько световых лет в самых удаленных местах космического пространства. Среди первоочередных объектов наблюдения будут ядра галактик и квазаров — наиболее мощные из известных во Вселенной радиоисточников.

Специализированные сети радиointерферометров со сверхдлинной базой уже позволили радиоастрономам «заглянуть» во внутренние области квазаров и активных ядер галактик, испускающих узкие струи плазмы. Эти высокоэнергетические явления относятся к наиболее загадочным в современной астрономии. Сгустки плазмы выбрасываются со скоростями, близкими к скорости света, и создают ряд замечательных релятивистских эффектов. Во-первых, излучение оказывается сфокусированным в узкий луч вдоль направления движения. Если объект движется в сторону наблюдателя по направлению, близкому к лучу зрения, то относительно слабое ядро галактики может показаться не менее ярким, чем квазар. Астрономы спорят, не объясняется ли повышенная яркость квазаров именно этим эффектом.

Еще более замечательным следствием релятивистского движения является иллюзия, будто сгустки плазмы движутся со скоростью, превышающей скорость света. Она возникает вследствие движения объекта в направлении к наблюдателю со столь большой скоростью, что он почти догоняет собственное излучение, и если движение продолжается сотни лет, то излучение, испускаемое с интервалами в сотни лет, достигнет наблюдателя с промежутками всего в несколько лет. При наблюдении с Земли длина пути может показаться укороченной до нескольких десятков световых лет, что создает иллюзию, будто объект за несколько лет пролетел расстояние, равное нескольким десяткам световых лет. Это явление получило название «сверхсветового» движения и часто наблюдается при выбросе сгустка плазмы из ядра квазара. Представляется, что такие выбросы происходят каждые несколько лет, и существует мнение, что это явление порождается массивной черной дырой. Высокая разрешающая способность РИСДБ позволит астрономам тщательнее исследовать процесс образования струй.

В более близком космосе астрономы изучают объекты нашей Галактики, пытаясь понять жизненный цикл



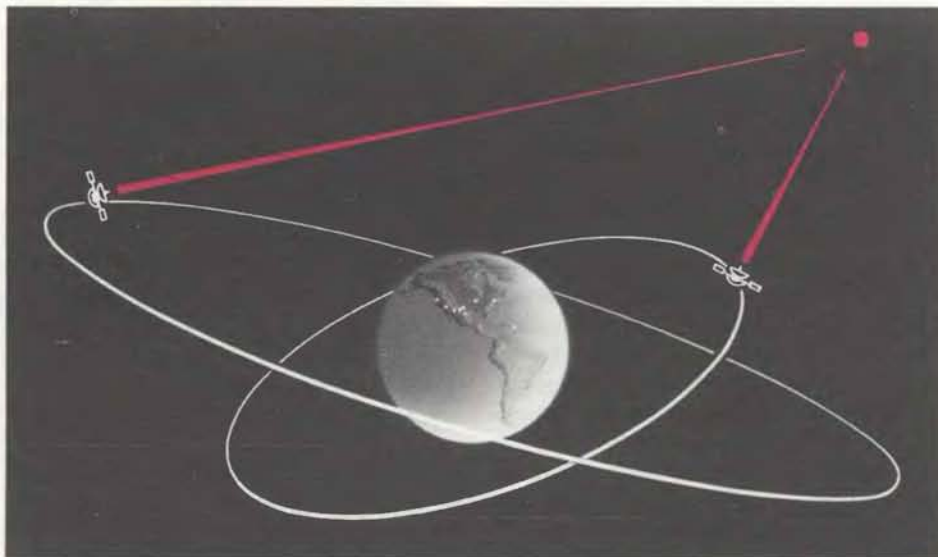
звезд: как они рождаются и как умирают. И здесь РИСДБ может оказать немалую помощь исследователям в понимании явлений, связанных со звездной активностью, что невозможно сделать с помощью обычных радиотелескопов. Особенно большой интерес представляет интенсивное микроволновое излучение космических мазеров на основе гидроксила (ОН) и водяного пара, обнаруженных в газовых оболочках очень молодых звезд, а также в пылевых облаках вокруг стареющих красных гигантов.

Эти космические квантовые генераторы, которые относятся к самым ярким небесным источникам микроволнового диапазона, испускают излучение, когда молекулы гидроксила или воды в облаках совершают стимулированный переход с более высокого энергетического уровня на более низкий. Разность энергий между этими уровнями излучается в виде интенсивного узкополосного сигнала на длине характеристической волны, примерно равной 18 см для гидроксила и 1,3 см для воды. Мазерные источники часто содержат множество отдельных ярких точек, скорости которых могут быть измерены по доплеровскому сдвигу частоты их излучения. Можно надеяться, что полученная с помощью РИСДБ картина движения мазеров позволит понять многие аспекты динамики турбулентных облаков, в частности вращаются они или разлетаются в разные стороны в результате космического взрыва.

Мазер на гидроксиле может также служить в качестве чувствительного индикатора магнитных полей в мазерном облаке. Магнитные поля вызывают небольшие изменения энергетических уровней гидроксила, так что излучение в присутствии магнитного поля будет расщеплено на пары спектральных линий со слегка различными частотами (это явление носит название эффекта Зеемана—Франка). Наблюдение такого расщепления с помощью прибора с высокой разрешающей способностью может раскрыть картину пространственного распределения магнитных полей в мазерном облаке и тем самым установить роль магнитных полей в коллапсе облаков и в образовании прото звезд.

### Измерение космических расстояний

РИСДБ позволит к тому же производить наиболее точные измерения космических расстояний, что является задачей фундаментальной важности в астрономии. Точное знание шка-



РАДИОТЕЛЕСКОПЫ, выведенные на орбиту, будут иметь значительно более длинные базовые линии по сравнению с наземными системами. США и западноевропейские страны планируют в 90-х годах запустить спутник «Квизат» на орбиту с апогейным расстоянием, равным трем земным диаметрам. Советский Союз предполагает запуск спутника «Радиоастрон» на еще более высокую орбиту.

лы расстояний во Вселенной необходимо для оценки ее общей массы и энергии, понимания ее эволюции в прошлом и будущем; в настоящее время эта шкала известна с неопределенностью в два раза. Приборы с высокой разрешающей способностью открывают возможность непосредственного измерения расстояний. Например, в случае остатка сверхновой, предположительно расширяющегося равномерно во все стороны, скорость расширения может быть измерена по доплеровскому сдвигу частоты излучения. Сравнение измеренной скорости с наблюдаемыми изменениями диаметра позволяет оценить удаленность объекта. Такая методика была недавно использована международной группой радиоастрономов для определения расстояния до сверхновой, вспыхнувшей в скоплении галактик в Деве в 1979 г. Наблюдения с помощью РИСДБ выявили, что скорость углового расширения оболочки этой сверхновой составляет примерно  $0,003''$  в год. Спектры в видимой и ультрафиолетовой областях показали, что оболочка сверхновой расширяется со скоростью 11 000 км/с, что соответствует  $0,003''$  в год. На сегодняшний день точность этого метода составляет приблизительно 35%; ожидается, что с помощью создаваемого РИСДБ аналогичные измерения можно будет производить со значительно более высокой точностью.

Метод радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой позволил также провести высокоточные измерения релятивистского искривления траекторий распространения радиоволн

гравитационным полем Солнца. Первоначально предложенный в качестве проверки правильности общей теории относительности, этот эффект был экспериментально подтвержден в 1919 г. при наблюдении звезд во время полного солнечного затмения, когда они казались отклоненными от своих положений под воздействием гравитационного поля Солнца. Оптические наблюдения, однако, имеют тот недостаток, что их приходится проводить в отдаленных уголках Земли в те считанные минуты, пока длится солнечное затмение. Что же касается радиоволн, то их можно принимать в любое время. Релятивистское искривление траекторий распространения волн измерено почти по всему небу исследователями Национального геодезического центра США с помощью радиоинтерферометров со сверхдлинной базой «Полярис» и «Ирис». Тысячи наблюдений, проведенных в течение ряда лет, подтвердили правильность теоретических предсказаний с точностью до десятых долей процента.

### Измерения Земли

Хотя РИСДБ был задуман как инструмент для астрономических наблюдений, он будет использоваться и при изучении различных земных явлений, таких как движение литосферных плит, вращение Земли и искривление земной поверхности под действием приливных сил. Подобные геофизические приложения возмож-



ны благодаря тому, что показания радиоинтерферометра зависят не только от наблюдаемого источника излучения, но и от вращения Земли, а также от длины и ориентации базовой линии, соединяющей две антенны. Метод основан на многократных наблюдениях опорных источников излучения (таких как квазары) настолько удаленных, что их можно считать неподвижными точками на небесном своде. Изменения формы или скорости вращения Земли влияют на результаты измерений, которые могут не совпадать в различных сеансах наблюдения (см. статью: У. Картер, Д. Робертсон. Исследование Земли с помощью интерферометрии со сверхдлинной базой. «В мире науки», 1987, № 1, с. 16—25).

Геофизический радиоинтерферометр со сверхдлинной базой позволяет определить расстояние между двумя антеннами на большое расстояние с погрешностью, не превышающей длину волны, на которой проводятся наблюдения. С его помощью, следовательно, можно определять изменения размеров Земли, менее чем на 1 см. Интерферометр «Ариес» Лаборатории реактивного движения (США) осуществляет обширные измерения с целью выявления землетрясений с малыми подвижками через линии разломов. Неудивительно, что страны, подверженные землетрясениям, такие как Китай, Италия и Япония, проявили большой интерес к геофизическим радиоинтерферометрам и уже построили радиотелескопы, предназначенные для измерения линий разломов земной поверхности. Поскольку в РИСДБ колебания интерференционных полос вызываются вращением Земли, геофизические наблюдения могут использоваться для измерения скорости вращения Земли в единицах времени, задаваемых мазерными часами. Длительность суток была измерена по такой методике с точностью до десятой доли миллисекунды, а положение оси вращения на поверхности Земли было определено с точностью до нескольких десятков сантиметров.

Для проведения геофизических измерений необходимо исключить земные эффекты из астрономических данных. Это представляет собой довольно трудную задачу, осложненную еще и флуктуациями сигналов космических источников радиоизлучения, непредсказуемым влиянием атмосферы и ионосферы Земли на радиосигналы, медленным дрейфом атомных часов на различных станциях и даже релятивистским искривлением радиолучей под воздействием Солнца. Для уточнения важнейших геофизических и геодезических пара-

метров радиотелескопы во всем мире объединились под эгидой НАСА в проекте «Динамика коры» и в упомянутых ранее системах «Поларис» и «Ирис». С созданием РИСДБ появится возможность получать точные изображения космических источников радиоизлучения, используемых в геодезии в качестве точек отсчета. В то же время РИСДБ обеспечит регулярные наблюдения, которые дополнят и расширят уже существующие сети геодезических радиоинтерферометров со сверхдлинной базой.

### *РИСДБ в космосе*

Еще одним применением РИСДБ будет межпланетная навигация. Свои способности в этом отношении сети РИСДБ продемонстрировали с впечатляющим успехом во время недавней советской программы «Вега», цель которой заключалась в посылке космического аппарата к Венере и комете Галлея. В соответствии с этой программой, явившейся крупнейшим из когда-либо осуществляемых международных проектов, сеть из 20 антенн в различных точках земного шара следила за двумя космическими аппаратами. Оба они достигли Венеры в июне 1985 г., сбросив в ее атмосферу спускаемый на аэропарашюте аппарат с передатчиком, работающим на частоте 1,7 ГГц. Сеть РИСДБ сопровождала эти аппараты, гонимые венерианскими ветрами, скорость которых, как показали измерения, достигает 225 км/ч.

Пролетев Венеру, аппараты продолжали движение к месту встречи с кометой Галлея, которая произошла 6 и 9 марта 1986 г., на неделю раньше запланированной встречи кометы с космическим аппаратом «Джотто» Европейского космического агентства. Ученые этого агентства рассчитывали направить «Джотто» на освещаемую Солнцем сторону кометы с тем, чтобы сделать фотоснимки, но поскольку у них не было точных данных о местоположении кометы, их фотокамеры могли оказаться направленными на теневую сторону. Оптические изображения кометы, полученные аппаратами «Вега», совместно с данными о положении «Джотто», предоставляемыми сетью РИСДБ, позволили европейским ученым в последний момент скорректировать траекторию космического аппарата и подвести его на расстояние несколько сот миль от освещенного Солнцем ледяного ядра кометы. Фотокамеры на борту аппарата «Джотто» получили возможность сделать впечатляющие снимки кометы Галлея 14 марта, во время максимального сближения ап-

парата с кометой до момента прекращения связи с аппаратом после его соударения с осколками кометы.

В любом случае, даже когда РИСДБ используется совместно с другими рассредоточенными по земному шару радиотелескопами, его разрешающая способность в конечном итоге будет ограничена размерами Земли. Дальнейшее повышение разрешающей способности системы связано с вынесением базовых линий в космическое пространство, вероятно, на Луну или даже на другие планеты. Построение РИСДБ с базиремыми в космосе антеннами сопряжено с немалыми техническими трудностями, связанными с разработкой крупногабаритных антенн повышенной точности и высокочувствительных приемников, предназначенных для работы в суровых космических условиях, где невозможно обеспечить их обслуживание человеком. Возможность построения таких космических систем уже была доказана группой ученых США, Австралии и Японии, использовавших небольшую антенну на борту спутника в качестве одного из элементов РИСДБ со смешанным наземным и космическим базированием\*.

Планы создания специализированных РИСДБ с привлечением системы спутников уже сейчас обсуждаются в США, Западной Европе, Японии и Советском Союзе. Выдвинуто предложение о совместном проекте НАСА и Европейского космического агентства по выводу спутника «Квизат» с антеннами диаметром 10—15 м на околоземную орбиту к середине следующего десятилетия. Советский Союз также объявил о программе создания космического РИСДБ, предполагающей вывод двух или трех спутников «Радиоастрон» на орбиту с апогеем до 75 000 км. Европейские и американские ученые приглашены участвовать в этих исследованиях, однако стремление правительства США ограничить обмен с СССР технологическими достижениями в области освоения космического пространства может снизить степень участия американских ученых.

В более отдаленном будущем советские ученые намерены вывести на солнечную орбиту гигантские антенны с поперечными размерами в несколько километров. Такая решетка могла бы иметь базовые линии длиной несколько сот миллионов километров, а разрешающая способность

\* Проект интерферометра типа «земля—космос» впервые был представлен советскими учеными во время двусторонней встречи с французскими учеными в Медоне в 1986 г. — *Прим. ред.*



системы достигла бы миллионной доли секунды дуги. Столь мощный радиотелескоп открывает новые возможности для астрономии и теоретически позволит наблюдать «солнечные пятна» на других звездах нашей Галактики и рассмотреть характерные особенности соседних галактик с

размерами, сравнимыми с предполагаемыми размерами черных дыр. Как ни заманчивы эти прогнозы, создание и эффективное использование такой антенной решетки может стать реальным только по мере накопления опыта работы с наземными РИСДБ и антеннами на околоземной орбите.

особенности строения моллюска показали, что он достиг половой зрелости (после этого наutilus перестает наращивать камеры). С помощью масс-спектрометра, установленного на ускорителе, исследователи определили, что стенки первых 15 камер содержат углерод-14 лишь в фоновых концентрациях. В более молодых камерах концентрация изотопа последовательно увеличивалась. Сравнив эти данные с данными по кораллам, исследователи заключили, что наutilus вырастил в 1957 г. семь камер, а в течение следующего года добавил к своему жилищу еще восемь. В следующем десятилетии камеры образовывались не так быстро: последняя полностью закрытая камера выросла за семь месяцев (ее постройка была закончена в 1968 г. — за год до того, как наutilus был пойман).

Палеонтологи очень заинтересованы в том, чтобы больше узнать о неуловимом наутилусе — последнем виде когда-то большого класса животных, так называемых головоногих с наружной раковиной. В мезозойскую эру (200 — 65 млн. лет назад) океан буквально кишел этими созданиями, снабженными щупальцами и похожими на современных головоногих — осьминогов или каракатиц, но заключенными в раковины, которые защищали животное и служили своего рода балластными цистернами.

## Наука и общество

### Моллюск и бомба

**В** СТИХОТВОРЕНИИ «Жилище наутилуса» Оливер Уэнделл Холмс писал:

Год за годом, тихо трудясь,  
Разворачивает он роскошную спираль  
своей раковины;  
И каждый год, по мере раскручивания  
спирали,  
Он перебирается из старого жилища  
в новое.

Таким виделось поэту развитие наутилуса — необычного моллюска, раковина которого разделена на камеры-поплавки (сам моллюск помещается в последней внешней камере). Однако сколько времени на деле требуется наутилусу, чтобы вырастить новую камеру, до недавнего времени оставалось неизвестным. Этот моллюск ускользает от наблюдения: место его обитания ограничено тропическими водами западной части Тихого океана, а плавает он обычно на глубинах от сотни до нескольких сотен метров, так что поймать его непросто. Но даже будучи пойманным, он редко живет больше года, и в этом еще одна трудность наблюдения за его развитием. Сейчас исследователи узнали кое-что о жизни наутилусов, по крайней мере одного их представителя, в организме которого был обнаружен углерод-14, образовавшийся в результате ядерных взрывов в атмосфере. Измерив концентрацию этого изотопа в раковине моллюска, ученые пришли к выводу, что период «возмужания» у наутилуса составил 12 лет. По мере взросления наутилуса его рост замедлялся и камеры в раковине образовывались все реже, но все-таки быстрее, чем одна камера в год, как представлял себе Холмс.

Н. Ландман из Американского музея естественной истории, Э. Драффел из Океанографического института в Вудс-Холе, Дж. Кочран из Университета шт. Нью-Йорк в Стони-Бруке и А. Джалл из Аризонского университета начали свое исследование с того, что попытались определить, в какой степени ядерные испытания в атмосфере, проводившиеся в 1950-х и 1960-х годах, могли загрязнить среду обитания наутилуса. По-

сле того, как в 1963 г. СССР и США прекратили ядерные испытания в атмосфере, продукты ядерных взрывов продолжали попадать в океан. Изучив кораллы, растущие на Большом барьерном рифе у Австралии, ученые определили изменения во времени степени загрязнения в южной части Тихого океана. Выяснилось, что с 1958 г. концентрация углерода-14 в последовательно нарастающих слоях кораллов резко повышалась относительно естественного фонового уровня и достигла максимума в слоях, образовавшихся в середине 1970-х годов.

После того как была построена эта «шкала времени», ученые измерили концентрации углерода-14 в различных камерах наутилуса, который в 1969 г. был пойман вблизи Новой Каледонии, в 1200 км к востоку от Австралии, и вскоре умер. Раковина содержала в общей сложности 31 камеру;



СПИРАЛЬНАЯ РАКОВИНА наутилуса, разделенная на камеры (показана в разрезе). Результаты последних исследований позволяют предположить, что наутилусу требуется от 3 до 7 месяцев, чтобы построить новую камеру.



# Литоральные рыбы

Эти рыбы живут в очень изменчивых и суровых условиях:

то их захлестывают волны, то они остаются

в отрезанных от моря лужах.

Их строение, физиология и поведение обеспечивают приспособленность к столь необычной среде обитания

МАЙКЛ Х. ХОРН, РОБИН Н. ГИБСОН

**Ж**ИТЬ в приливно-отливной зоне, так называемой литорали — прибрежной полосе, заключенной между линиями прилива и отлива, — нелегко. Дважды в сутки, при малой воде, эта полоса оказывается отрезанной от открытого моря. Вода остается в замкнутых литоральных лужах да где-нибудь под скалами или, смешиваясь с грунтом, образует илистые отмели. Когда же с наступлением прилива море возвращается, литораль затапливается и воссоединяется со всей морской экосистемой. Всякий живущий в приливной полосе организм должен быть способен подолгу оставаться вне воды, полностью или по меньшей мере частично контактируя с воздухом. Время, когда возможно кормление, определяется приливным циклом. Кроме того, животное должно выдерживать сильные изменения химического состава воды, а также характерные для литорали бурные, беспорядочные течения и почти постоянный волнобой.

Прикрепленным и малоподвижным литоральным животным — таким, например, как морские желуди, морские блюдечки и литорины, — посвящено немало исследований, и прежде всего потому, что они многочисленны и легкодоступны. Изучать литоральных рыб труднее — отчасти из-за их подвижности, отчасти из-за того, что они обычно скрыты от наблюдения. Многих из них делает малозаметными покровительственная окраска, а многие во время отлива отсиживаются под скалами и камнями либо в скоплениях растительности (впрочем, некоторые — такие, как тропические илистые прыгуны, — могут жить на илистой отмели, никому не прячась).

Все же за минувшие 15—20 лет познания об этих рыбах расширились настолько, что сейчас сложилась довольно связанная картина их жизни в столь необычной среде. Наши и другие исследования показали, что литоральные рыбы на удивление хорошо

приспособлены к условиям своего существования; они отнюдь не просто морские животные, не поспевшие за отливом и застрявшие на литорали. Эволюционное развитие этих рыб привело к тому, что они стали составной частью литоральной экосистемы, где рыбы каждого вида занимают в прибрежной зоне определенные местообитания и соответственным образом распределены по вертикали.

**М**НОГИЕ литоральные рыбы имеют специфические черты строения, которые присущи придонным рыбам, населяющим мелкие быстротекущие воды. Наиболее заметная из этих черт — небольшие размеры. Длина тела у литоральных рыб редко превышает 30 см, а чаще всего не превосходит и 20 см. Небольшие размеры позволяют им забираться в выемки, расщелины и ниши под камнями и скалами, что снижает вероятность сноса волнами либо приливно-отливными течениями. Возможности обитания многих из этих рыб в ограниченном пространстве благоприятствует еще и такая особенность, как очень тонкое (у масляюковых, у рыб-обезьян и мечевидок) либо распластанное тело (у керчаковых и у рыб-присосок).

Помимо специализированной формы и размеров тела многие литоральные рыбы обладают еще и по-особому устроенными плавниками. Например, приспособленные к пребыванию вне воды илистые прыгуны, передвигаясь по суше, могут приподниматься на своих парных грудных плавниках. У некоторых литоральных рыб (у рыб-присосок, бычковых и липаровых) видоизмененные брюшные плавники образуют присоски, которые позволяют прочно прикрепляться к субстрату. У рыб, наиболее сильно видоизмененных в связи с приспособлением к обитанию в расщелинах и выемках (у некоторых масляюковых, рыб-обезьян и мечевидок), грудные и брюшные плавники сильно редуциро-

ваны, а спинной и анальный плавники длинные, низкие и зачастую соединены с хвостовым.

Кожа у литоральных рыб обычно толстая, прочная и оттого способная выдерживать постоянное трение о грунт. У некоторых из них (у морских собачек и рыб-присосок) нет чешуи, у других (у масляюковых, рыб-обезьян и мечевидок) чешуи сильно редуцированы, а у третьих (у бычковых) очень прочно прикреплены к телу. Многие из этих рыб обильно выделяют слизь, которая при движении в узких местах может послужить смазкой. Когда рыба оказывается на воздухе, слизь может еще и уменьшать потери воды.

Общая черта литоральных рыб — покровительственная окраска. Камбалообразные рыбы, обитающие на песчаных прибрежных мелководьях (например, морская камбала и калифорнийский паралихт), широко известны своей замечательной способностью менять расцветку под цвет и рисунок дна. У каменистых берегов, где цветовой фон бывает богаче, литоральные рыбы окрашены весьма разнообразно. Рыбы, живущие среди водорослей, чаще всего имеют необычную расцветку, соответствующую окружающей морской растительности. Например, окраска масляюков *Apodichthys flavidus* и *Xererpes fucorum* в зависимости от цвета водорослей, среди которых они живут, может варьировать от рыжевато-бурой до ярко-зеленой и густо-красной. Для этих рыб, которые изменяют окраску постепенно, источником пигментов служат, судя по всему, поедаемые ими беспозвоночные, населяющие те же заросли. Другие рыбы способны изменять окраску за считанные секунды, полностью сливаясь с фоном — прикрепленными беспозвоночными или испещренной прожилками и вкраплениями поверхностью камня.

Многие литоральные рыбы обладают отрицательной плавучестью



(они тяжелее морской воды), что позволяет им, не прилагая усилий, лежать на дне, где и течение самое слабое, и укрытие рядом. Плавательного пузыря (наполненного газом органа, имеющегося у большинства костистых рыб) у таких рыб либо нет вовсе, либо он сильно редуцирован. Сравнительно высоким удельным весом тела можно объяснить несколько затрудненное плавание литоральных рыб: они обычно совершают непродолжительные вылазки за пределы укрытия и короткие броски с места на место.

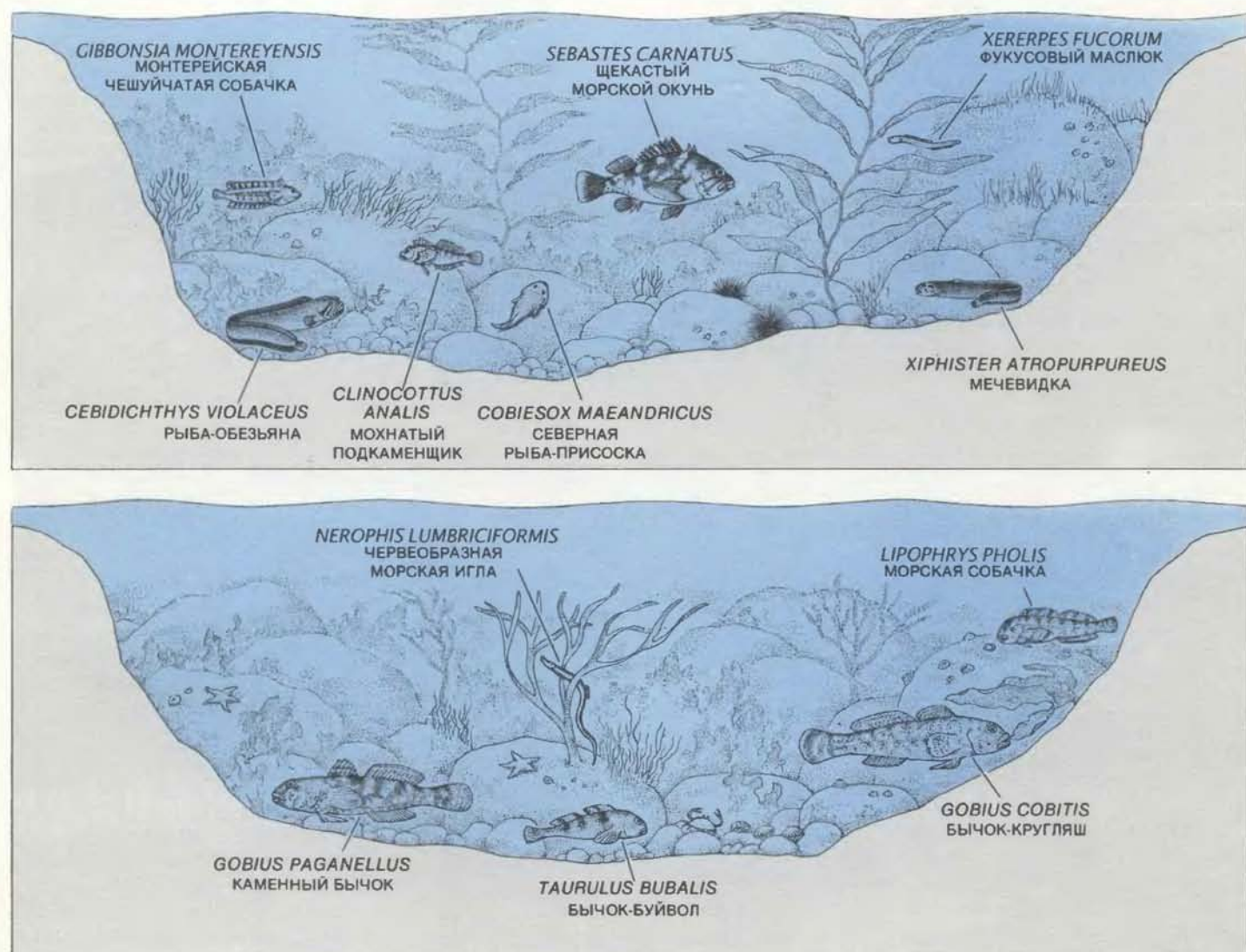
**В** ПРИЛИВНОЙ зоне происходят частые и резкие изменения условий существования: когда ее обитатели оказываются на воздухе, им угрожает иссушение; перепады температуры, солености и доступности кислорода таковы, что организмы других видов погибли бы. Чтобы выдер-

живать такие огромные перемены, рыбам, постоянно живущим в приливной полосе, надо обладать соответствующими физиологией и поведением. По своей устойчивости ко всем этим стрессовым факторам (в особенности к иссушению) литоральные рыбы не одинаковы. Различия между ними помогают установить вертикальное распределение рыб различных видов в береговой зоне.

В ряде исследований показано, что многие литоральные рыбы в состоянии переносить значительные потери воды. Например, У. Игер (будучи студентом Аризонского университета) установил, что некоторые рыбы-присоски, обитающие в Калифорнийском заливе, при высокой влажности воздуха (90%) могут оставаться вне воды живыми целых 93 ч, а в условиях низкой влажности (5%) способны выдерживать потерю до 60% содер-

жавшейся в теле воды. Это значение превышает смертельный порог водопотерь для большинства изученных к настоящему времени земноводных. (Собственно говоря, некоторые литоральные рыбы, а именно тропические илистые прыгуны, являются, по существу, земноводными: в отличие от многих других литоральных рыб они часто ведут активную жизнь вне воды и, случается, проводят 80—90% времени на суше.)

У некоторых рыб высыхание может замедляться благодаря таким особенностям строения, как утолщенный эпидермис и наличие в кожных покровах клеток, выделяющих слизь; других физиологических механизмов снижения или предотвращения потерь воды у литоральных рыб, по видимому, нет. Действительно, и живые, и мертвые рыбы, оставленные на воздухе, теряют в массе примерно



**ЛИТОРАЛЬНЫЕ РЫБЫ**, обычные на побережье Калифорнии (вверху) и на атлантическом побережье Франции (внизу), изображены в литоральных лужах во время прилива, когда они активны. При отливе уровень воды в лужах падает или они полностью высыхают и эти рыбы прячутся в водорослях и под камнями. В каждом участке приливно-отливной зоны, в каждом местообитании складывается

свой набор видов, но все литоральные рыбы обладают особенностями строения, помогающими им укрываться в тесных убежищах (щелях, ямках и т. п.) и выдерживать волновой. К числу таких особенностей относятся малые размеры, тонкое или плоское тело, а также брюшные плавники, уменьшенные в размерах либо видоизмененные таким образом, что ими можно прикрепляться к дну.



с одной и той же скоростью. Можно предполагать, что существенную роль в выживании литоральных рыб играет поведение, т. е. активное избегание условий, ведущих к иссушению. Большинство их, оказываясь при малой воде на суше, пребывает при этом в покое. Те же, что и вне воды сохраняют активность — как, например, илистые и скальные прыгуны (несмотря на название, эти две группы литоральных рыб не близко родственны друг другу), — спасают кожу и дыхательные поверхности от чрез-

мерного высыхания тем, что то и дело возвращаются в воду либо остаются в пределах заплеска.

**ИЗМЕНЕНИЯ** в доступности кислорода ставят перед литоральными рыбами проблему двоякого рода. Прежде всего, они должны как-то обеспечить себя кислородом даже тогда, когда оказываются на несколько часов вне воды. Проблема, конечно, не в наличии кислорода — его концентрация в воздухе намного выше, чем в насыщенной кислородом воде.

Трудность состоит в том, как атмосферный кислород поглотить. На воздухе жабры, как правило, слипаются и сникают; их тонкие, гибкие части приспособлены к функционированию под водой. У скальных и илистых прыгунов эта проблема решена благодаря укороченным, утолщенным жаберным лепесткам, которые предотвращают слипание жабр, тем самым позволяя им служить органами воздушного дыхания. У большей части рыб, способных к дыханию атмосферным воздухом, есть и другие специализи-



**КАМЕНИСТОЕ ПОБЕРЕЖЬЕ** с литоральными лужами и водной растительностью предоставляет рыбам разнообразные местообитания. Однако здесь им приходится приспосабливаться к сильным изменениям уровня воды и вол-

нобою, переносить физиологические стрессы при отливе и приливо-отливных течениях. (Снимок сделан А. Вертхейм в национальном парке Олимпик, шт. Вашингтон.)



рованные адаптации, например повышенное число кровеносных сосудов в коже и в тканевой выстилке рта и глотки.

У этих воздуходышащих рыб скорость дыхания на воздухе почти такая же, как и в воде. Более того, согласно данным К. Бриджеса из Дюссельдорфского университета о содержании молочной кислоты в крови и мышцах литоральных рыб, вне воды скорость анаэробного (т. е. происходящего без прямого участия кислорода) обмена у них не возрастает. Значит, когда такие рыбы вынуждены дышать воздухом, поступление кислорода в клетки тела существенно не снижается, и, следовательно, жизнедеятельность может продолжаться без сколько-нибудь значительных сдвигов в процессах обмена веществ.

Литоральные рыбы, живущие в замкнутых приливных лужах, расположенных намного выше уровня отлива, сталкиваются с «дыхательной проблемой» другого рода. Фотосинтез водной растительности, а также дыхание населяющих лужу животных и растений влекут за собою резкие суточные колебания концентраций растворенных в воде кислорода и углекислого газа. В дневное время количество образующегося путем фотосинтеза кислорода превосходит дыхательные потребности обитателей лужи, что приводит к высокому содержанию кислорода и низкому содержанию углекислого газа. Ночью же, когда фотосинтез прекращается, дыхание растений и животных истощает запасы кислорода и повышает содержание углекислого газа.

В течение дня скорость потребления кислорода у рыб, обитающих в литоральных лужах, судя по всему, не изменяется вслед за складывающимися условиями, но ночью у некоторых видов дыхание замедляется соответственно низкому содержанию кислорода в окружающей воде. Описаны случаи, когда при падении его концентрации до критически малых значений рыбы прополаскивали жабры водой из тончайшего подповерхностного слоя, где растворенного кислорода несколько больше. В лабораторных опытах рыбы иногда вылезают из крайне обедненной кислородом воды и карабкаются на выступающие предметы.

**РЫБЫ** приливо-отливной зоны отличаются не только необычными чертами строения и физиологии, но и особенными формами поведения. Например, процесс размножения у большинства литоральных рыб протекает следующим характерным образом. Сначала самец где-нибудь в укромном месте (под камнем либо в



ПОКРОВИТЕЛЬСТВЕННАЯ ОКРАСКА обычна для рыб, живущих в литоральных лужах; такая маскировка, по-видимому, помогает скрываться от хищников. Вверху — керчаковая рыба из рода *Clinocottus* на фоне губки в природном местообитании (снимок сделан А. Вертхайм). Эта рыба может изменять свою окраску под цвет окружающих предметов с помощью особых пигментных клеток. Внизу — маслюк *Xererpes fucorum* среди водорослей в аквариуме (фотография М. Хорна). У этого вида зеленая окраска обусловлена пигментами беспозвоночных, которых рыба поедает.



гуще растительности) выбирает нерестовый участок, который у многих видов лежит в пределах территории, охраняемой самцом до и после нереста. Затем он заманивает на этот участок одну или несколько самок, и каждая из них выметывает на субстрат по одной порции икры. Самец осеменяет икру, а потом, как правило, оберегает ее вплоть до выклева личинок.

Необходимость выбора и защиты потаенного нерестового участка налагает на брачное поведение самца целый ряд ограничений. Самец не может покинуть участка, чтобы отправиться на поиски партнерши, и ему приходится привлекать самок к себе. Для этого он прибегает к разнообразным демонстрациям. Например, у некоторых морских собачек самцы плавают возле своего нерестового участка, выделявая вертикальные петли, и побуждают самку войти в его пределы энергичными движениями головы. Привлечению внимания самок посредством демонстрационных действий способствуют щупальца, гребни и характерная раскраска. У некоторых видов для коммуникации между особями разного пола используются еще и феромоны — особые сигнальные

вещества, воздействующие на обоняние.

Как правило, литоральные рыбы проявляют родительскую заботу об икре и в тех случаях, когда она прикрепляется к субстрату (как у большинства рыб), и в тех случаях, когда формируется неприкрепленный комок. Икру обычно охраняет самец, у некоторых видов — самка, а иногда в этом участвуют оба родителя. Родительский присмотр оберегает икру от поедания хищниками, а также, возможно, от смыва волнами и приливно-отливными течениями.

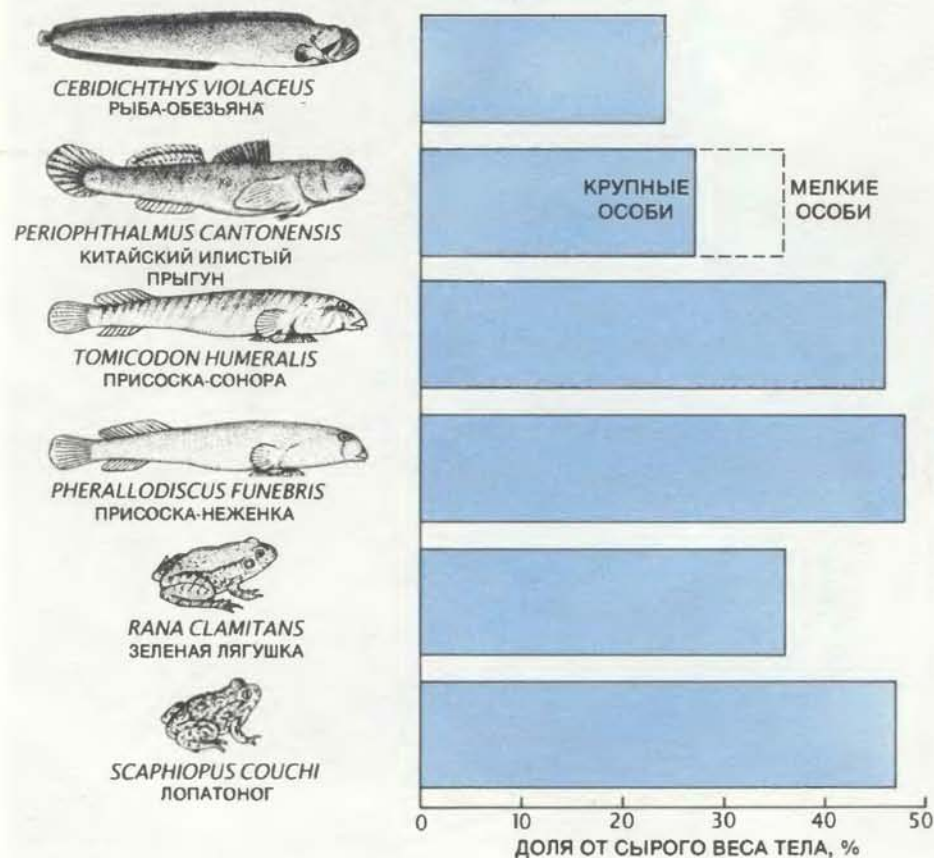
У большинства литоральных рыб личинки после выклева развиваются не в приливно-отливной зоне, а в самом океане, где входят в состав планктона. Как они возвращаются на литораль — это в общем-то пока загадка. С одной стороны, возможно, что здесь играют роль «зеркальца» — длинные, примерно параллельные береговой линии полосы спокойной воды, — порождаемые действием «внутренних» (подповерхностных) океанских волн. Недавно было показано, что концентрация личинок рыб под «зеркальцами» выше, чем под соседними участками, покрытыми

рябью. В тех областях океана, где температура и соленость столба воды резко изменяются с глубиной, «зеркальца» — явление обычное; они, как правило, медленно перемещаются в направлении берега. Быть может, зеркальца и обеспечивают обратный перенос личинок некоторых литоральных рыб в приливно-отливную зону.

С другой стороны, судя по данным, полученным сотрудником Ванкуверского городского аквариума Дж. Марлиэйвом, для некоторых видов литоральных рыб, возможно, и нет проблемы обратного переноса личинок из удаленных от берега вод. Этот исследователь обнаружил, что личинки определенных рыб, обитающих на каменистых участках, остаются вблизи берега, сопротивляясь любым силам, которые могли бы отбросить их от берега или рассеять вдоль него. У таких видов вероятность встречи особей из разных мест очень мала, так что даже популяции, расположенные довольно близко друг к другу вдоль береговой линии, могут быть генетически обособленными.

Еще одна общая черта многих литоральных рыб — способность находить свой «дом». Им приходится предпринимать регулярные вылазки за кормом и, следовательно, подвергать себя риску оказаться при малой воде отрезанными в неблагоприятных условиях. У многих видов сформировалась способность, позволяющая им возвращаться «домой», т. е. в какое-то определенное место (обычно приливную лужу), где им обеспечено подходящее убежище. (Рыбы, которые живут главным образом под камнями либо в зарослях и потому не нуждаются в лужах, такой способностью, как правило, не обладают.) Способность находить свой дом и запоминать топографию конкретной территории, наверное, еще и помогает литоральным рыбам избегать хищников и укрываться во время прилива от сильного волнения.

Большая часть выполненных к настоящему времени исследований «чувства дома» проведена на малом пятнистом подкаменщике *Oligocottus maculosus*. Общепринятый метод изучения такого поведения состоит в том, что рыб, отловленных в определенном месте, метят, прикрепляя к телу цветные пластмассовые бусинки, а затем переносят в другое место. Через некоторое время обследуют то место, откуда были взяты рыбы, чтобы установить, сколько из них туда вернулось. Дж. Грин из Ньюфаундлендского мемориального университета и Г. Крейк, работавший тогда в



ИССУШЕНИЕ некоторые литоральные рыбы выдерживают не хуже земноводных. Диаграмма показывает для каждого вида предельную относительную массу тела при потере воды; дальнейшее обезвоживание (и соответственно уменьшение массы) смертельно. Способность переносить потерю воды — это один из факторов, определяющих расстояние, на которое животное может удалиться от воды, и уровень активности во время отлива. Илестые прыгуны, например, могут ползать по илистым отмелям и дышать воздухом.



Университете пров. Британская Колумбия, обнаружили, что после переноса на 100 м (это относительно большое расстояние) в родную лужу возвращаются до 80% особей *O. maculosus*. Оказалось, что у молодых особей «чувство дома» слабее, чем у старых, и менее устойчиво. Некоторые старые рыбы, выпущенные на волю после того, как их содержали в лаборатории целых 6 месяцев, все еще могли отыскать свой «дом».

У малого пятнистого подкаменщика для отыскания «дома» нужны, по-видимому, как зрение, так и обоняние; равноценна ли роль этих двух чувств, пока не установлено. Крейк пришел в выводу, что старым особям может быть достаточно одного из них, тогда как молодым необходимы оба.

**И**СЧЕРПЫВАЮЩИЕ исследования, в которых выясняются подробности и значение «чувства дома», еще впереди, но они вполне реальны благодаря новым методам, основанным на ультразвуковой телеметрии. В ходе недавно завершённой работы один из авторов этой статьи, а именно Хорн, вместе с С. Ралстоном из фирмы Deep Ocean Work Systems в Сан-Педро (шт. Калифорния) при помощи телеметрического оборудования непрерывно следили за перемещениями нескольких рыб-обезьян (*Cebidichthys violaceus*) в течение продолжительного времени — до 2 недель. У каждой особи к внутренней стороне жаберной крышки был прикреплен крохотный передатчик, испускавший звуки высокой частоты, которые улавливались тремя установленными на дне гидрофонами. С гидрофонов сигналы передавались на расположенное на берегу приемное устройство и на микроЭВМ, которая определяла местонахождение рыб, демонстрировала его на экране и накапливала эту информацию для последующей обработки.

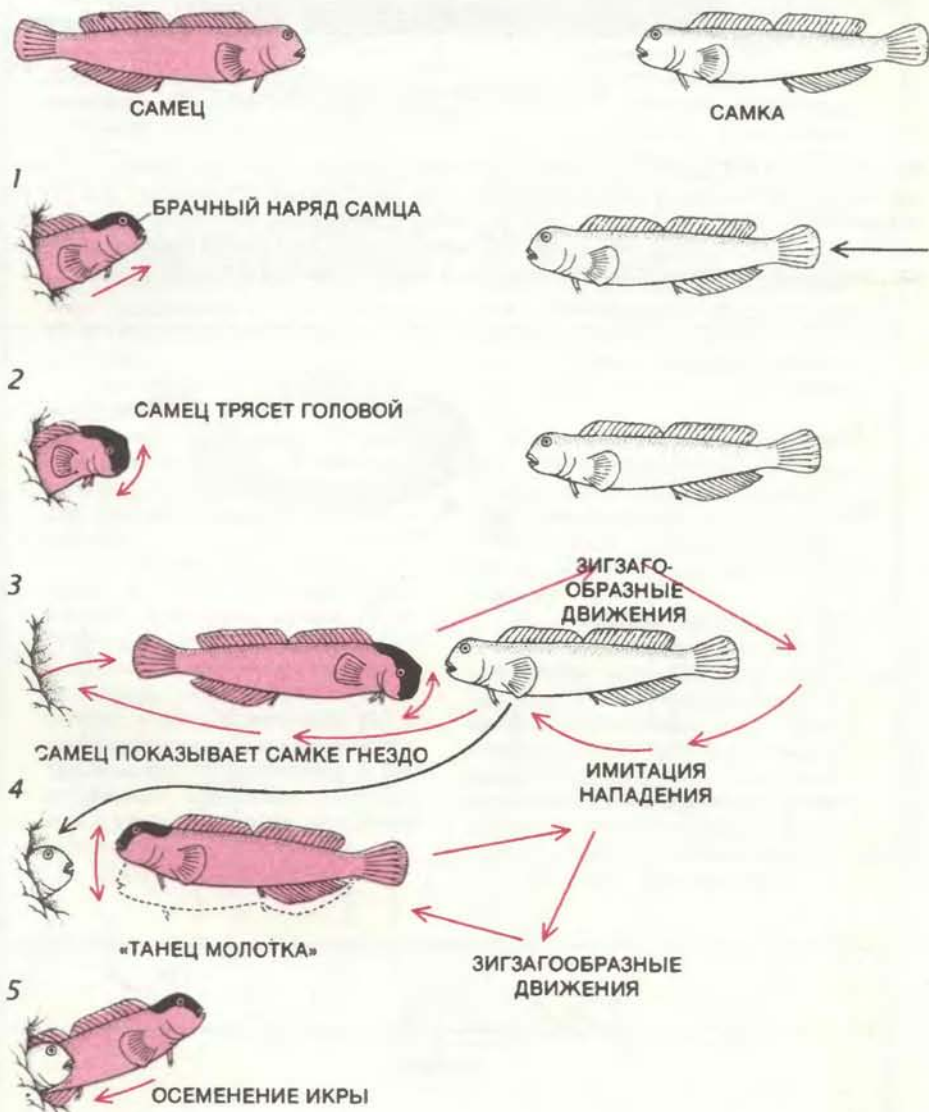
Никаких указаний на «чувство дома» мы не обнаружили; из полученных данных следовало, что рыба-обезьяна постоянно пребывает в пределах своего индивидуального участка, занимающего в приливной полосе не более нескольких квадратных метров. Этому виду, как выяснилось, не свойственна подвижность; каждая из особей, за которыми велось наблюдение, активно двигалась в общей сложности около 5 мин в сутки — главным образом во время подъема уровня воды. Телеметрический метод мы надеемся применить и для изучения других видов. Благодаря дальнейшей миниатюризации передающих устройств вскоре станет воз-

можным следить за животными, еще более мелкими, чем изучавшиеся нами рыбы-обезьяны, длина которых составляла от 23 до 41 см.

Литоральным рыбам, чтобы согласовывать свою жизнедеятельность с фазами приливо-отливного цикла, должна быть полезна способность ощущать наступление этих фаз. Предположительно, такое согласование могло бы осуществляться путем непосредственного реагирования на определенные сигналы: изменения температуры, солености, скорости течения, освещенности и т. п. Но есть, по-видимому, и другой механизм. Последние работы одного из авторов статьи (Гибсона) показали, что в лабораторных условиях даже тогда, когда значения всех этих потенциальных индикаторов поддерживаются на неизменном уровне, у неко-

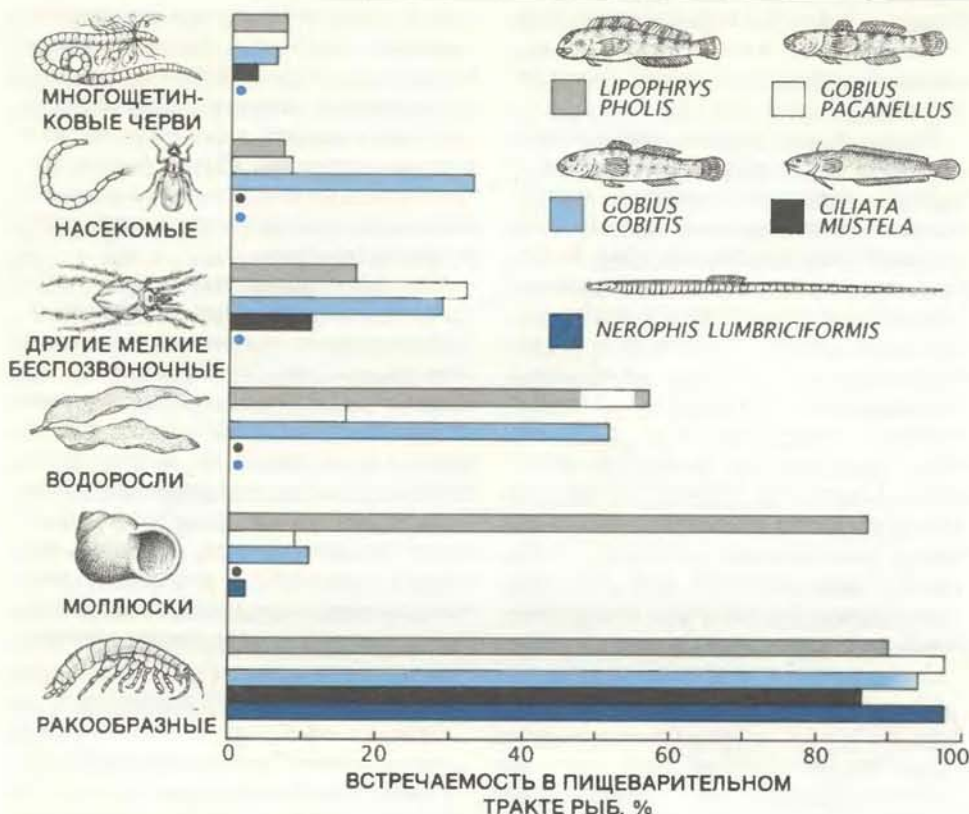
торых рыб (из различных семейств) в поведении все-таки наблюдается ритмичность, согласующаяся с приливо-отливным циклом: периоды покоя, наступающие в то время, когда в данной местности обычно бывает отлив, чередуются с вспышками активности, которые приходятся примерно на время прилива.

Как устанавливается такой эндогенный ритм, в точности не известно. Лабораторные исследования свидетельствуют, что он обусловлен, по крайней мере отчасти, изменениями гидростатического давления, сопряженными с падением и подъемом уровня воды при отливах и приливах. Многие литоральные рыбы не имеют плавательного пузыря, который, как принято считать, у костистых рыб обеспечивает восприятие давления; так что вопрос о том, каким образом

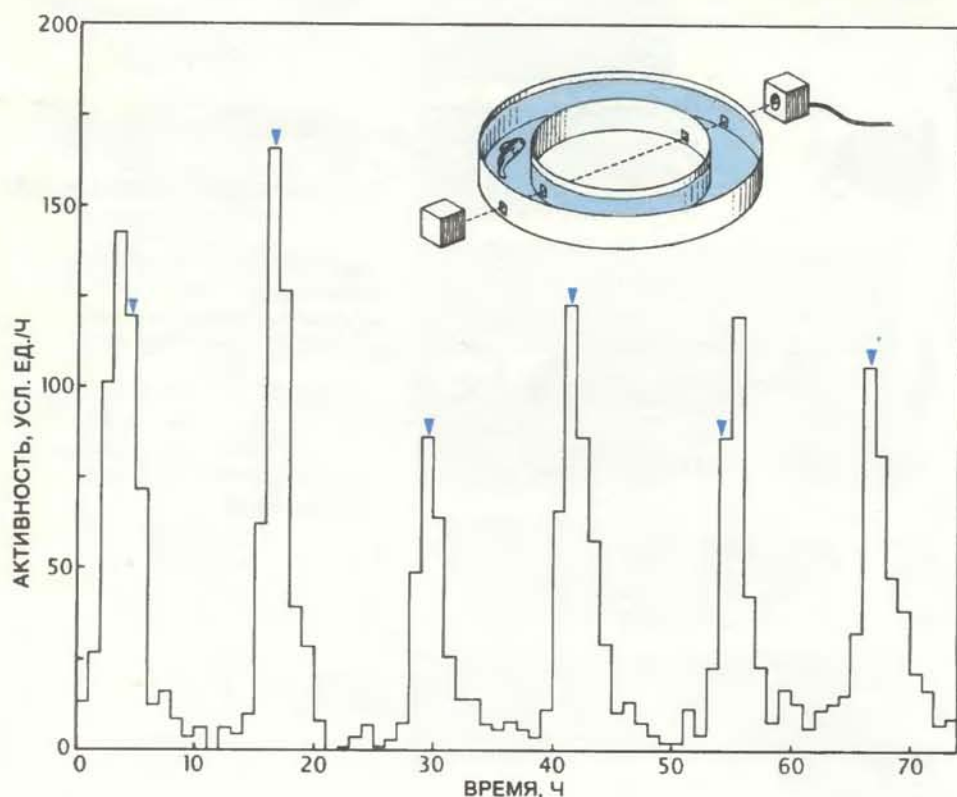


**РИТУАЛ УХАЖИВАНИЯ** у морской собачки *Lipophrys canevae* помимо всего прочего обеспечивает защищенность оплодотворенной икры от волнобоя и хищников. Самец находит укромное место и, высунувшись оттуда (1), привлекает внимание самки, тряся головой (2). Затем он выплывает наружу и добивается того, что она заходит в «гнездо» (3). Там самка выметывает икру (4), а самец ее осеменяет (5). Защищенные гнезда и сложное брачное поведение обычны у литоральных рыб. (Изображенный здесь ритуал описан Э. Абедем.)





РАЦИОН ЛИТОРАЛЬНЫХ РЫБ определяется разнообразием растений и беспозвоночных, обитающих у каменистых берегов. Диаграмма показывает, как часто встречаются различные кормовые объекты в желудках литоральных рыб, отловленных в Роскоффе (Франция). Большая их часть питается беспозвоночными (особенно мелкими ракообразными), а некоторые еще и водорослями.



ВНУТРЕННИЙ РИТМ АКТИВНОСТИ морской собачки *Lipophrys pholis*, зарегистрированный в лаборатории, соответствует ритму приливов (треугольники) в природном местообитании этой рыбы. Запись активности велась в неизменных условиях: рыба содержалась в замкнутом кольцеобразном лотке; всякий раз, когда она пересекала инфракрасный луч, фотоэлемент засчитывал единицу активности (вверху). Возможно, что ход внутренних «часов», управляющих подобными ритмами, устанавливается в зависимости от изменений гидростатического давления, сопровождающих приливы и отливы.

эти медленные изменения гидростатического давления воспринимаются литоральными рыбами, остается загадкой.

В естественных условиях на реакции рыб на прилив и отлив иногда влияют суточный цикл смены дня и ночи, а также, возможно, внутренние циркадианные (присущие самому организму околосуточные, т. е. с периодом примерно 24 ч) ритмы. Полевые исследования показали, что у многих видов активность жестко связана с дневным временем суток. Это объясняется, вероятно, тем, что для таких основных проявлений жизнедеятельности, как поиски пищи, взаимодействие самцов с самками и избегание хищников, требуется зрение. Изучению суточных ритмов поведения литоральных рыб, так же как и «чувства дома», несомненно, будет способствовать применение методов ультразвуковой телеметрии.

ПОМИМО всего прочего литораль предоставляет богатейшие возможности для питания живых организмов. Огромному количеству и высочайшему разнообразию населяющих эту зону существ соответствует многообразие встречающихся там способов питания, особенно на каменистых побережьях в умеренных широтах. Сложность взаимосвязей в литоральной пищевой сети усугубляется тем, что многие организмы изменяют характер своего питания в зависимости от времени года или ежегодно, или с возрастом.

Большинство литоральных рыб плотоядны, некоторые потребляют как растительную, так и животную пищу и очень немногие — исключительно растительную. Особый интерес вызывают те литоральные рыбы, что живут в условиях умеренного климата и поедают преимущественно морскую растительность. Каким образом они обеспечивают себя необходимыми питательными веществами? Ведь подводные растения очень бедны ими, особенно белком, и притом стенки растительных клеток состоят из целлюлозы, которая трудно усваивается. Высказывалось даже предположение, что эти рыбы вообще не переваривают растительных тканей, а питаются мелкими организмами, живущими на поверхности растений.

Кое-что о питании и пищевом поведении таких рыб удалось узнать в результате наблюдений за обитающими в Калифорнийском заливе рыбой-обезьяной и родственной ей мечевидкой *Xiphister mucosus*, выполненными Хорном совместно с С. Мюрреем и М. Нейборс из Университета шт. Калифорния в Фуллертоне. В начале



своей жизни эти рыбы плотоядны, но в возрасте около года полностью переходят на растительную пищу, причем поедают они определенные красные и зеленые водоросли, в первую очередь те, которые содержат сравнительно много белка или углеводов. К. Уркхарт, будучи студентом Университета в Фуллертоне, выяснил, что у рыбы-обезьяны водоросли перевариваются не путем разрушения клеточных стенок специальными ферментами, а за счет того, что пища очень долго (около 50 ч) находится в пищеварительном тракте и под действием кислого желудочного сока из водорослей постепенно экстрагируются углеводы и белки.

О влиянии литоральных рыб как потребителей пищи на популяции растений и животных, населяющих каменистые побережья, известно немного. Судя по некоторым данным, в местах, подобных Большому барьерному рифу, рыбы, кормящиеся в приливной полосе, являются важнейшим фактором, определяющим обилие и состав всей литоральной биоты. Г. Гроссман из Университета шт. Джорджия, изучив интенсивность потребления различных пищевых объектов литоральными рыбами каменистого побережья Калифорнии, пришел к предположению, что многие виды литоральных водорослей и беспозвоночных испытывают со стороны рыб сильное давление естественного отбора. Исследования в этой области продвигаются пока медленно, потому что изменять по желанию численность и распределение литоральных рыб (и даже просто установить их) очень трудно.

**П**ОКА мы еще далеки от полного понимания эволюционных факторов, обусловивших заселение литорали рыбами. Ясно, что обитающие там виды хорошо приспособлены к условиям своего существования: они выносят периодическое высыхание приливо-отливной полосы, выдерживают характерные для нее значительные изменения химического состава морской воды, при необходимости способны дышать воздухом, пользуются разнообразными источниками питания и предохраняют икру от опасностей, которыми угрожает ей окружающая среда.

Но для того, чтобы появление рыб в приливо-отливной полосе объяснить в свете концепции естественного отбора, следует ответить на вопрос: в чем выгоды обитания в этой зоне? Можно предположить, что на литорали менее напряженная конкуренция и менее интенсивное хищничество по сравнению с примыкающей к ней зо-

ной — сублиторалью, но проверить это не представлялось возможным. Нередко считают, будто основное преимущество обитания в литоральной зоне состоит в том, что там можно укрыться от водных хищников; но ведь при малой воде, когда угроза со стороны водных хищников минимальна, литоральные рыбы могут

оказаться уязвимыми для хищников наземных и воздушных. Сравнительные преимущества литорали и роль различных групп хищников — это не легкие, но весьма важные направления исследований; прогресс в них может быть достигнут только путем тщательных экспериментов в полевых условиях.

## Издательство МИР предлагает:

### ТЕХНИКА ОПТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ. ФОТОПРИЕМНИКИ

Под редакцией У. Тсанга  
Перевод с английского

Коллективная монография известных специалистов из США посвящена вопросам разработки и использования быстродействующих высокочувствительных фотоприемников. Подробно изложены физические процессы в фотоприемниках, а также вопросы технологии и конструирования. Приведены эксплуатационные характеристики некоторых устройств.

Для специалистов в области волоконно-оптических систем передачи информации, а также для разработчиков фотоприемников и студентов старших курсов соответствующих специальностей.

Из отзыва члена-корреспондента АН СССР Л. Н. Курбатова: «Книга посвящена одному из актуальных направлений физики и техники полупроводниковых приборов, связанному с разработкой и использованием быстродействующих высокочувствительных фотоприемников. В ней отражены основные достижения в данной области за последние годы».

1988, 32 л. Цена 4 р. 10 к.

### Д. Ши ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ В ЗАДАЧАХ ТЕПЛООБМЕНА

Перевод с английского

В книге представлены обзор и описание наиболее эффективных, применяемых в вычислительной практике подходов и методов расчета, рассмотрено приложение этих методов к исследованию наиболее важных процессов теплообмена: теплопроводности, конвекции и излучения. Рассмотрены физические основы и методы решения сложных комплексных задач, связанных с турбулентностью и горением.

Для специалистов, аспирантов, студентов и инженерно-технических работников в области авиационной и ракетно-космической техники, энергомашиностроения, химической технологии.

Из рецензии академика АН ЛитССР А. А. Жукаускаса: «Книга построена методически очень удачно... Приступающий к изучению численных методов студент сможет проникнуть в сложности задач теплообмена с подкупающей простотой; а зрелый исследователь найдет в книге много поучительного и интересного».

1988, 39 л. Цена 4 р. 30 к.





# Не такие уж редкие эти «редкие земли»

*Редкоземельные элементы, от которых зависит электронная, металлургическая и стекольная промышленность, не столь дефицитны в минералах. Их распространенность, исследуемая геохимией, свидетельствует о разнообразии путей, ведущих к образованию месторождений ископаемых*

ГЮНТЕР МЮККЕ, ПЕТЕР МЁЛЛЕР

**Т**РАДИЦИОННОЕ название «редкие земли» достаточно безосновательно: они и не редкие, и не земли (оксиды металлов). Это металлы, и каждый из них, кроме одного, более распространен на Земле, чем золото, серебро, ртуть или вольфрам. (Их когда-то посчитали «редкими землями», потому что впервые они были выделены в форме оксидов из малораспространенных минералов.) Редкоземельные элементы в действительности повсюду и присутствуют в небольших концентрациях фактически во всех минералах.

Пока невозможно рентабельное выделение редких земель из повсеместно встречающихся минералов. Однако эти элементы играют ключевую роль в производстве многих современных материалов, и, к счастью, существует группа малораспространенных минералов, в которых концентрации редкоземельных металлов достаточно высоки для их промышленного освоения. Церий и эрбий являются компонентами высококачественных металлических сплавов. Неодим, гольмий и диспрозий необходимы для лазерных кристаллов некоторых типов. Самарий — основной компонент сильнейшего из известных постоянных магнитов, которые позволили создать проект принципиально нового электромотора. Иттербий и тербий используются в качестве магнитных материалов в запоминающих магнитооптических устройствах компьютеров. Европий активизирует красный фосфор экранов цветных телевизоров. Возможно, наиболее интригующим и перспективным является применение редких земель для производства керамических материалов, которые становятся сверхпроводящими при удивительно высоких температурах. Лантан был компонентом первой такой керамики; затем было обнаружено, что замена лантана гадолинием приводит к сверхпроводимости

при еще более высокой температуре. Редкоземельные элементы являются также катализаторами процессов очистки нефти и позволяют регулировать показатели преломления стеклянных линз и оптических волокон. (Кроме того, существует множество низкотехнологических изделий, содержащих редкие земли. Например, железо, легированное ими, давно используется в качестве материала для изготовления кремней для зажигалок.)

Тот факт, что редкоземельные элементы неравномерно распространены на поверхности Земли, является благом не только для горнодобывающих и рудоперерабатывающих компаний, но и для геохимиков. Относительная распространенность редкоземельных элементов в минералах отражает взаимосвязь их уникальных химических свойств с различными процессами, которые происходят в верхней мантии и земной коре. Ученые, изучающие характер распределения редких земель в минералах, могут таким образом получить новые геологические знания, которые принесут пользу наукам о Земле и в конечном итоге — современной индустрии.

**П**ОМИМО неточности самого термина «редкие земли» следует отметить разногласия в отношении того, какие элементы он объединяет. Многие химики считают, что термин включает в себя скандий, иттрий и лантаноиды — элементы, имеющие атомные номера с 57 по 71 (см. рисунок на с. 52). Наше обсуждение касается в основном лантаноидов, хотя для удобства мы будем по-прежнему использовать термины «редкие земли» и «редкоземельные элементы». (Мы также практически исключаем прометий, поскольку он не имеет стабильных изотопов и не найден в природе.)

Причина терминологической пута-

ницы связана с реакционной способностью этих элементов (которой обусловлены сложности при выделении их в чистом виде) и сходством их химических свойств (определяющим трудности при их разделении друг от друга). Действительно, хотя описание необычного минерала, содержащего редкие земли, было впервые опубликовано в 1788 г., только через 50 лет шведский хирург, химик и минералог Карл Густав Мосандер показал, что «земли», выделенные из минералов, были не элементами, а смесями оксидов элементов. Выделение и описание всех редкоземельных элементов было связано с большими трудностями на протяжении долгого времени; этот процесс был окончательно завершён в 1947 г., когда из продуктов деления урана был выделен прометий.

Сходство химических свойств редкоземельных элементов является следствием особенностей их атомной структуры. Атом может быть представлен в виде положительно заряженного ядра, окруженного несколькими электронными «уровнями» (обозначаются цифрой), которые построены из подуровней (обозначаются латинскими буквами), соответствующих различным разрешенным квантовым состояниям электронов в атомах. Валентные, или связывающие, электроны обычно находятся на самом удаленном от ядра уровне и определяют химические свойства данного атома. Обычно атомы соседних элементов в периодической таблице различаются не только зарядом ядра, но и типом валентных электронов. Однако атомы всех редкоземельных элементов независимо от атомного номера имеют на последнем, шестом уровне одинаковое число валентных электронов одного типа. Увеличивающийся положительный заряд их ядер компенсируется путем заполнения частично занятого *f*-подуровня четвертого уровня. Поскольку уро-



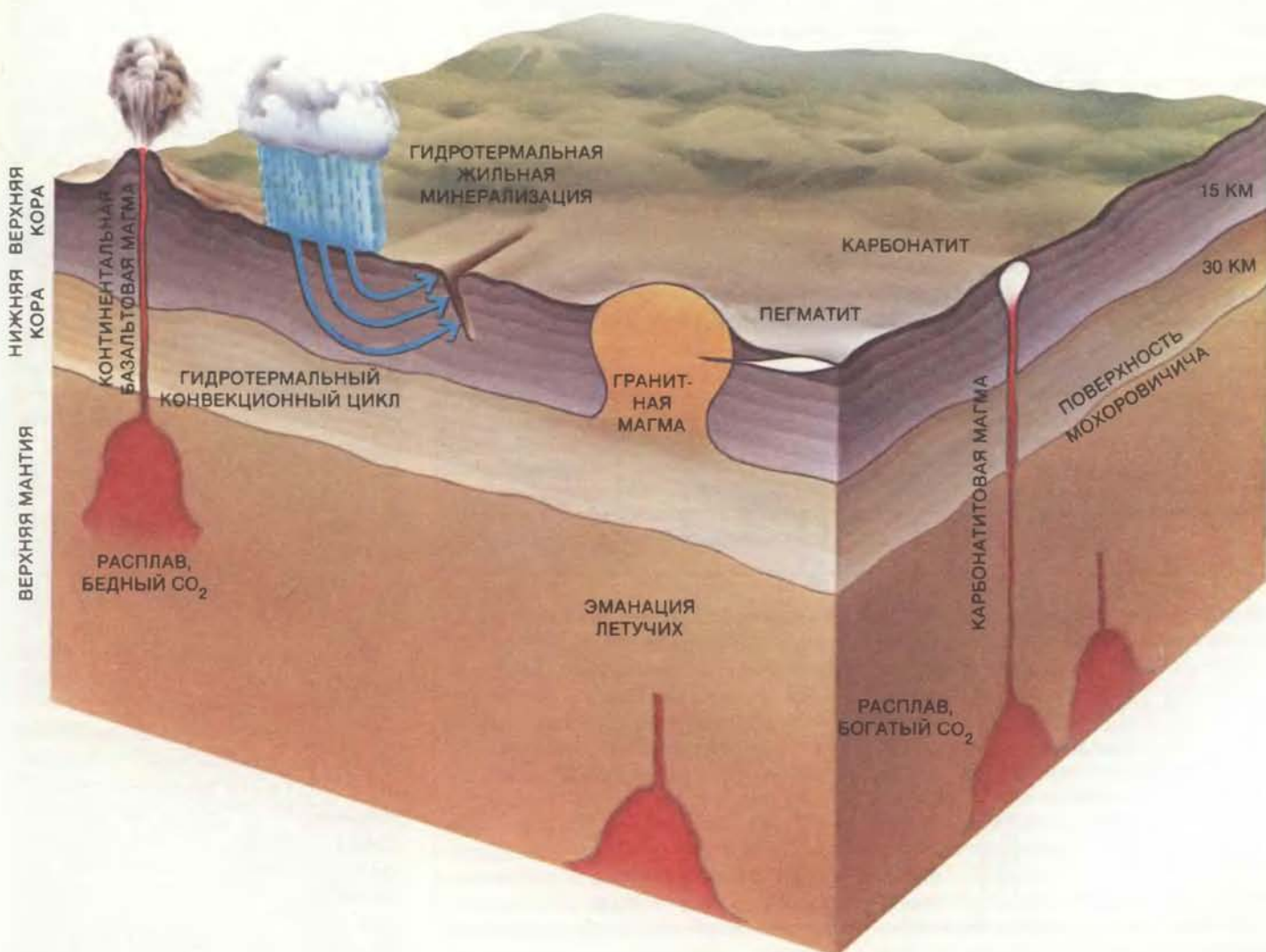
вень валентных электронов в атомах редкоземельных элементов остается неизменным, они имеют почти одинаковые химические свойства.

Различия в химическом поведении этих элементов в значительной степени обусловлены различиями их эффективных атомных размеров, проявляющихся при отдаче трех электронов с образованием трехвалентных ионов. Благодаря постоянно увеличивающимся силам взаимодействия между возрастающим положительным зарядом ядра и увеличивающимся отрицательным зарядом  $4f$ -подуровня размеры трехвалентных ионов сокращаются с увеличением атомного номера. Иногда происходят изменения размеров ионов, если

они принимают аномальные ионные состояния, отличающиеся от обычного трехвалентного. Например, при восстановительных условиях (в присутствии элементов, которые легко теряют электроны) европий может захватить один электрон и перейти в двухвалентное состояние; при окислительных условиях (в присутствии свободного кислорода) церий может потерять один электрон, становясь четырехвалентным.

**В СИЛИКАТНОМ** расплаве или горячем водном растворе именно эти различия в размерах ионов определяют, какой из редкоземельных элементов будет предпочтительно захватываться кристаллами, образуя-

щимися по мере охлаждения жидкости. Причина в том, что в этих условиях редкоземельный атом обычно не существует в виде свободного иона, а окружен другими ионами, называемыми лигандами, образуя комплекс. Число лигандов в комплексе, так же как и его геометрия, зависит от концентрации и вида преобладающих в жидкости лигандов. Перед тем как комплекс, содержащий редкоземельный ион, будет захвачен кристаллом, он должен быть каким-то образом деформирован на поверхности кристалла. Этот процесс зависит в основном от электрохимических условий на границе раздела жидкость — твердое тело. Как только комплекс, включающий редкоземельный ион, попадает в



РАЗЛИЧНЫЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ведут к формированию минералов, обогащенных редкоземельными элементами. Магмы (расплавленные породы) могут иметь высокие концентрации редкоземельных элементов (особенно легких, имеющих небольшие атомные номера), если они образованы в глубинных частях верхней мантии, обогащенных диоксидом углерода. Такие магмы могут время от времени подниматься к коре, образуя тела, известные как карбонатиты. Мантийные магмы, образованные ближе к коре, откуда диоксид углерода и другие летучие компоненты поднимаются на поверхность Земли, в основном обеднены редкими землями. Коровый материал также может плавиться, образуя гранитные магмы, имеющие бо-

лее высокие концентрации редкоземельных элементов по сравнению с исходной породой, подвергшейся плавлению. По мере остывания магм образуются кристаллы, предпочтительно захватывающие тяжелые редкоземельные элементы с большими атомными номерами. Таким образом, жидкий остаток после широко проявленной кристаллизации может быть сильно обогащен легкими редкоземельными элементами. Такой остаток окончательно кристаллизуется в породы, известные как пегматиты. Редкоземельные элементы могут концентрироваться также при кристаллизации гидротермальных, или горячих водных растворов. В этом случае в жидком остатке концентрируются преимущественно тяжелые элементы.



тонкий поверхностный слой, он должен перестроиться в соответствии с решеткой растущего кристалла. В случае когда комплекс не захватывается кристаллом, редкоземельный ион все же может попасть в него, если возможен самопроизвольный распад комплекса и освобождение иона у поверхности кристалла.

Например, фосфатные минералы ксенотим и монацит могут кристаллизоваться из химических сходных расплавов с примесью редких земель. Кристаллическая структура ксеноти́ма обеспечивает вхождение в ячейку редкоземельных комплексов, имеющих максимум 8 кислородных лигандов, тогда как кристаллическая структура монацита допускает редкоземельный атом, окруженный 10 лигандами — атомами кислорода. Поскольку небольшие редкоземельные ионы окружены меньшим числом атомов кислорода, они занимают небольшие вакансии в растущем кристалле ксеноти́ма. Большие по размеру редкоземельные ионы окружены большим числом атомов кислорода и могут занимать крупные полости в кристаллической решетке монацита. В результате ксенотим проявляет сходство к тяжелым редкоземельным элементам, таким, как диспрозий, гольмий, эрбий и тулий, которые

имеют большие атомные номера. И наоборот, монацит имеет тенденцию к захвату легких редкоземельных элементов, таких, как лантан, церий, празеодим и неодим, атомные номера которых меньше.

В горячих водных растворах размер редкоземельных ионов также определяет, какой ион предпочтительно входит в кристаллы, хотя конечный результат получается обратным: более тяжелые, меньшие по размеру редкоземельные элементы стремятся остаться в жидкой фазе, тогда как более легкие большие редкоземельные ионы имеют тенденцию к захвату кристаллами. Это связано с тем, что в водном растворе редкоземельные ионы окружены в основном поляризованными молекулами воды, а не лигандами. Плотный щит из молекул воды допускает только несколько отрицательно заряженных ионов, таких, как гидроксил-(ОН)<sup>-</sup>, фторид-(F<sup>-</sup>) или карбонат (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>)-ионы, которые взаимодействуют с редкоземельным ионом с образованием лигандных связей. Прочность таких связей зависит от удельного заряда редкоземельного иона. Поскольку в большинстве случаев редкоземельный ион имеет одинаковый заряд +3, удельный заряд редкоземельных ионов является в основном функцией их разме-

ров: мелкие ионы имеют больший удельный заряд, чем крупные. Таким образом, для легких крупных редкоземельных ионов требуется меньше энергии, чтобы ион мог потерять лиганды и ассимилироваться кристаллической решеткой.

Первое применение таких физико-химических принципов в геологии принадлежит норвежскому минералогу и петрологу В. М. Гольдшмидту, родившемуся в Швейцарии. Объясняя захват элементов в минералы, он сформулировал в 1937 г. ряд правил, которые основаны на сходстве ионных размеров и зарядов элементов, формирующих кристаллы в магме (расплавленной породе) и гидротермальных растворах (горячей воде). Концепция Гольдшмидта была несколько упрощена, поскольку в ней не учитывалась роль комплексобразования. Только в настоящее время геологи начинают учитывать достижения в изучении процессов комплексобразования для объяснения изменения первичной распространенности редких земель с момента образования Земли (около 4,5 млрд. лет назад) при их разделении или накоплении (в соответствии с атомными номерами) в пределах земной коры и мантии.

**РАСПРОСТРАНЕННОСТЬ** редких земель в первичной Земле может быть выведена из элементного состава особой группы метеоритов, называемых углистыми хондритами. И земля, и углистые хондриты, как предполагают, сформировались из материала, который конденсировался и аккрецировался из первичного газопылевого облака. Доказательство единого происхождения этого материала дано Г. Вассербургом и Д. де Паоло в итоге исследований, проведенных в 1976 г. в Калифорнийском технологическом институте.

Вассербург и де Паоло определили количество радиоактивного самария-147 (<sup>147</sup>Sm) и его дочернего продукта неодима-143 (<sup>143</sup>Nd) в метеоритах и земных породах. В результате радиоактивного распада самария-147 концентрация неодима-143 по отношению к стабильным изотопам неодима, таким, как неодим-144, непрерывно возрастала за время существования системы со скоростью, вычисленной на основе первоначального отношения самария к неодиму и периода полураспада самария-147 (приблизительно 100 млрд. лет). Вассербург и де Паоло смогли продемонстрировать, что и Земля в целом, и хондритовые метеориты имеют одинаковое отношение <sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd и поэтому должны иметь одинаковые первоначальные

АТОМНЫЙ НОМЕР	ЭЛЕМЕНТЫ		ЭЛЕКТРОННЫЕ КОНФИГУРАЦИИ ВНЕШНИХ ОБОЛОЧЕК			ИОННЫЙ РАДИУС, Å
			4	5	6	
			s p d f	s p d	s	
			2 6 10	2 6		
57	ЛАНТАН	La	0	1	2	
58	ЦЕРИЙ	Ce	1	1	2	•
59	ПРАЗЕОДИМ	Pr	3	0	2	•
60	НЕОДИМ	Nd	4	0	2	•
61	ПРОМЕТИЙ	Pm	5	0	2	•
62	САМАРИЙ	Sm	6	0	2	•
63	ЕВРОПИЙ	Eu	7	0	2	•
64	ГАДОЛИНИЙ	Gd	7	1	2	•
65	ТЕРБИЙ	Tb	9	0	2	•
66	ДИСПРОЗИЙ	Dy	10	0	2	•
67	ГОЛЬМИЙ	Ho	11	0	2	•
68	ЭРБИЙ	Er	12	0	2	•
69	ТУЛИЙ	Tm	13	0	2	•
70	ИТТЕРБИЙ	Yb	14	0	2	•
71	ЛЮТЕЦИЙ	Lu	14	1	2	•

**РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ** включают лантаноиды — элементы с атомными номерами от 57 до 71. Атомы редкоземельных элементов проявляют сходное химическое поведение, поскольку их валентные внешние электроны на последних уровнях имеют одинаковые квантовые состояния (обозначены буквами s, p, d, или f). Хотя конфигурация валентных электронов значительно не изменяется с возрастанием атомного номера, трехвалентные ионы, образующиеся при потере атомами 3 электронов, систематически уменьшаются в размерах. (Ионы, входящие в кристалл, могут быть представлены как заряженные сферы, поэтому им можно приписать радиус, соответствующий их размерам.) Церий и европий значительно отклоняются от плавного изменения ионных радиусов, когда они соответственно теряют или захватывают еще один электрон (выделено цветом), что иногда и проявляется в подземных условиях.



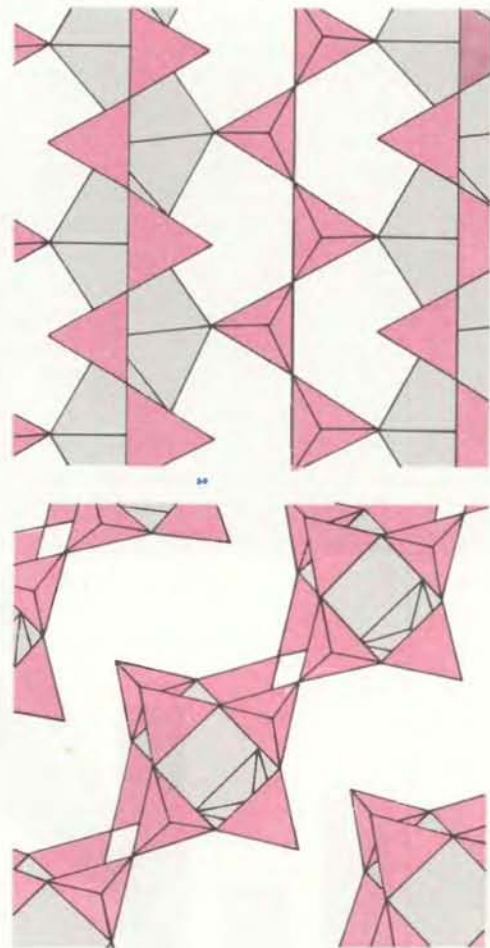
цальные отношения Sm/Nd. Абсолютные значения концентраций самария и неодима в первичной мантии, как полагают, были приблизительно в два раза выше обнаруженных в метеоритах.

Причина этого кроется в том факте, что редкоземельные элементы концентрируются почти исключительно в силикатной, а не в металлической фракции метеоритов. Из сродства элементов к силикатам разумно сделать вывод о том, что они были отделены (и таким образом слегка сконцентрированы) в примитивную мантию, тогда как другие металлы мигрировали в ядро Земли.

Самарий и неодим, как и другие редкоземельные элементы, далее концентрировались в наружных, коровых слоях Земли в связи с локальным разогревом молодой мантии, который привел к ее частичному плавлению. Действительно, первая порция расплава, выделенная из разогретого минерала, содержащего редкоземельные элементы, стремится захватить легкие редкоземельные элементы, которые образуют более устойчивые комплексы в жидком состоянии. Следовательно, как только минерал молодой мантии начинал плавиться, редкоземельные элементы разделялись: наиболее крупные и легкие элементы (такие, как самарий и неодим) переходили в расплав предпочтительнее, чем мелкие и тяжелые. Поскольку твердая фаза в основном плотнее, чем жидкость, эти ранние расплавы имели меньшую плотность, чем родоначальное вещество мантии, и поднимались к поверхности Земли, формируя первую примитивную кору.

Этот тип накопления элементов уже был широко распространен 3,8 млрд. лет назад в архейскую эру, когда были образованы осадки, сформировавшие древнейшие из известных земных пород. Такие породы помогают дать надежную оценку содержания редких земель в то время, поскольку их растворимость в поверхностных водах ничтожно мала и редкие земли с трудом экстрагируются из минерала — хозяина при выветривании, эрозии, переносе и переотложении. Анализ пород показал, что Архейская верхняя кора имела примерно 25-кратную степень обогащения по отношению к ранней мантии для лантана, величина которой плавно снижается с увеличением атомного номера примерно до 5 для лютеция.

**ПРЕДПОЛАГАЮТ**, что процесс выделения континентальной коры из ранней мантии достиг наибольшей интенсивности в период между 2 и 2,5 млрд. лет назад. Более 75% объе-



**РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫЕ ИОНЫ** в жидкости стремятся окружить себя другими ионами, называемыми лигандами, образуя комплекс. Структура редкоземельного комплекса зависит от концентрации и типа имеющихся лигандов, а также от размера редкоземельного иона. Редкоземельный элемент с большей вероятностью будет ассимилироваться растущим в жидкости кристаллом, если его комплекс имеет строение, соответствующее кристаллической решетке растущего кристалла; в противном случае комплекс не должен ассимилироваться. По этой причине ион лантана (с зарядом + 3) стремится попасть в силикатные минералы, содержащие железо или магний (*вверху*), тогда как более крупный ион европия, имеющий заряд + 2, предпочтительно захватывается полевыми шпатами, содержащими кальций (*внизу*).

ма современной континентальной коры, возможно, было сформировано в то время. Выделение больших объемов обогащенного редкими землями материала привело к обеднению некоторых частей верхней мантии легкими редкоземельными элементами. Поскольку неодим легче, чем самарий, отношение Sm/Nd (которое определяет скорость увеличения измеряемого отношения  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ ) в достаточной степени выросло в деплетированной мантии, наделив ее отличающейся изотопной меткой. Действительно, высокие отношения  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  в вулканическом материале, отработанном вдоль срединно-океанических хребтов, показывают, что их мантийный источник, возможно, участвовал в ранних фазах образования континентов.

Несмотря на раннее общее обеднение мантии легкими редкоземельными элементами некоторые мантий-

ные магмы, которые прорывают кору Земли, иногда имеют повышенные концентрации редкоземельных элементов. Как это могло случиться? Ответ заключается в том, что минералы, имеющие высокие точки плавления, могут кристаллизоваться из мантийной магмы и удаляться из нее в ходе физических процессов благодаря гравитационной отсадке или флотации. Поскольку редкоземельные элементы (особенно легкие) обычно стремятся остаться в жидкой фазе, при ее кристаллизации происходит обогащение редкоземельными элементами. Обширная кристаллизация может привести к 100-кратному возрастанию концентраций редких земель в мантийных магмах. Тем не менее содержание редкоземельных элементов в породах, сформированных из таких магм, которые можно обнаружить на океанических островах и в зонах континентальных рифтов, все



же значительно ниже промышленных концентраций, характерных для руд.

Однако при благоприятных условиях мантийные магмы подвергаются дополнительному обогащению редкими землями, которое дают промышленные руды. Такие условия существуют при образовании карбонатитов (магматических карбонатных образований). Карбонатитовые магмы образуются при плавлении мантийных пород в присутствии больших количеств диоксида углерода. В таких

магмах редкоземельные элементы легко образуют прочные карбонатные комплексы, при этом более легкие элементы формируют более прочные комплексы, чем тяжелые.

В карбонатитовых магмах уровни содержания редкоземельных элементов могут быть достаточно высоки, чтобы кристаллизовались такие редкоземельные минералы, как бастнезит и паризит. В этом случае в породах, образованных в результате остывания магмы, можно обнаружить

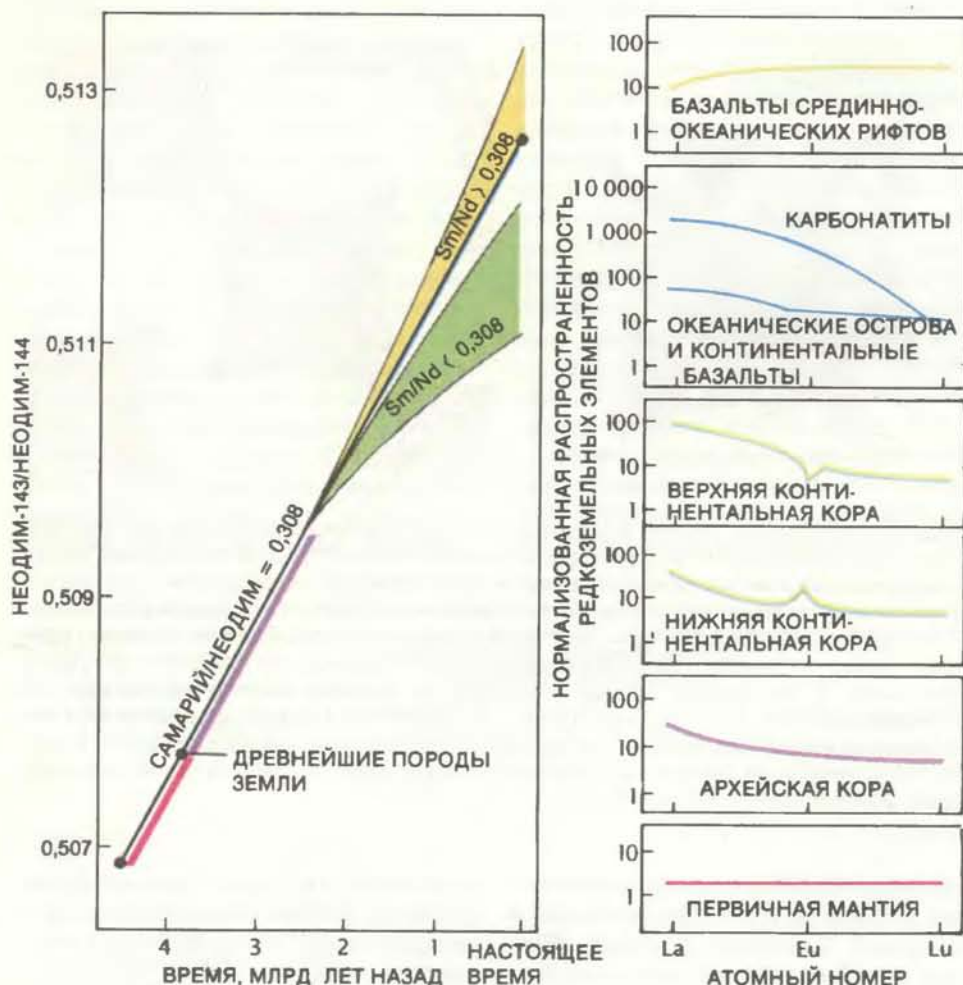
концентрации редкоземельных элементов, приблизительно в 10000 раз превышающие таковые в ранней мантии, и в них имеются минералы с общим содержанием оксидов редкоземельных элементов около 60%. Карбонатиты представляют собой главный тип руд редких земель, примером является крупнейшее месторождение Маунтин-Пасс в Калифорнии.

**КАК ТОЛЬКО** континентальная кора стала толще, температура в ее нижних слоях повысилась достаточно для того, чтобы вызвать локальное плавление. Возможно, плавление и перераспределение жидкого материала в коре стали доминирующим геологическим процессом фракционирования вещества — в большей степени, чем аккумуляция магм, выплавляющихся из мантии.

Магмы, образованные в коре, значительно богаче кремнеземом (оксид кремния) и глиноземом (оксид алюминия), чем мантийные расплавы. В таких расплавах ионы редкоземельных элементов входят в состав комплексов, состоящих из кремния, алюминия и кислорода. Алюмосиликатные минералы, которые кристаллизуются из таких расплавов, должны захватывать группы комплексов, которые соответствуют их кристаллической структуре. Однако вследствие высокого электрического заряда редкоземельного иона алюмосиликатный комплекс, который включает редкоземельный ион, деформирован и часто не может служить в качестве кристаллического «строительного блока». Следовательно, комплексы, содержащие редкоземельные элементы, стремятся накапливаться в жидкой фазе кристаллизующегося корового расплава.

Редкоземельный ион все же может быть захваченным алюмосиликатными кристаллами, если комплекс сначала разрушить. Поскольку наиболее деформированные комплексы имеют более слабые лигандные связи, то для их разрушения требуется меньше энергии. Величина деформации комплекса определяется в основном удельным зарядом иона; более тяжелые элементы (которые имеют меньшие ионные размеры) деформируют комплексы в большей степени, чем легкие. Следовательно, тяжелые редкоземельные элементы легче входят в строящуюся кристаллическую структуру, обогащая остаточный расплав легкими редкоземельными элементами.

Если коровый расплав изначально характеризовался высокими концентрациями редкоземельных элементов, и затем он в значительной степени кристаллизовался, то остаточный

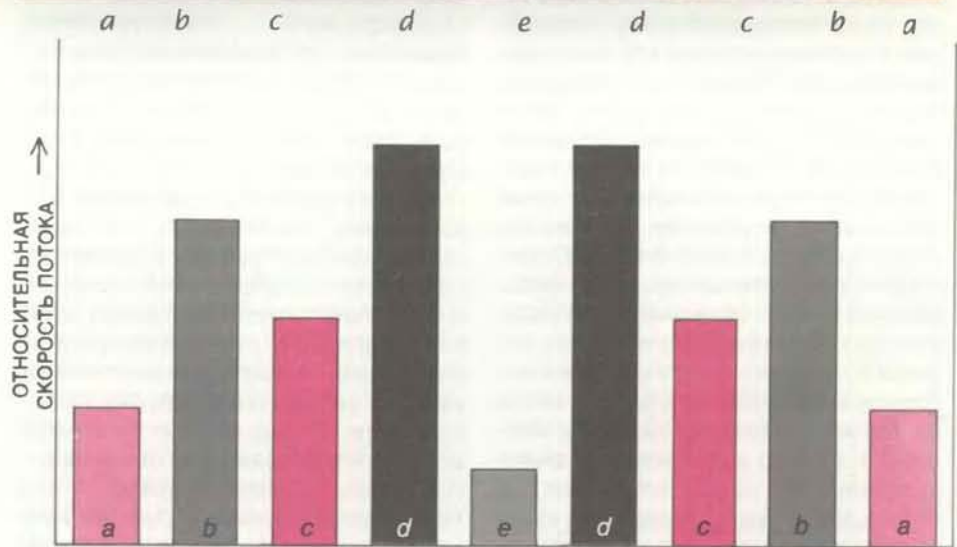


**РАЗДЕЛЕНИЕ**, или накопление элементов в соответствии с атомным номером, является результатом геологической эволюции Земли и проявляется в отношении неодима-143 ( $^{143}\text{Nd}$ ) к неодииму-144 ( $^{144}\text{Nd}$ ) в различных типах пород (слева). Поскольку неодим-143 образуется при радиоактивном распаде самария-147, отношение  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  отражает отношение самария к неодииму. Первичная Земля, возможно, имела отношение  $\text{Sm}/\text{Nd}$  0,308, поскольку это отношение отмечается в каменных метеоритах. Содержание каждого редкоземельного элемента в таких метеоритах берется в качестве базового (эталонного) значения, с использованием которого рассчитываются показатели обогащения (накопления) — так называемые нормализованные содержания (концентрации). Кривая, связывающая нормализованные содержания редкоземельных элементов (справа), как предполагают, является ровной для первичной мантии, так как она не должна была иметь возможности для фракционирования. Породы, образованные в архейской коре и являющиеся древнейшими из известных пород на Земле, уже проявляли обогащенность редкоземельными элементами, в частности легкими. Породы моложе 2,5 млрд. лет имеют отношения  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ , которые явно соответствуют различным по величине отношениям  $\text{Sm}/\text{Nd}$ ; это отражает тот факт, что плавление и кристаллизация, ведущие к их образованию, могут либо обогащать, либо обеднять их легкими редкоземельными элементами. Известные расхождения в содержании европия в породах из верхней и нижней континентальной коры являются следствием предпочтительного накопления европия в нижней коре.



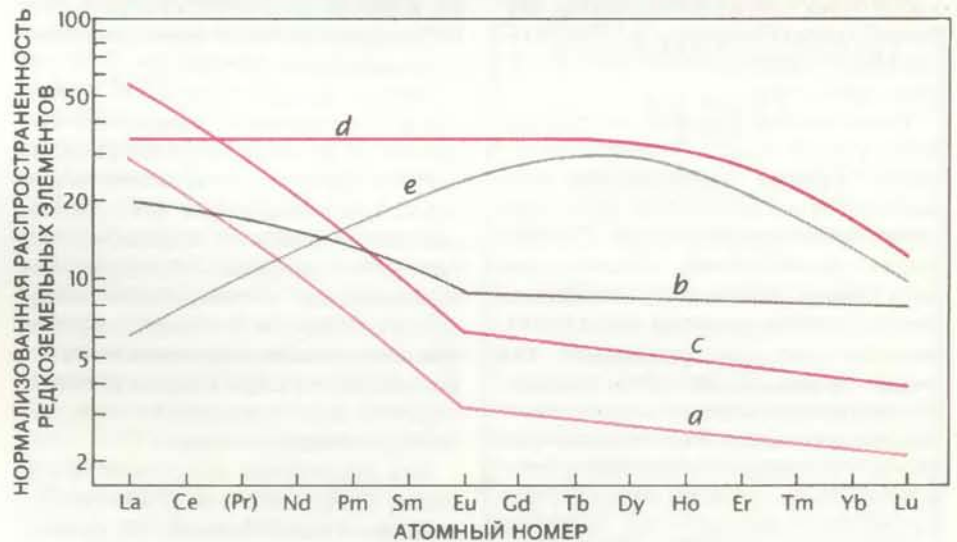
расплав обогащается легкими элементами, так же как водой и фтором, которые тоже нелегко захватываются растущими кристаллами. Когда в конце концов кристаллизуется остаточный расплав, образуются относительно небольшие тела гигантозернистых пород, известные под названием пегматиты. Они могут содержать существенные количества редкоземельных минералов и представлять собой другой промышленный источник редкоземельных элементов, в особенности легких. Примеры таких месторождений известны в районе Южного плато в Колорадо.

С. Тейлор и С. Макленнан из Австралийского национального университета показали, что отложения старше 2,5 млрд. лет, которые представляют Архейскую континентальную кору, обеднены редкоземельными элементами по сравнению с их более молодыми аналогами. Более молодые отложения, однако, обнаруживают небольшое, но четкое обеднение европием. Противоречие объясняется тем, что плагиоклаз (обогащенный кальцием полевой шпат), который часто является остаточным продуктом коровых расплавов, предпочтительно удерживает европий в его аномальной двухвалентной форме. В результате внутрикоровое плавление приводит к обогащению верхней коры редкоземельными элементами, особенно легкими, при относительном обеднении европием.)



**ПОДНЯВШИЕСЯ** в верхнюю континентальную кору, жидкие или кристаллизующиеся магмы могут взаимодействовать с подземной горячей водой, образуя гидротермальные растворы. Из такого гидротермального раствора могли кристаллизоваться минералы, состав редкоземельных элементов которых соответствует первоначальному источнику и условиям минералообразования. (Интерпретация данных в таком случае должна проводиться с учетом того, что циркулирующие гидротермальные растворы часто изменяют свой химический состав при взаимодействии с окружающими породами.)

Редкоземельные элементы более эффективно фиксируются в кальциевых минералах, таких, как флюорит и кальцит, где трехвалентные редкоземельные элементы стремятся заместить кальций. Поскольку тяжелые редкоземельные элементы формируют в водных растворах устойчивые комплексы, легкие элементы имеют намного больше шансов попасть в кристаллы, которые растут в гидротермальных условиях. По мере того как такой раствор кристаллизуется, в минералах прогрессивно возрастает



**ИСТОРИЯ ГИДРОТЕРМАЛЬНОГО МИНЕРАЛООБРАЗОВАНИЯ** отражается в характере распространения редкоземельных элементов в симметричных прослойках флюорита, который выстилает стенки трещины (верхний рисунок). В противоположность магматическому минералообразованию вместо легких редкоземельных элементов в жидкой фазе предпочтительно накапливаются тяжелые элементы. Отсюда по мере кристаллизации гидротермального раствора жидкий остаток постоянно обогащается тяжелыми редкоземельными элементами. Флюоритовые полоски отражают такое их поведение, которое зависит также от скорости потока раствора (средний рисунок). Сформированные первыми внешние полоски имеют заметно более высокие концентрации легких редкоземельных элементов, чем тяжелых, как это можно видеть из графиков нормализованных концентраций (нижний рисунок). Тяжелые редкоземельные элементы в свою очередь предпочтительнее захватываются внутренними частями флюоритовых прожилков.



доля более тяжелых редкоземельных элементов. Минералы кальция эффективно захватывают трехвалентные ионы редких земель всех размеров, поэтому обогащение тяжелыми редкими землями до концентраций, при которых они могут кристаллизоваться в форме собственных минералов, достигается редко. Как следствие редкоземельные элементы из гидротермальных рудных месторождений добываются только как побочный продукт.

Роль химического комплексобразования редкоземельных элементов в гидротермальных растворах и магматическом расплаве неодинакова и ведет к противоположным ситуациям. В магматической системе легкие редкие земли проявляют четкую тенденцию к сохранению в жидкой фазе, тогда как в гидротермальных растворах такая тенденция свойственна более тяжелым редким землям. В рамках геологического времени эти противоположные тенденции приводят к минимальному всеобщему фракционированию редких земель в земной коре.

Противоположные процессы фракционирования объясняют относительную малочисленность месторождений руд редких земель в противовес бесспорному факту, что редкие земли не так уж редки (в глобальном масштабе). Свинец менее распространен на Земле, чем редкие земли (взятые вместе как группа), однако его руды часто представлены богатыми жилами, потому что в случае свинца процессы магматического и гидротермального фракционирования усиливают друг друга.

Тем не менее изучение распространения редких земель в минералах показало, что при благоприятных условиях (когда магматические или гидротермальные процессы явно доминируют) окончательные концентрации могут быть достаточно высокими для формирования крупных долгофункционирующих месторождений руд редких земель. Кроме того, такие исследования проливают определенный свет на пути и способы распределения элементов между минералами и жидкой фазой, состоящей в одних случаях из магмы, в других — из гидротермального раствора. Поскольку геохимии в основном согласны с тем, что такие процессы являются главными принципиальными способами концентрирования большинства элементов в породах земной коры и мантии с изначального этапа, изучение распределения редких земель в минералах способствует выявлению всех минеральных ресурсов — не только руд редких земель — для будущих поколений.

### Фазирование — новый метод определения пространственной структуры молекул

**Р**ЕНТГЕНОВСКАЯ кристаллография, позволяющая определить атомную структуру кристаллов путем наблюдения дифракции рентгеновских лучей, — незаменимый метод исследования сложных органических молекул. Однако его реализация связана с большими трудностями. Так, только недавно после нескольких лет напряженной работы группа из шести сотрудников Гарвардского и Станфордского университетов наконец-то расшифровала спиральную структуру молекулы антигена гистосовместимости HLA-A2, который играет очень важную роль в иммунной системе.

Главная проблема заключается в извлечении информации о пространственной структуре из распределения пятен, образующихся после воздействия дифрагированных пучков на фотопленку или другую регистрирующую среду. Интенсивность каждого пятна и его положение на дифракционной картине могут многое сказать о природе и расположении исследуемых атомов. Однако, чтобы точно смоделировать структуру кристалла, надо знать также фазу (гребня, впадины или промежуточной точки) дифрагированной волны в момент ее попадания на пленку.

Метод, разработанный Р. Колеллой из Университета Пардю и К. Шеном из Корнеллского университета, может служить новым эффективным средством определения фазы. В нем используется явление, хорошо известное кристаллографам: если кристалл ориентирован определенным образом, то пучок рентгеновского излучения испытывает дифракцию не на одной плоскости в кристалле, а одновременно на двух и расщепляется на два перекрывающихся пучка.

При проведении эксперимента Колелла и Шен сначала ориентируют кристалл таким образом, что получается один дифрагированный пучок. Затем, вращая кристалл, они приводят его в такое положение, при котором пучок расщепляется. Если два пучка совпадают по фазе (гребень приходится на гребень и впадина — на впадину), то они усиливают друг друга, и пятно, создаваемое ими на пленке, становится ярче; если же пучки не совпадают по фазе, они ослабляют друг друга, и пятно тускнеет или исчезает совсем. Фиксируя изменение

яркости пятна, можно вычислить фазы двух перекрывающихся пучков относительно друг друга. Повторяя измерения с кристаллом, ориентированным во многих направлениях, можно получить достаточно данных для расшифровки его пространственной структуры.

Хотя возможности применения многопучковой дифракции рассматривались уже несколько десятилетий назад, только в последние годы в связи с созданием синхротронных источников рентгеновского излучения и компьютеров для анализа данных удалось осуществить этот метод. Однако необходимо дальнейшее совершенствование метода. До сих пор удалось определить структуру только относительно небольших органических молекул, таких, как бензол. Усовершенствование методики измерений позволит, по мнению ученых, анализировать структуру молекул, не поддающихся исследованию двумя другими методами, широко применяемыми в настоящее время.

Один из них, называемый изоморфным замещением, включает процедуру ввода тяжелого атома (например, золота или свинца) в молекулу изучаемого вещества. Рентгеновское излучение, испытавшее сильную дифракцию на тяжелом атоме, интерферирует с излучением, слабо дифрагированным (поэтому имеющим другую фазу) легкими атомами (в основном атомами водорода, кислорода и углерода). «Декорируя» одну и ту же молекулу различными тяжелыми атомами и сравнивая полученные интерференционные картины, можно определить положения легких атомов в молекуле.

В так называемых прямых методах, разработанных в конце 50-х годов Дж. Карлом из Научно-исследовательской лаборатории ВМС США и Г. Хауптманом из Медицинского центра в Буффало, для расчета фазы применяется статистический анализ. Такой анализ выполняется с использованием соотношений между пятнами, получаемыми на фотопленке, когда положение кристалла изменяется путем вращения; например, если сумма пространственных координат трех пятен с близкими интенсивностями равна нулю, то сумма соответствующих фаз должна также равняться нулю. По мнению Карла, получившего вместе с Хауптманом в 1985 г. Нобелевскую премию по химии, в прямых методах используется теория вероятностей, поэтому они иногда приводят к ошибочным результатам. Если бы анализ на основе прямых методов удалось дополнить



«безусловными» данными многопучковых экспериментов, отмечает Карл, то «результаты оказались бы весьма плодотворными».

Карл считает также, что с помощью прямых методов нельзя надежно установить структуру молекул, состоящих более чем из 100 атомов, а метод изоморфного замещения, наоборот, хорошо «работает» только для молекул, содержащих более 400 атомов; к меньшим молекулам тяжелый атом присоединяется с трудом, причем часто это сопровождается искажением структуры. Если бы Колелла и Шен сумели применить свой экспериментальный метод к молекулам промежуточного размера, заключает Карл, «это было бы большим достижением».

### Генетика против диабета

**Б**ЛАГОДАРЯ двум генетическим исследованиям удалось продвинуться вперед в борьбе с инсулинзависимым диабетом. Одно из них по новому осветило причину этого заболевания, другое неожиданно поставило на твердую почву подход, который, похоже, сулит большие возможности в его лечении. Инсулинзависимый диабет, который считается аутоиммунным заболеванием, проявляет себя, когда вышло из строя по меньшей мере 90%  $\beta$ -клеток поджелудочной железы, производящих инсулин. Из-за недостатка инсулина повышается уровень глюкозы в крови.

Х. Макдевитт, Дж. Годд и Дж. Белл из Медицинской школы Станфордского университета обнаружили, что при замене одной аминокислоты в определенных белках, кодируемых генами HLA (от англ. human leukocyte antigen — лейкоцитарный антиген человека), риск заболеть диабетом значительно больше. Белки HLA располагаются на поверхности клеток и участвуют в инициации иммунного ответа. Гены этих белков в геноме сгруппированы в нескольких отдельных участках. Макдевитт и его коллеги сосредоточили свое внимание на участке HLA-D, поскольку у 95% больных инсулинзависимым диабетом присутствует один или оба аллеля гена HLA-D DR3 и DR4. Недавно полученные данные свидетельствуют, что аллели HLA-DQ, каждый из которых имеет тенденцию «сопровождать» определенный вариант DR, тоже тесно коррелируют с инсулинзависимым диабетом и, возможно, имеют более важную связь с заболеванием. (Индивидуум наследует по одному аллелю DR и DQ от матери и такой же набор от отца; каждый из четырех определяемых

этим аллелями белков состоит из двух полипептидных цепей —  $\alpha$  и  $\beta$ .)

Очевидная важность генов HLA-DQ побудила исследователей из Станфордского университета выяснить, какие аминокислотные последовательности кодируемых ими белков могут играть роль в диабете; статья об этом опубликована в журнале «Nature». Они начали со сравнения аминокислотных последовательностей, кодируемых двумя вариантами DQ, часто наследующимися совместно с геном DR4, — DQ $\omega$ 3.2, который обычен у диабетиков, и DQ $\omega$ 3.1, для которого нет такой корреляции. Оказалось, что эти гены различаются только в четырех положениях и все эти положения относятся к  $\beta$ -цепи кодируемого белка.

Дальнейший анализ был нацелен на выявление в аминокислотной цепи положений, имеющих отношение к диабету. Удалось установить, что аллель DQ $\omega$ 3.2, а также все другие варианты DQ, коррелирующие с инсулинзависимым диабетом, кодируют  $\beta$ -цепь, содержащую в положении 57 валин либо серин, либо аланин, но не аспарагиновую кислоту, а все те аллели DQ, которые лишь изредка встречаются у диабетиков, кодируют  $\beta$ -цепь с аспарагиновой кислотой в этом положении.

Кроме того, было обнаружено, что из 39 больных диабетом (случайно выбранных) ни у кого не было в генах DQ нуклеотидных последовательностей, кодирующих в положении 57  $\beta$ -цепи аспарагиновую кислоту, причем 90% из них унаследовали такие аллели DQ от обоих родителей. Исследователи сделали вывод, что наличие в геноме хотя бы одного гена DQ, кодирующего  $\beta$ -цепь с аспарагиновой кислотой в положении 57, обеспечивает устойчивость организма к инсулинзависимому диабету; два таких гена создают почти полную защиту, а если в аллелях DQ от обоих родителей нуклеотидные последовательности для аспарагиновой кислоты в положении 57  $\beta$ -цепи отсутствуют, это означает повышенную подверженность заболеванию.

Каким образом просто замена всего лишь одной аминокислоты в белке HLA-DQ способствует диабету? Предположительно, этот белок не единственный генетически обусловленный фактор, участвующий в развитии заболевания. Но молекулы белка HLA-DQ, не имеющие аспарагиновой кислоты в положении 57  $\beta$ -цепи, обладают, вероятно, иной пространственной структурой, чем прочие молекулы DQ. Возможно, это различие изменяет силу аутоиммунной атаки на поджелудочную железу.

Что касается лечения, то Р. Селден и его коллеги из Массачусетской больницы недавно добились того, что ген инсулина человека функционировал в организме мыши. Вначале ген человека был встроен вместе с генетическим маркером в плазмиду (кольцевую молекулу нехромосомной бактериальной ДНК). Затем эту плазмиду ввели в культуру фибробластов (клеток соединительной ткани) и клонировали клетки, в которых ген инсулина включился в состав клеточной ДНК и которые производили инсулин. Такие генетически модифицированные фибробласты инъецировали мышам, больным диабетом. У пяти из десяти животных в пределах недели уровень глюкозы в крови начал снижаться. Поскольку глюкоза удаляется из кровотока под влиянием инсулина, этот результат означал, что «пересаженный» ген функционировал, обеспечивая образование нормального инсулина. Уровень глюкозы продолжал падать на протяжении трех недель, после чего мыши умерли — по иронии судьбы от избытка инсулина.

Конечно, предстоит еще большая работа, прежде чем клетки, несущие ген инсулина, можно будет вводить людям для лечения диабета. Тем не менее тот факт, что пересаженные фибробласты производили инсулин, обнадеживает.

Издательство  
**МИР**  
предлагает:

К. Хеллан

**ВВЕДЕНИЕ В МЕХАНИКУ  
РАЗРУШЕНИЯ**

Перевод с английского  
Монография норвежского ученого, в которой изложены основные положения, методы и критерии линейной и нелинейной механики разрушения с уклоном в область практического применения. Книгу отличает сочетание простоты и доступности изложения с достаточной строгостью. Приведено большое количество задач с подробным решением.

1988, 22 л. Цена 3 р. 70 к.





# Искусство, иллюзии и зрительная система

*Обработка в мозгу информации о форме, цвете и пространстве  
осуществляется в трех независимых нервных путях.*

*Именно поэтому некоторые изображения  
могут порождать удивительные зрительные эффекты*

МАРГАРЕТ С. ЛИВИНГСТОН

**З**РЕНИЕ — это нечто гораздо более сложное, чем думают многие. Кажется вполне естественным уподобить зрение видеосъемке. Однако видеокамеры лишь регистрируют то, что попадает в объектив, и не могут ни интерпретировать, ни опознавать создаваемые ими изображения. Ни видеосистема, ни компьютеризованная телекамера — какими бы хитроумными они ни были — не могут сравниться со зрительной системой человека, обладающей свойством извлекать смысл из беспрестанно сменяющихся изображений. А это ее свойство в свою очередь обеспечивается способностью мозга синхронно перерабатывать огромное количество информации.

Результаты исследований, проведенных в последнее время, в том числе и те, что были получены моим коллегой Д. Хьюбелом и мной, позволяют предположить, что зрительные сигналы перерабатываются не одной иерархически организованной системой, а поступают по крайней мере в три различные системы мозга, каждая из которых имеет свою четко определенную функцию. Как нам представляется, одна из этих систем обрабатывает информацию о форме, другая — о цвете, а третья — о движении, локализации и пространственной организации. Похоже, что некоторые зрительные эффекты, которых добиваются художники и дизайнеры, обязаны своим происхождением именно такому анализу переносимой светом информации.

Представление о том, что информация в зрительной системе обрабатывается в нескольких путях, не является новым: по всей вероятности, оно родилось в начале прошлого века, когда ученые впервые обнаружили, что выходящий из глаза зрительный нерв разделяется на несколько ветвей. Кажется странным, что зрение может быть не единым, а множествен-

ным процессом, что восприятие формы объекта, его цвета, местонахождения и движения обеспечивается процессами, происходящими в разных частях мозга. И все же анатомические, физиологические и психологические исследования свидетельствуют именно об этом. Тот факт, что форма, цвет, местонахождение и движение объекта являются нам в единстве, хотя каждая из этих составляющих анализируется отдельно, возможно, не покажется необычным, если вспомнить, как мы наблюдаем говорящего человека. Мы слышим его голос и одновременно видим движения его губ, но не отдаем себе отчета в том, что зрительная и слуховая информации обрабатываются независимо.

**З**РИТЕЛЬНЫЙ процесс начинается с того момента, когда свет, прошедший через хрусталик глаза, падает на сетчатку — тонкий слой высокоспециализированной нервной ткани, находящийся на задней стороне глаза. Здесь свет попадает на клетки-фоторецепторы (палочки и колбочки) и преобразуется в электрические сигналы.

Палочки более чувствительны к свету, чем колбочки, и могут реагировать на очень слабый свет. Колбочки, работающие при более ярком свете, делятся на три типа в соответствии с тем, какой из трех пигментов они содержат. Пигменты колбочек поглощают свет в широком диапазоне длин волн, но максимум чувствительности для каждого из них лежит в своей части спектра. Колбочки одного типа наиболее чувствительны к коротковолновой части спектра (синий и зеленый цвета), колбочки второго типа — к средневолновой (зеленый цвет), колбочки третьего типа — к еще более длинным волнам (желтый, оранжевый и красный цвета).

На последующих стадиях анализа цвета избирательность к сигналу еще более возрастает благодаря сравне-

нию (оно производится путем вычитания) сигналов, идущих от колбочек всех трех типов. Поскольку сила сигнала от колбочки пропорциональна интенсивности света, она мало что говорит о цвете. Другое дело — сравнение сигналов от колбочек двух разных типов. Когда сильные сигналы от «красных» колбочек сопоставляются со слабыми сигналами от «зеленых» и «синих», человек видит красный цвет; равные по силе сигналы от «красных» и «зеленых» колбочек и слабые от «синих» дают желтый цвет, и т. д. Сопоставление длин волн осуществляется нейронами, причем частота импульсов нейрона возрастает при поступлении к нему сигналов от колбочек одного типа и замедляется сигналами от колбочек других типов. Конечный эффект представляет по существу разность воздействий от колбочек разных типов.

Когда уровень освещенности слишком низок для колбочек (например, ночью), возбуждаются более чувствительные палочки. Поскольку существует только один тип палочек, сравнение длин волн невозможно. Этим объясняется, почему при слабом освещении люди не различают цвета.

Прежде чем поступить в мозг, электрические сигналы от фоторецепторов перерабатываются вторым эшелом нервных клеток и затем передаются внутреннему слою клеток сетчатки, которые называются ганглиозными клетками (см. статью: Р. Масланд. Функциональная организация сетчатки, «В мире науки», 1987, № 2). В слое ганглиозных клеток происходит первое важное разделение зрительных путей. Этот слой содержит расположенные попеременно клетки двух типов, различающиеся по размеру (большие и малые) и по способу переработки информации, поступающей от колбочек. Большие клетки не различают сигналы, идущие от колбочек разных типов: они



суммируют все поступающие сигналы. Поскольку избирательностью к цвету они не обладают, можно считать, что они не различают цветов.

Малые клетки, напротив, определяют тип сигнала и производят вычитания сигналов. Это позволяет им передавать информацию о разных цветах. Например, ганглиозная клетка «красный-минус-зеленый» будет реагировать только на красный свет, хотя она может получать информацию от колбочек разного типа. В результате сигналы от ганглиозных клеток оказываются более избирательными к цвету, чем входные сигналы, полученные ими от колбочек.

Ганглиозные клетки передают свои сигналы по зрительному нерву к наружным колочатым телам — двум скоплениям нервных клеток в глубине мозга (каждое величиной с орешек). Наружные колочатые тела, как и слой ганглиозных клеток, состоят из нейронов двух классов, которые раз-

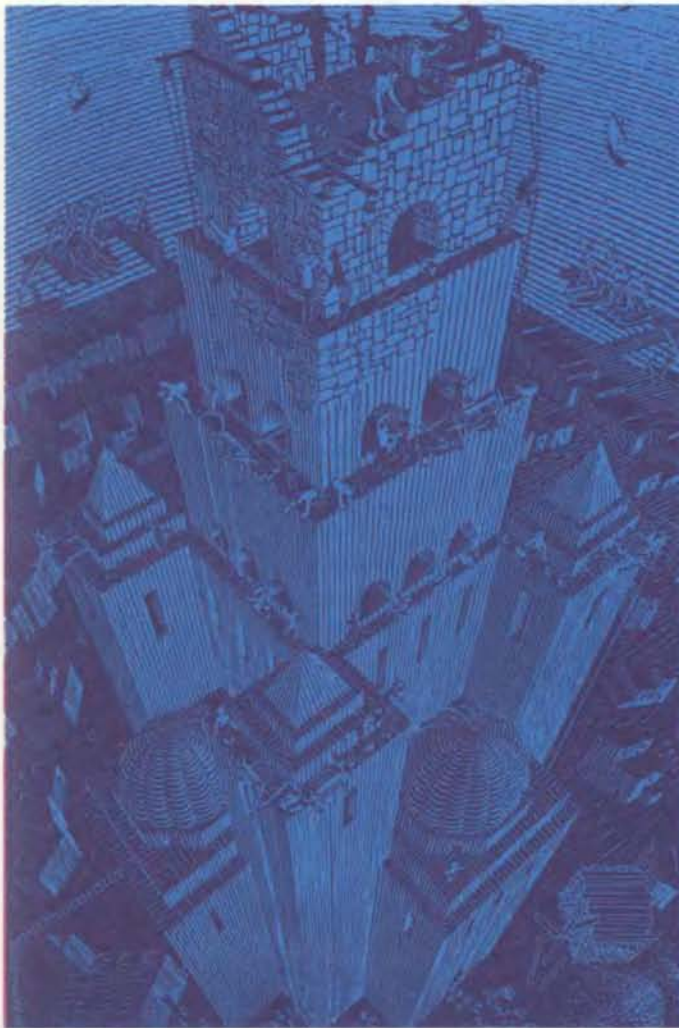
личаются по величине и типу сообщаемой ими информации. Однако в отличие от ганглиозного слоя сетчатки эти нейроны не перемешаны, а разделены пространственно на четкие группы. Группа мелких клеток (parvo-клеток) колочатого тела на входе получает информацию от малых ганглиозных клеток, а группа крупных (magno-клеток) — от больших ганглиозных клеток.

**РАБОТЫ**, выполненные в нескольких лабораториях, показывают, что эти два зрительных пути, которые мы будем называть parvo- и magno-системами, отличаются не только избирательностью к цвету, но также чувствительностью к контрасту, временем реакции и разрешающей силой. Magno-система более чувствительна к контрасту по яркости, время ее реакции меньше, а разрешающая сила ниже, чем у parvo-системы. Эти разительные отличия свойств зри-

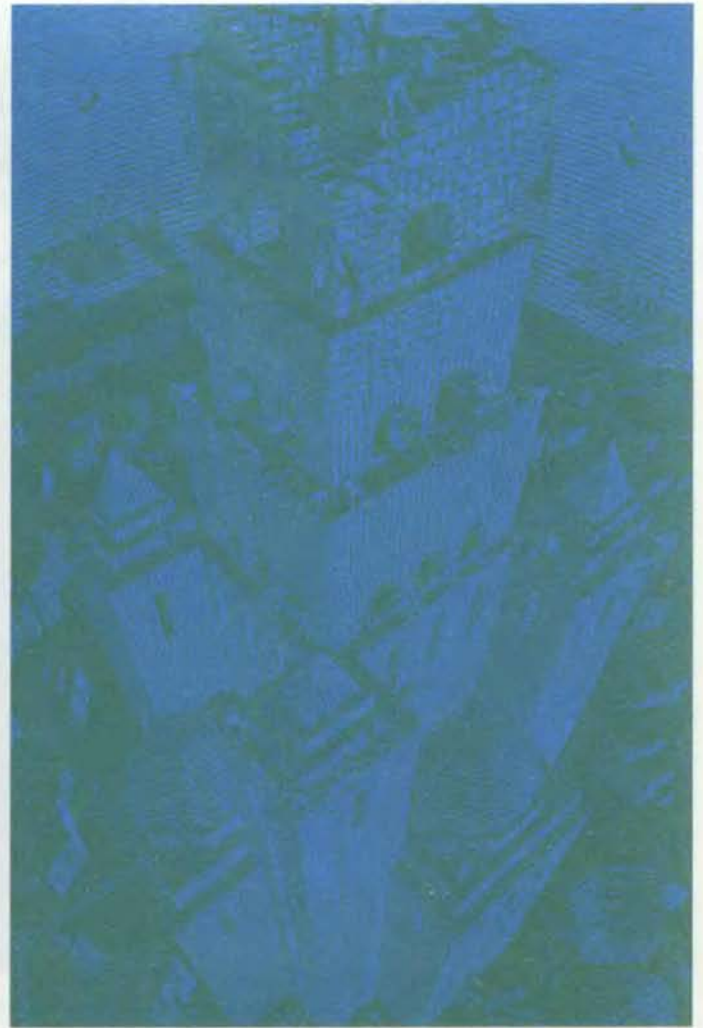
тельных реакций двух подразделов позволяют судить о различии выполняемых ими функций. Однако чтобы понять, что это за функции, необходимо рассмотреть их в рамках деятельности высших уровней зрительной системы.

Из наружных колочатых тел сигналы нейронов переходят в первую зрительную зону коры (зрительная зона-1). Эта зона представляет собой слоистый пласт нейронов размером с кредитную карточку, расположенную в затылочной части мозга. Путь электрических импульсов можно проследить до срединного слоя зрительной зоны-1, в котором происходит разделение зрительной информации. Сигналы от magno-системы направляются затем в верхнюю половину этого слоя, а от parvo-системы — в нижнюю.

Что происходит с информацией на ступени, следующей за этим разделением, стало ясно лишь недавно. Ис-



«ВАВИЛОНСКАЯ БАШНЯ» М. Эшера может служить иллюстрацией того, какую роль играет контраст яркости в восприятии глубины изображения. Цвета с различным уровнем яркости, в данном случае — синий и голубой (слева), порождают хорошо выраженный трехмерный образ.



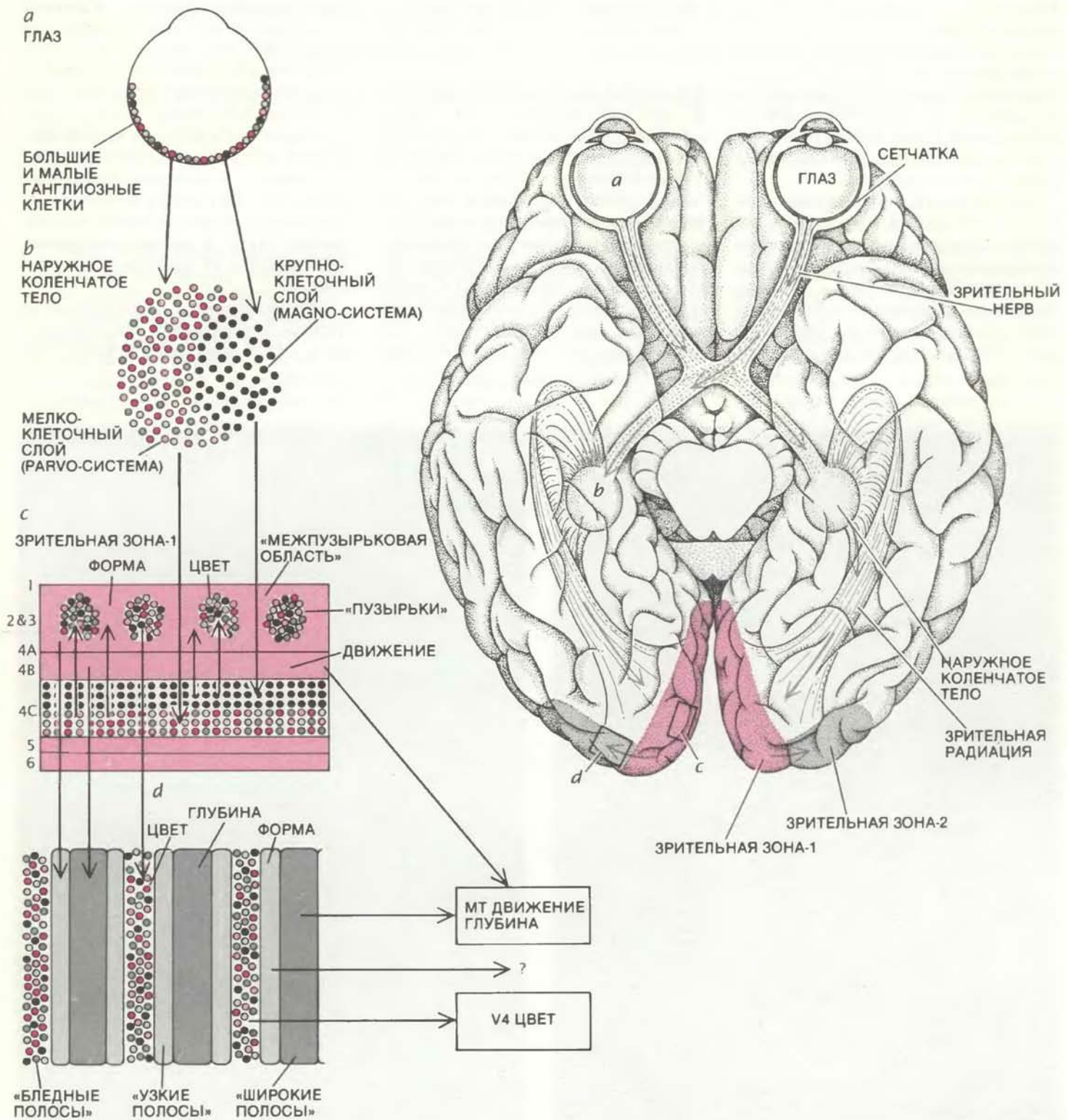
Если синий цвет заменить на оттенок зеленого (справа), имеющий яркость, близкую к яркости синего цвета, эффект глубины пропадет и картину будет вообще трудно разглядеть. Чтобы убедиться в идентичности двух изображений, достаточно взглянуть на них через синее стекло.



следователи понимали, что переработка информации в мозге на более высоких ступенях должна осуществляться в разных путях, поскольку было обнаружено разделение различных зрительных функций и в областях

выше зрительной зоны-1. С. Зеки из Университи-колледжа Лондонского университета нашел, например, в средней височной зоне мозга обезьяны зону, содержащую большое количество клеток, чувствительных к движе-

нию и стереоскопической глубине. Он также обнаружил еще одну зону, называемую зрительной зоной-4, которая, похоже, избирательно отвечает за восприятие цвета. До недавнего времени ничего не было известно о



**ЗРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ЧЕЛОВЕКА** состоит из трех отдельных путей. Входящий в глаз свет падает на сетчатку (а), где он преобразуется в электрические импульсы, поступающие в мозг по зрительному нерву. Первое разделение перерабатываемой информации происходит в наружных колленчатых телах (б), где мелкие клетки parvo-системы несут информацию о цветовом контрасте, а крупные клетки magno-системы — о контрасте по яркости. Из magno-системы информация поступает в слой 4В зрительной

зоны-1 (с), а затем в «широкие полосы» зрительной зоны-2 (д). Здесь из сигналов извлекается информация о движении объектов и глубине пространства. Из parvo-системы сигналы направляются в «междузвездчатую область» зрительной зоны-1 и затем в «бледные полосы» зрительной зоны-2, где извлекается информация о форме. Сигналы, идущие от parvo- и magno-систем, объединяются в «пузырьках»; там извлекается информация о цвете и яркости, которая поступает в зрительную зону-2 и зрительную зону-4.



взаимосвязи между разделением функций в этих высших зрительных зонах и в группах нейронов коленчатых тел. Исследования этих промежуточных уровней, выполненные Хьюбелом и мной, позволили, в известном смысле, решить головоломку.

Решающий факт был найден в 1978 г., когда М. Уонг-Райли из Калифорнийского университета в Сан-Франциско обнаружила, что окрашивание зрительной зоны-1 митохондриальным ферментом цитохром-оксидазой приводит к образованию тонкого рисунка из темных и светлых областей в верхних слоях этой зоны. Темные области имеют в сечении близкую к овальной форму и диаметр около 0,2 мм и организованы в своеобразную мозаику. Мы назвали их «пузырьками» (blobs), а окружающую их более светлую область — «между-пузырьковой областью» (interblob). После выделения этих подотделов оказалось возможным рассмотреть их взаимосвязи, а также реакции каждого из них. Два пути, выделенные на более низких уровнях, теперь как бы перестраиваются в три подотдела: «между-пузырьковая область» получает сигналы из рагво-системы, слой 4В получает сигналы из магно-системы, а сами «пузырьки» — из обеих.

Сначала мы проверили реакции этих подотделов зрительной системы-1 на зрительные стимулы с целью определить, какие характеристики стимула являются значимыми для каждого из них. Мы измеряли избирательные реакции различных нейронов на форму, локализацию, расстояние, движение, цвет, яркость и размер объектов и выявили весьма значительные различия между нейронами. «Пузырьки» содержат клетки, высоко избирательные к цвету и яркости и одновременно не избирательные к форме и движению. Клетки «между-пузырьковой области» могут реагировать, к примеру, на вертикальную полосу независимо от ее движения или окраски; единственным критерием реакции является вертикальность. Та же клетка не будет реагировать на полосу любой другой ориентации. Клетки слоя 4В также не избирательны к цвету, но зато избирательно реагируют на ориентацию и движение. Клетка этой системы может, например, реагировать либо на движение вверх горизонтальной полосы, либо на горизонтальное движение вертикальной полосы, но не на оба вместе.

**ЗАТЕМ** мы обратились к зрительной зоне-2 — области коры, которая примыкает к зрительной зоне-1 и получает сигналы от ее трех зрительных путей. При помощи уже упомянутого окрашивания мы обнаружили,

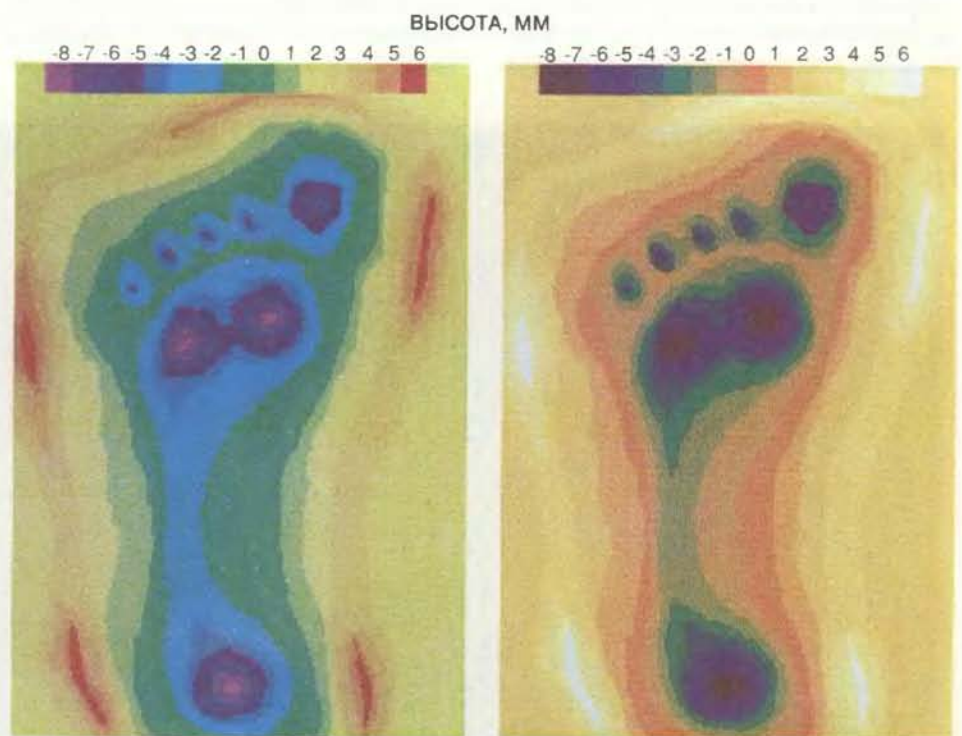


ТЕНИ могут быть любого цвета: для передачи глубины нужно только, чтобы они были темнее остальной части поверхности. Этот вывод иллюстрируется репродукцией «Автопортрета» А. Матисса. Зеленый цвет, использованный художником для теней на лице (слева), довольно необычен, но создаваемый им эффект трехмерности вполне нормален. На черно-белой фотографии этой картины (справа), видно, что тени действительно темнее остальной части лица.

что в зрительной зоне-2 можно также выделить три подотдела. Эти подотделы, однако, характеризуются по типам полос, возникающих при окрашивании всей области. Мы назвали их

«бледные полосы» (pale stripes), «узкие полосы» (thin stripes) и «широкие полосы» (thick stripes).

Измерив реакцию клеток разных полос на зрительные стимулы, мы



КОНТУРНЫЕ КАРТЫ часто выполняются в цвете, что позволяет легче сопоставлять любую точку изображения со шкалой высот—глубин. Для раскраски большинства таких карт используются цвета видимого спектра: красный — для высот, а фиолетовый — для глубин (слева). При такой шкале, однако, плохо просматривается форма объекта. Эту проблему можно решить, введя цветовую шкалу, основанную на относительных яркостях (справа), где величина яркости соответствует величине вертикального отклонения поверхности. На такой карте легко оценить и форму объекта, и высоты и глубины его элементов.



получили следующие результаты. Избирательные к цвету «пузырьки» зрительной зоны-1 посылают сигналы «узким полосам» зрительной зоны-2, где продолжается переработка информации о цвете. Избирательные к ориентации клетки «междупузырьковой области» подают сигналы «бледным полосам», перерабатывающим информацию таким способом, который позволяет предположить, что здесь осуществляется анализ формы. Магно-система передает свои сигналы «широким полосам», где перерабатывается информация о стереоскопической глубине.

С. Зеки и его коллега С. Шилп, а также Дж. Маунсел и Д. ван Эссен из Калифорнийского технологического института получили результаты, свидетельствующие о том, что все три зрительные пути остаются разделенными и на более высоких корковых уровнях. Они обнаружили, что «широкие полосы» проецируются на среднюю височную зону (MT) — область, связанную с восприятием движения и стереоскопической глубины (способность судить о глубине основана на различии изображений в правом и левом глазу), а «узкие полосы» — на зрительную зону-4 (V4), связанную с восприятием цвета. Однако пока остается неизвестным, куда проецируются «бледные полосы».

**ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ** факты, свидетельствующие о том, что восприятие цвета, движения и формы

осуществляется в различных путях, дает клиническая неврология. Локальные поражения мозга при инсультах могут порождать специфические формы слепоты: человек, например, теряет способность узнавать лица или лишается цветового зрения, но остается способным воспринимать форму. Цветовая слепота кортикальной природы — это редкий синдром, возникающий вследствие поражения некоторой области мозга, которая может соответствовать зрительной зоне-4. Поскольку blob-система несет информацию не только о цвете, но и о яркости, можно ожидать, что у больных с поражением системы цветового зрения вместе с нарушением восприятия цвета будет нарушена способность распознавать оттенки серого. Действительно, одна такая больная говорила, что все цвета для нее исчезли, а свежеснеженный снег видится ей серым и грязным.

Опираясь на эти физиологические и анатомические факты, можно описать вероятные функции трех отделов зрительной системы следующим образом. Parvo-interblob-pale-stripe-система несет высокоточную информацию о границах, образуемых контрастными цветами. Хотя нервные клетки первых ступеней этой системы и являются избирательными к цвету, клетки высших уровней реагируют на границы контрастных цветов, но не несут информации о самих цветах, образующих эти границы. Поскольку значительная часть информации о

форме объектов может быть представлена их границами, мы подозреваем, что эта система играет важную роль в восприятии формы. Медленное срабатывание системы и ее высокая разрешающая сила, вероятно, необходимы для способности видеть неподвижные объекты со всеми их деталями.

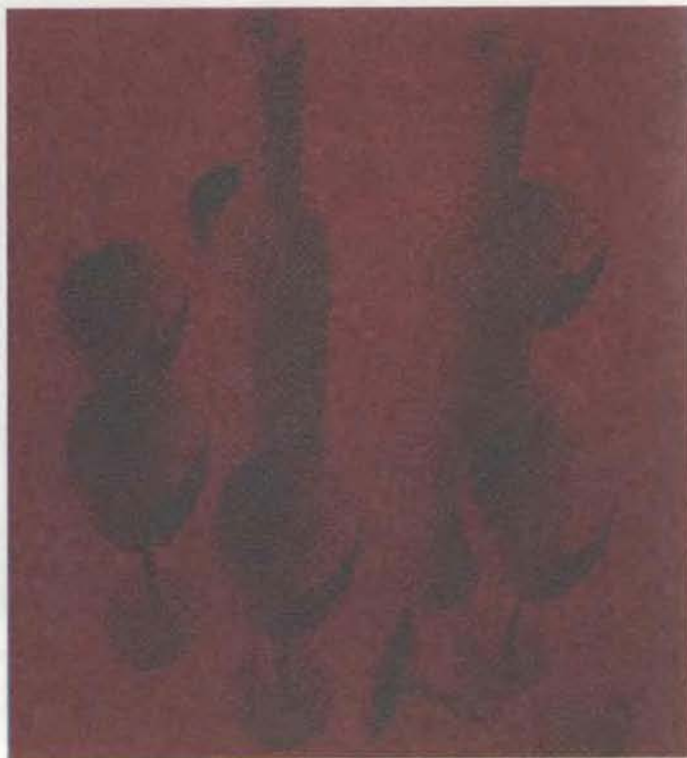
Blob-thin-stripe-V4-система обрабатывает информацию о цвете и оттенках серого, но не о движении, форме или глубине. Эта система обладает в несколько раз меньшей разрешающей силой, чем interblob-система, и поэтому определяет цвет объекта, но не детали его формы.

Magno-4B-thick-stripe-MT-система несет информацию о движении и стереоскопической глубине. Нейроны этой системы обладают очень маленьким временем реакции, но их ответы быстро затухают даже в присутствии неподвижного раздражителя, т. е. система специфически чувствительна к движущимся стимулам. Именно поэтому она хороша для обнаружения движения, но не годится для детальной проработки неподвижного изображения. Кроме того, она, вероятно, слепа к цвету: она не различает границ, выделяющихся только по цветовому контрасту.

Клетки parvo-системы различают красный и зеленый цвета при любой относительной их яркости. Напротив, клетки слепой к цвету магно-системы дают примерно такую же информацию, что и черно-белая фото-



ТЕНИ могут создавать ощущение глубины, как показано на изображении, построенном компьютером (слева). Если контраст не яркостный, а цветовой (справа), ощущение глу-



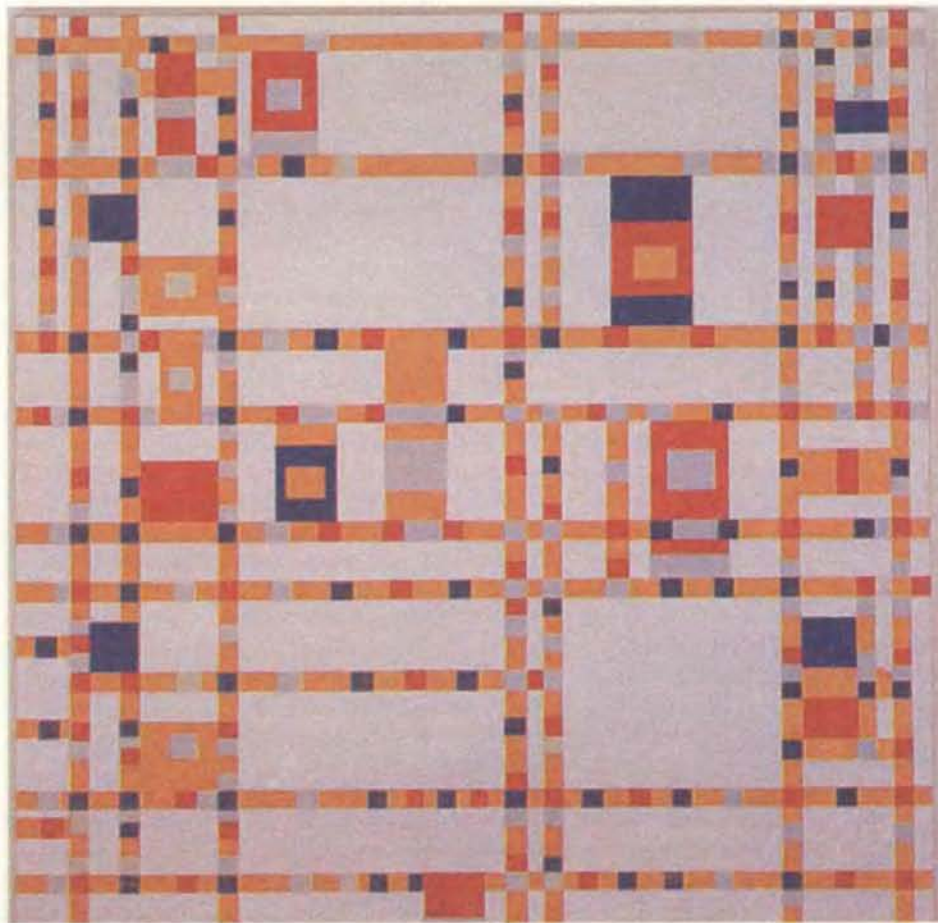
бины ослабляется. Это позволяет предположить, что восприятие глубины есть результат переработки информации слепой к цвету магно-системой.



графия: они сообщают о яркости поверхностей, но не об их цвете. Для любой пары цветов, например, красного и зеленого, существует свое отношение яркостей, при котором на черно-белой фотографии эти два цвета получаются как один и тот же оттенок серого, и граница между ними исчезает. Аналогично этому при некотором уровне относительной яркости красный и зеленый цвета идентичны для магно-системы. В этом случае они называются равнояркими. Граница между равнояркими цветами имеет цветовой контраст, но не имеет яркостного. Для каждого человека характерно свое отношение яркостей, при которых граница между двумя цветами становится невидимой для магно-системы (так же, как разные черно-белые пленки могут отличаться по чувствительности к разным цветам).

**Т**ОТ ФАКТ, что зрительная система разделена на три части, причем каждая имеет свои собственные характеристики, заставил нас с Хьюбелом предположить, что эти различия могут отражаться на человеческом восприятии. Мы решили проверить это предположение, исследовав те четыре свойства, которые отличают первые ступени магно- и parvo-системы: чувствительность к цвету и контрасту, разрешающая сила и скорость реакции. В частности, мы хотели узнать, является ли чувствительным восприятие движения и глубины к цвету и контрасту, и характерно ли для него низкое пространственное и высокое временное разрешение. Обзор психологической литературы более чем за сто лет исследований по зрительному восприятию дал нам ответы, которые удивительно хорошо легли в рамки представления о функциональном разделении, подтверждаемом анатомическими и физиологическими данными.

Ответ на один из наших вопросов был получен П. Каваной, К. Тайлером и О. Фавро из Монреальского университета, которые показали, что восприятие движения «страдает» цветовой слепотой. Они обнаружили, что при предъявлении на экране красных и зеленых движущихся полос, которые постепенно становятся равнояркими, либо воспринимаемая скорость движения резко уменьшается, либо полосы кажутся вообще неподвижными. В последующих экспериментах было обнаружено, что восприятие движения имеет малую резкость, высокую чувствительность к контрасту и большую скорость реакции. Все эти наблюдения подтверждают мысль о том, что восприятие движения — это функция главным образом магно-, а не parvo-системы.



ДЛЯ ОП-АРТА характерны «скачущие» изображения: цвета кажутся нестабильными, а элементы рисунка колеблющимися. Это явление связано с относительной яркостью цветов. На картине П. Мондриана «Буги-вуги на Бродвее» желтые полосы слабо отличаются по яркости от фона. Мозг не в состоянии приписать стабильное положение желтым полосам и те кажутся несколько «гуляющими».

К. Лю и Д. Фендер из Калифорнийского технологического института провели серию аналогичных экспериментов, в которых проверялась чувствительность стереоскопического зрения к цвету. Из-за того что глаза размещены на определенное расстояние, изображения трехмерной сцены на сетчатках глаз несколько различаются, и зрительная система интерпретирует это различие как расстояние до объектов. Лю и Фендер обнаружили, что, когда стереоскопические стимулы равноярки, люди не воспринимают глубину стереоскопических изображений. А из этого следует, что стереоскопическое зрение, как и восприятие движения, слепо по отношению к цвету. Некоторые другие аспекты стереоскопического зрения также соответствуют характерным чертам магно-системы.

Указанные результаты позволяют заключить, что эти две функции, очевидно, реализуются магно-системой. Было интересно выяснить, не образуют ли другие свойства зрения характерных групп. Стереоскопическое зрение остается излюбленным объектом исследования среди специалистов по физиологии зрения, — вероятно,

потому что стереоскопичность довольно просто выразить количественно. Однако различие сетчаточных изображений — не только не единственный, но и не обязательный ключ для восприятия глубины. В этом легко убедиться, закрыв один глаз. Когда при рассмотрении фотографии или картины двумя глазами вы ощущаете глубину, это значит, что ваша зрительная система подавляет или игнорирует стереоскопическую информацию, сообщаящую, что на самом деле картина плоская. Вот почему, как отметил еще Леонардо да Винчи, рассматривая картину одним глазом, можно усилить впечатление глубины.

Мы хотели узнать, являются ли другие, не стереоскопические признаки глубины ахроматическими для зрения. В эту категорию попадают такие признаки, как перспектива и относительные размеры объектов, относительное движение объектов (при повороте головы изображение более близких объектов на сетчатке сдвигается больше, чем изображение удаленных объектов), тени и градиции текстуры.

Мы обнаружили, что восприятию перечисленных признаков сопутству-



ет цветовая слепота, а это позволило предположить, что magno-система обрабатывает наибольшую долю информации о глубине.

**ТЕНИ** — важный признак для восприятия глубины и формы (именно поэтому так трудно разглядеть бугры на горнолыжной трассе в пасмурный день). В условиях естественного освещения тени различаются скорее по степени яркости, чем по цвету. Вот почему та часть зрительной системы, которая опознает формы по теням, не обязательно должна быть слепой к цвету; но нет никакой необходимости в том, чтобы она несла информацию о цвете. П. Кавана и его коллега И. Леклерк подтвердили это серией экспериментов, показав, что тени могут быть любого оттенка: для возникновения ощущения глубины достаточно только их яркостного отличия от остальной поверхности.

Возникает вопрос, почему magno-система должна реагировать как на движение, так и на множество признаков, по которым определяется расстояние до объекта и пространственные отношения. Почему одна и та же система реализует такой специфический набор функций? Один вероятный ответ дает психологическое направление начала века, известное как гештальтпсихология. Большинство изображений содержит богатый набор элементарных признаков различных типов: по-разному ориентированные края и поверхности, цвета и

текстуры. Сама возможность восприятия объекта предполагает, что различные взаимосвязанные (т. е. принадлежащие этому объекту) элементы должны быть организованы в одну группу.

Гештальтисты полагали, что это оказывается возможным благодаря использованию мозгом определенных видимых качеств объекта для группирования частей изображения и для отделения одного изображения от другого и от фона. Этими качествами являются: направление и скорость движения (элементы, движущиеся вместе, с большой вероятностью, принадлежат одному объекту), целостность линий (дом перцептивно не разделяется на две части из-за того, что его фасад пересекает телефонный провод), глубина (две границы могут соприкоснуться, но не принадлежать одному объекту, если не находятся на одном расстоянии от наблюдателя), освещенность и текстура (поверхность разных частей одного и того же объекта обычно имеет одни и те же свойства). Тот факт, что все эти функции не срабатывают при одинаковой яркости видимых объектов, позволило нам предположить, что способность соединять все части наблюдаемой сцены, выделять фигуру из фона и воспринимать истинные пространственные отношения объектов обеспечивается magno-системой. Мы высказали предположение, что magno-система сочетает визуальные качества объекта таким способом, ко-

торый позволяет видеть изображение в целом, а parvo-система высвобождается для восприятия деталей.

**КАКИЕ** следствия имеют эти предположения для искусства и дизайна? Хотя нейробиологическое объяснение многих из описанных здесь явлений появилось только в последнее время, художники и дизайнеры, похоже, уже давно пришли к их осознанию эмпирическим путем. Понимание того, как мозг обрабатывает зрительную информацию, может облегчить задачу художников и дизайнеров, стремящихся достичь определенного эффекта своими работами.

Весьма вероятно, например, что некоторые специфические эффекты произведений оп-арта (op-art, сокращение от optical art — оптическое искусство) порождаются такими сочетаниями цветов, которые являются мощными активаторами parvo-системы, но слабыми стимулами для magno-системы. Равнояркий с фоном объект выглядит вибрирующим и нестабильным. Причина в том, что parvo-система сообщает о форме объекта, а magno-система не «видит» его границу и поэтому не может точно определить, движется ли объект и где он находится. В результате зрителю кажется, что изображение ползет, колеблется или скачет по полотну.

Ключевые слова в рекламных объявлениях часто даются цветом, равноярким фону. Хотя в таких условиях читать текст труднее, странные дрожание слова привлекают к себе внимание. Пришли ли создатели рекламы к такому решению случайно, эмпирически или осознанно, результат один: читатель задерживает взгляд, чтобы понять эти слова.

Те же принципы применимы и к моде. Общее впечатление от фасона платья может быть усилено линиями на материале платья или отделке, но для достижения эффекта линии должны быть контрастными по яркости: чем больше контраст, тем больше эффект. И наоборот, фасон не будет «взаимодействовать» с линиями на ткани, если последние образованы равнояркими цветами. Так, например, платье в горизонтальную полоску не будет делать женщину ниже ростом и полнее, если полосы выполнены в равноярких цветах или если они очень узкие. Сочетание бледно-зеленой блузы Kelly с бледно-синими брюками «goyal» дает вибрирующую, неустойчивую горизонтальную границу цветов, которая не привлекает глаз и не вносит особых дополнений в общее впечатление от фасона одежды. Но сочетание тех же брюк с блузкой другого цветового оттенка — на-



**СМЕШЕНИЕ ЦВЕТОВ** происходит, когда рисунок имеет слишком тонкую фактуру элементов. Например, на картине Ж. Сэра (слева) точки достаточно крупны, чтобы их могла разрешить система опознавания формы, но слишком малы для системы цветового зрения. При рассмотрении картины с близкого расстояния (справа) точки становятся видимыми для обеих систем, и цвета не смешиваются.



пример, небесно-голубого или морской волны — привлекает глаз к границе цветов и в целом фигура кажется менее высокой.


Избирательная к цвету blob-система имеет во много раз меньшую разрешающую силу, чем interblob-система. Это позволяет объяснить явление, известное по крайней мере столет: два цвета, в зависимости от их пространственной организации, могут оказывать полностью противоположное влияние друг на друга. Если два цвета просто соседствуют, они обычно «противостоят» друг другу, и каждый из них кажется менее похожим на другой (т. е. выглядит дополняющим другой цвет). В то же время, если в тонкой фактуре рисунка эти же цвета представлены множеством маленьких точек, эффект будет обратным: они становятся более похожими друг на друга, смешиваются или «сливаются». Мы считаем, что смешивание происходит в тех случаях, когда разрешающая сила цветовой системы слишком мала для выявления тонких цветовых деталей.

Аналогичный эффект возникает при рассмотрении цветных журнальных иллюстраций: зрительная система человека не в состоянии различить микроскопические точки, из которых построено изображение. Заметить это явление можно лишь тогда, когда изображение выполнено, например, мелкими мазками в стиле импрессионизма или точками в стиле пуантилизма: в этом случае точки все еще слишком малы, для того чтобы их могла разрешить система опознавания цвета, но достаточно велики, чтобы их различала система опознавания формы. Наблюдатель при этом видит отдельные мазки или точки, хотя цвета для него смешиваются. Существует, таким образом, узкий диапазон размеров «структур», в пределах которого человек может различать эти структуры, но не способен разрешить на детали дискретные цветовые «пятна». Границы этого диапазона определяются разностью разрешающих сил системы опознавания цвета и системы опознавания формы. Аналогичное смешение цветов без слияния всего рисунка можно наблюдать на некоторых тканях — например, твиде и ткани в тонкую полоску.

На телевидении пользуются тем, что цветовая система имеет меньшую разрешающую силу, и передают цветовую часть изображения с меньшим разрешением, чем черно-белую, уменьшая, таким образом, количество информации, которое необходимо передать. Меньшая острота цветового зрения объясняет также, почему художники, работающие акварелью



НЕТОЧНОЕ НАНЕСЕНИЕ красок, как на акварели «Мать и дитя» П. Пикассо, не мешает зрительной системе приписывать определенные цвета изображенным объектам. Зрителю кажется, что раскраска следует рисунку в гораздо большей степени, чем на самом деле. Этот прием особенно подходит для акварели и пастели, поскольку бледные цвета не создают резкого контраста с фоном.

ЗРИТЕЛЬНЫЙ ПУТЬ (СИСТЕМА)	ИНФОРМАЦИЯ	
BLOB	ЦВЕТ 	
PARVO-INTERBLOB	НЕПОДВИЖНАЯ ФОРМА (ВЫСОКАЯ РАЗРЕШАЮЩАЯ СИЛА) 	ЦЕЛОСТНОЕ ЗРИТЕЛЬНОЕ ВОСПРИЯТИЕ 
MAGNO	ДВИЖЕНИЕ И ГЛУБИНА 	

ЗРЕНИЕ — это система, состоящая из трех частей. Цвет перерабатывается в blob-системе, восприятие статических форм в parvo-interblob-системе, движение и глубина — в magno-системе. Конечные результаты интегрируются в одно целое и человек видит единый трехмерный мир.



или пастелью, могут весьма приблизительно заполнять цветом оконтуренные части плоскости рисунка: зрительный эффект все равно остается таким, как если бы такая часть была прописана цветом строго в пределах контура.

**З**НАНИЕ о разделении функций в зрительной системе может быть полезно художникам, дизайнерам и специалистам по рекламе. Оно может быть использовано также при разработке систем слежения, для повышения читаемости расплывчатых, слабконтрастных или камуфлированных изображений, а также при разработке видеосистем для роботов или автопилотов. Чувствительность magno-системы к цветовому контрасту, движению и глубине подсказыва-

ет, что видимость плохо различаемых объектов можно повысить, вводя движение (объекта или наблюдателя) или стереоскопию (одновременное предъявление двух изображений одной и той же сцены, полученных с двух разных точек наблюдения). Такой подход может помочь рентгенологом в более точной интерпретации нечетких изображений на рентгенограмме.

До настоящего времени лишь немногие аспекты психологии восприятия и эстетики могли быть сопоставлены с тем, что было известно о переработке информации мозгом. Теперь ситуация меняется: между искусством, психологией и нейробиологией начинает происходить взаимовыгодный обмен идеями.

## Наука и общество

### Эффективность под вопросом

**Х**ОТЯ возможности рентгеновского лазера уничтожить ракеты еще не продемонстрированы, это оружие уже доказало свою способность причинять неприятности тем, кто работает по программе СОИ. Президент Рейган заявил, что эта программа сделает ядерное оружие «устаревшим и бесполезным», тем не менее рентгеновский лазер сам по себе является ядерным оружием. По существу это атомная бомба, заключенная в систему металлических стержней. При взрыве бомбы стержни спускают рентгеновское излучение, достаточно сильное, чтобы разрушить ракеты с расстояния в тысячи километров.

Главным инициатором разработки этого оружия является Эдвард Теллер, известный как отец водородной бомбы и основатель Ливерморской национальной лаборатории им. Лоуренса. Как полагают, именно Теллер убедил Рейгана, что создание системы типа СОИ, и в частности рентгеновского лазера, является осуществимой задачей. Исследования, связанные с разработкой рентгеновского лазера и оружия с ядерной накачкой, каждый год «съедают солидный кусок (600 млн. долл.) пирога» СОИ. Значительная часть средств расходуеться на проведение подземных взрывов экспериментальных устройств на испытательном полигоне в шт. Невада.

Споры вокруг технических возможностей рентгеновского лазера стали вестись открыто три года назад. Согласно информации, просочившейся

из Ливерморской национальной лаборатории им. Лоуренса (занимающей ведущее место среди лабораторий, работающих над созданием оружия), в подземных испытаниях в марте 1985 г. были получены рентгеновские лучи, имевшие в миллионы раз большую яркость по сравнению с лучами, полученными в предыдущих испытаниях. Эта информация (техническая сторона программы строго засекречена) привела к появлению анонимных утверждений, согласно которым приборы, использованные для измерения яркости рентгеновских лучей, были неточными. Члены конгресса призвали прекратить испытания рентгеновского лазера, однако они не прекратились, и оценка связанных с ними затрат, проведенная Центральным финансовым управлением, оказалась неполной.

Рентгеновский лазер недавно вновь вызвал оживленные дискуссии. Два физика, работающие по программе СОИ, — Рой Д. Вудруфф, бывший помощник директора, и В. Лоуэлл Морган, научный сотрудник, — заявили, что Теллер и другие ученые из Ливерморской лаборатории ввели в заблуждение представителей из Вашингтона относительно состояния исследований. Вудруфф не сразу решил на этот шаг. Весной прошлого года он написал секретное письмо в Калифорнийский университет, где находится управление Ливерморской лабораторией от министерства энергетики, утверждая в нем, что Теллер и Лоуэлл Л. Вуд-младший, руководитель главной группы разработчиков оружия в Лаборатории, «сделали слишком оптимистические, технически

неверные выводы, касающиеся этого исследования, которые они сообщили высшим политикам страны».

По словам Вудруффа, директор Лаборатории Роджер Е. Батзел «отказался скорректировать техническую информацию или позволить мне сделать это». После того как Вудруфф попросил назначить его на другую должность, Батзел понизил его в должности и делал минимальные прибавки к его заработной плате. Жалобы Вудруффа были опубликованы после того, как Федерация ученых Южной Калифорнии получила копию его письма от неизвестных лиц и передала его прессе.

Представители Ливерморской лаборатории и Калифорнийского университета определяют спор как «личное дело» и «закономерное расхождение мнений известных ученых». Теллер, Вуд и Батзел отказываются от дальнейшего комментария. Однако к мнению Вудруффа о неверном представлении данных о состоянии исследований присоединился Морган, занимавшийся разработкой рентгеновского лазера с 1981 по 1985 г. Морган, который в настоящее время является также сотрудником Колорадского университета в Боулдере, изложил свою точку зрения в письме члену палаты представителей от шт. Калифорнии Джорджу Е. Брауну-младшему. Испытания рентгеновского лазера, указывал Морган, «дали незначительные (по обычным стандартам в физике) результаты при вложении огромных усилий и, по моему мнению, безнравственном вложении денег». «Небольшое число научных результатов, которым мы располагаем, — сказал он, — было представлено в ложном свете». Морган также заявил, что представители Центрального финансового управления и JASON, группы консультантов министерства обороны, ознакомились только с теми данными, которые были «подтасованы и сделаны привлекательными».

В отдельных интервью журналу «Scientific American» Вудруфф и Морган выражают мнение, что в заявлении Рейгана, сделанном в 1983 г., придается слишком большое значение тому, что пока дало малообещающие результаты. После этой речи президента, заявил Вудруфф, «представления Теллера и Вуда обрели почти маниакальный характер». Морган отметил, что «по ажиотажу, последовавшему после речи Рейгана, стало ясно, что все это — пустое дело».

Вудруфф был по крайней мере частично реабилитирован: недавно Калифорнийский университет сообщил, что он был несправедливо понижен в должности, и распорядился, чтобы



его перевели на более высокую должность в Ливерморской лаборатории.

### Дисплеи и телевизоры с плоским экраном

**П**ЛОСКИЕ экраны, уже давно обещающие прийти на смену объемным вакуумным электронно-лучевым трубкам, используемым в современных телевизорах и дисплеях для компьютеров, все активнее пробивают себе дорогу в жизнь. На рынке уже появились миниатюрные цветные телевизоры с плоскими экранами. А недавно одна японская фирма продемонстрировала дисплеи с цветным изображением, у которых размер экрана по диагонали составляет 36 см. Как утверждает У. Кэффери из фирмы Gartner Group, Inc. в Стамфорде (шт. Коннектикут), оказывающей консультативные услуги в области вычислительной техники, дисплеи с плоским экраном «близки к моменту своего старта». Похоже, что, как в производстве многих других товаров широкого потребления, Япония и здесь окажется первой.

Одна из технических новинок в этой области, плазменный дисплей, создает яркий красный свет за счет ионизации газа. Такие монохроматические плазменные дисплеи находят применение в некоторых портативных компьютерах. Ряд японских фирм продемонстрировал цветные дисплеи, в которых облученный ультрафиолетовым светом слой фосфора светится всеми цветами видимого спектра. Кристаллические материалы, светящиеся под действием возбуждающего излучения, составляют основу «электролюминесцентных» компьютерных дисплеев с желтым свечением; разрабатываются также основанные на этом принципе модификации цветных дисплеев. Существенным недостатком как плазменных, так и электролюминесцентных дисплеев является высокое потребление энергии.

Техническое усовершенствование дисплеев на жидких кристаллах — это, пожалуй, наиболее перспективное направление в развитии технологии изготовления плоских экранов. В дисплеях с плоским жидкокристаллическим экраном тонкий слой органического вещества, цилиндрические молекулы которого стремятся принять одинаковую ориентацию (один из видов порядка расположения молекул в кристаллической решетке), помещается в зазор между двумя стеклянными пластинами, которые в свою очередь располагаются между двумя поляризаторами со скрещенными осями поляризации. Доминирующая ориентация молекул на одной

стороне слоя жидкого кристалла повернута на  $90^\circ$  по отношению к ориентации молекул на другой его стороне (твист-ориентация), так что этот слой поворачивает поляризацию света, падающего на один поляризатор, давая ему возможность пройти через второй.

Одна из стеклянных пластин, прилегающая к жидкому кристаллу, имеет тонкие вертикальные, а другая горизонтальные электроды. Если к любой паре вертикального и горизонтального электродов приложить электрическое напряжение, то на их пересечении возбуждается пиксел, элемент изображения, в результате чего молекулы в этом месте изменяют свою ориентацию, и они уже не поворачивают поляризованный свет. Теперь свет «заперт» поляризаторами со скрещенными осями: светлый пиксел изменяет свой цвет, и нам он кажется темным. Установив цветные поляризационные фильтры, можно получить цветное изображение.

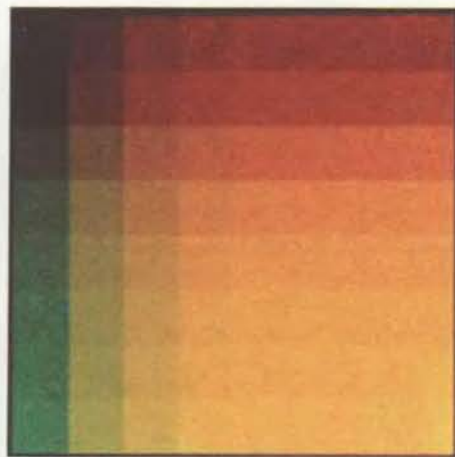
Самые простые жидкокристаллические дисплеи с черным или зеленым изображением на сером фоне обычно используются в цифровых часах и миниатюрных компьютерах. Они имеют ограниченный угол зрения; на экранах большого размера, у которых контраст и без того невысокий, он еще больше уменьшается за счет того, что электрический заряд, предназначенный для «включения» определенного пиксела, возбуждает другие пиксели. Новый «сверхтвистовый» жидкий кристалл способен поворачивать направление ориентации молекул на  $270^\circ$  и тем самым улучшать контраст.

Мерцание — еще одна проблема, возникающая с увеличением размеров экрана. Оно возникает вследствие того, что в данный момент задействованным может быть только один ряд пикселов, а при отсутствии заряда молекулы стремятся вернуться в положение покоя. Сейчас ведутся интенсивные исследования «ферроэлектрических» жидких кристаллов, поскольку благодаря своим особым характеристикам молекулы этих материалов имеют такое расположение, при котором они обладают «памятью»; за счет этого свойства мерцание исключается. Такие молекулы к тому же испытывают меньшее влияние утечки тока, что способствует получению высокого контраста изображения.

Высокую контрастность имеют так называемые матричные жидкокристаллические экраны. Изображение на таком экране формируется с помощью специальных электронных управляющих устройств. В обычной матричной системе в экран встроены тонкопленочные транзисторы: каж-

дый транзистор управляет одним пикселом, включая или выключая его. Однако низкий выход качественных транзисторов сдерживает производство таких экранов большого размера. Каждый транзистор (а в дисплее с экраном, как у телевизора, их число может достигать нескольких сот тысяч) должен работать безукоризненно. Самые большие матричные панели, которые в настоящее время имеются в продаже (подобные той, что установлена в портативном цветном телевизоре японской фирмы Sharp), имеют размер по диагонали не более 7,5 см, и притом они очень дорогие.

Американские компании, занимающиеся разработкой матриц, в основном ориентируются на применение их в военной технике (например, для оснащения кабин истребителей), где высокие требования предъявляются к таким параметрам, как разрешение, видимость и вес, а стоимость может быть любой. Экран с диагональю 15 см и числом элементов изображения, достигающим миллиона, был продемонстрирован фирмой General Electric, а фирма Ovonic Imaging Systems, Inc. в настоящее время разрабатывает матрицу с размером по диагонали 20 см. Характерно, замечает Кэффери, что Япония, которая ориентируется на спрос потребителя, пускает выручку от продажи портативных телевизоров с плоским экраном на разработку способов дешевого производства дисплеев большого размера. Но все равно, как утверждает Дж. ван Раальт, представитель Общества производителей дисплеев для информационных систем, замена электронно-лучевой трубки в бытовых телевизорах на плоские экраны может произойти не ранее, чем через 15 лет.



**ТОНКОПЛЕНОЧНЫЙ** электролюминесцентный дисплей, разработанный фирмой Planar Systems, Inc. в Бивертоне (шт. Орегон). Светоизлучающий слой выполнен из кристаллического материала. Плоский экран имеет размер по диагонали около 15 см, а его толщина не превышает 2 см.



# Трансформатор

*Сто лет назад это не приметное устройство позволило осуществить на практике распределение электроэнергии. Хотя современная электротехника немыслима без этого устройства, оно остается одним из «невоспетых героев» в истории технического прогресса*

ДЖОН У. КОЛТМЕН

**Н**АУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ революция, определявшая развитие цивилизации в течение последнего столетия, явилась следствием фундаментальных открытий и изобретений в области электротехники, связи и транспорта. Такие средства связи и транспорта как телефон, телевизор и самолет прочно вошли в нашу повседневную жизнь. А вот изобретение, благодаря которому мы получили доступ к электроэнергии, остается как бы в тени, хотя и играет в нашей жизни очень важную роль. Это устройство не приметно, оно не движется, работает практически бесшумно и, как правило, скрыто от наших глаз в подземных помещениях или за экранящими перегородками.

Речь идет об устройстве, называемом трансформатором. Изобретенный в конце XIX в. трансформатор является одним из ключевых компонентов современной электроэнергетической системы. Он преобразует высокие напряжения в низкие (и наоборот) почти без потерь энергии. Это преобразование имеет важное значение, поскольку электроэнергия наиболее эффективно передается при высоком напряжении, а производится и потребляется при низком. Если бы не трансформаторы, то расстояние между генератором и потребителями электроэнергии должно бы быть минимальным. На бесчисленных промышленных предприятиях и в жилых домах пришлось бы устанавливать свои собственные электростанции, и в целом электричество не было бы столь практичным источником энергии.

Помимо той роли, которую трансформатор играет в системах передачи электроэнергии, он является также важным элементом многих электрических приборов и механизмов. Зарядные устройства и игрушечные железные дороги, радиоприемники и телевизоры — почти в каждом из них используются трансформаторы, которые либо понижают, либо повышают напряжение. Среди них можно встре-

тить как совсем крошечные, не более горошины, так и настоящие гиганты массой 500 т и более. В нашей статье мы сосредоточим внимание на трансформаторах, применяемых в системах передачи электроэнергии, однако общие принципы, на которых основано действие трансформаторов, одни и те же независимо от размеров и области применения этих устройств.

Явление, лежащее в основе действия электрического трансформатора, было открыто английским физиком Майклом Фарадеем в 1831 г. при проведении им основополагающих исследований в области электричества. Спустя примерно 45 лет появились первые трансформаторы, содержавшие все основные элементы современных трансформаторов, что явилось настоящей революцией в молодой тогда области электротехники, связанной с созданием цепей электрического освещения. На рубеже веков электроэнергетические системы переменного тока стали уже общепринятыми и трансформатор играл ключевую роль в передаче и распределении электроэнергии.

И все же история развития трансформатора не окончилась в конце прошлого века. Современные трансформаторы превосходят своих предшественников, созданных к началу нынешнего столетия, по мощности в 500, а по напряжению в 15 раз; их масса в расчете на единицу мощности снизилась приблизительно в 10 раз, а коэффициент полезного действия, как правило, превышает 99%. Эти достижения отражают тот «счастливый союз» теоретических исследований и инженерных разработок, который позволил сначала понять, а затем и поставить на службу человеку явление, лежащее в основе действия трансформатора.

**В** СВОИХ экспериментах Фарадей был вдохновлен более ранними исследованиями датского физика Ханса Кристиана Эрстеда, который в 1820 г. установил, что ток, проходя-

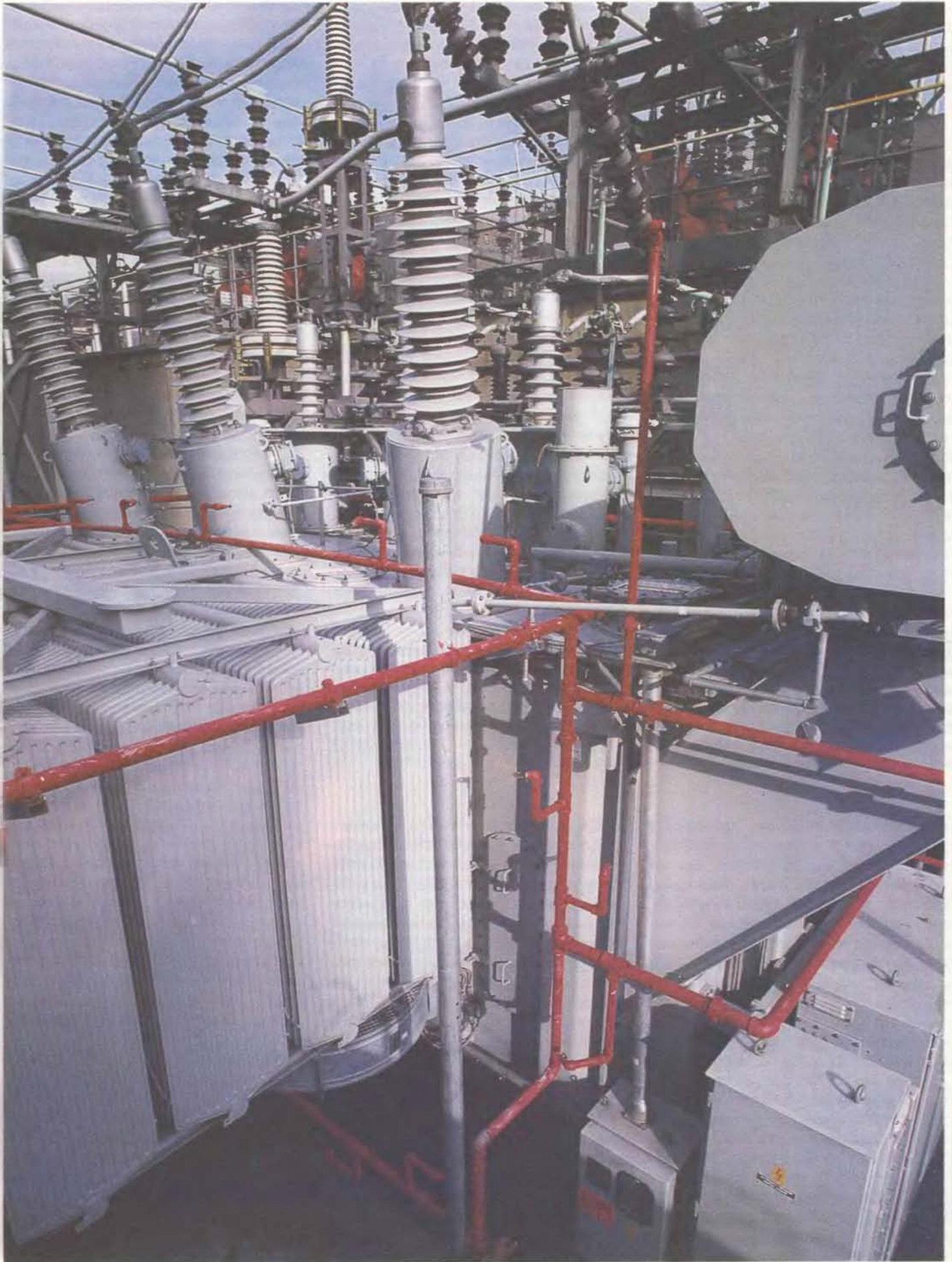
щий по проводнику, создает вокруг него магнитное поле. Открытие Эрстеда было воспринято с большим интересом, поскольку электричество и магнетизм считались до этого проявлениями совершенно различных и независимых друг от друга сил. И уж если электрический ток мог порождать магнитное поле, то казалось вполне вероятным, что магнитное поле в свою очередь могло порождать электрический ток.

В 1831 г. Фарадей показал, что для порождения магнитным полем тока в проводнике необходимо, чтобы поле было переменным. Фарадей изменял напряженность магнитного поля, замыкая и прерывая электрическую цепь, порождающую поле. Тот же эффект достигается, если воспользоваться переменным током, т. е. током, направление которого меняется со временем. Это явление взаимодействия между электрическими и магнитными силами получило название электромагнитной индукции.

Понятие электромагнитной индукции проще всего можно объяснить при помощи силовых линий. Этот термин был введен Фарадеем для описания направления и силы магнитного поля. Силовые линии магнитного поля, порождаемого витком провода (или контуром) с током, показаны на рисунке на с. 70. Если в изменяющееся магнитное поле поместить другой, независимый от первого, контур, то в последнем возникает электродвижущая сила (эдс), пропорциональная скорости изменения количества силовых линий, охватываемых контуром. Если контур имеет два витка, то эдс увеличивается вдвое, если три витка — втрое и т. д.

В трансформаторе обмотка из витков провода, которая подключена к источнику питания и которая порождает магнитное поле, называется первичной. Другая обмотка, в которой под действием этого поля возникает эдс, называется вторичной. Индукция между первичной и вторичной обмоткой взаимна, т. е. ток, протекающий

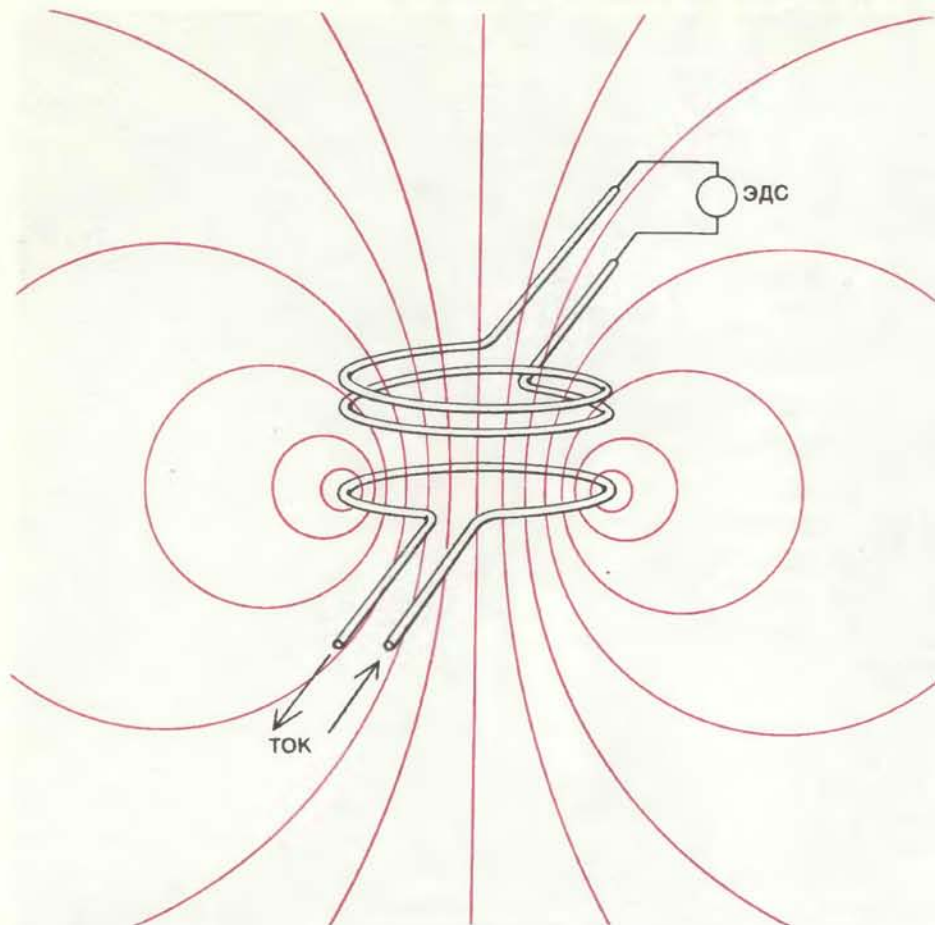




ТРАНСФОРМАТОР, установленный на нью-йоркской городской электростанции, преобразует низкое напряжение в высокое для передачи электроэнергии по высоковольтным линиям. Радиаторы (слева) служат для охлаждения трансформатора, а через цилиндрические проходные изо-

ляторы к нему подведены входные и выходные линии. Трансформаторы, установленные в различных районах города, понижают напряжение до уровней, пригодных для распределения и потребления электроэнергии (см. рисунок на с. 74 и 75).





СИЛОВЫЕ ЛИНИИ служат для изображения магнитного поля, создаваемого контуром провода (первичным), по которому течет ток. Второй контур (вторичный), помещенный в магнитное поле первого, охватывает силовые линии магнитного поля (показано цветом). Если магнитное поле изменяется, например когда по первичному контуру течет переменный ток, во вторичном контуре возникает электродвижущая сила (эдс). Это явление, известное под названием электромагнитной индукции, лежит в основе действия трансформатора.

во вторичной обмотке, индуцирует эдс в первичной точно так же, как первичная обмотка индуцирует эдс во вторичной. Более того, поскольку витки первичной обмотки охватывают свои собственные силовые линии, в них самих возникает эдс. Это явление, называемое самоиндукцией, наблюдается также и во вторичной обмотке.

На явлении взаимной индукции и самоиндукции основано действие трансформатора. Для эффективной работы этого устройства необходимо, чтобы между его обмотками существовала почти идеальная индуктивная связь и каждая из них обладала высокой самоиндукцией. Это означает, что почти все силовые линии магнитного поля, охватываемые первичной обмоткой, должны также охватываться и вторичной, и что число силовых линий, порождаемых каждой обмоткой при заданной скорости изменения силы тока, должно быть высоким. Обоим этим условиям можно удовлетворить, намотав первич-

ную и вторичную обмотки на железный сердечник так, как это сделал Фарадей в своих первых экспериментах. Железо увеличивает количество силовых линий магнитного поля приблизительно в 10 000 раз. О материалах, обладающих таким свойством, говорят, что они имеют высокую магнитную проницаемость. Кроме того, железный сердечник локализует поток магнитной индукции, благодаря чему обмотки трансформатора могут быть пространственно разделены и все же оставаться индуктивно связанными.

В идеальном трансформаторе все силовые линии проходят через все витки обеих обмоток, и поскольку изменяющееся магнитное поле порождает одну и ту же эдс в каждом витке, суммарная эдс, индуцируемая в обмотке, пропорциональна полному числу ее витков. Если в трансформаторе не происходит потери энергии, мощность в цепи вторичной обмотки должна быть равна мощности, подводимой к первичной обмотке. Дру-

гими словами, произведение напряжения на силу тока во вторичной обмотке должно быть равно произведению напряжения и тока в первичной. Таким образом, токи оказываются обратно пропорциональными отношению напряжений в двух обмотках, и, следовательно, отношение токов обратно пропорционально отношению числа витков в обмотках. (Такой подсчет мощности справедлив лишь в том случае, если токи и напряжения совпадают по фазе; условие высокой самоиндукции обеспечивает пренебрежимо малую величину токов, не совпадающих по фазе).

Идеальный трансформатор представляет для инженеров-электриков инструмент, аналогичный рычагу в механике, но вместо преобразований между силой и перемещением трансформатор выполняет преобразования между напряжениями и токами. Вместо отношения плеч силы количественной характеристикой трансформатора является отношение между числом витков в его обмотках. Конечно, идеального трансформатора не существует, однако практически реализованные устройства очень близки к идеальным. Железный сердечник является неперменной составной частью всех современных силовых трансформаторов, а медь благодаря своему низкому электрическому сопротивлению была и остается основным материалом, из которого изготавливают провод для обмоток.

ПРОСТЫЕ соотношения, присущие идеальному трансформатору и являющиеся азбучной истиной для современных инженеров-электриков, были далеко не столь ясными во время первых экспериментов. Трансформаторы, с которыми работали экспериментаторы, были далеки от идеальных, и комбинированные явления взаимной индукции и самоиндукции при слабой магнитной связи между катушками и несовершенных железных сердечниках приводили к довольно сложному и непонятному поведению этих устройств.

Фарадей не стал детально исследовать открытое им явление, очевидно, полагая, что другие изобретатели продолжат начатую им работу. Однако в действительности оказалось, что в течение нескольких последующих десятилетий устройства, подобные трансформаторам, не нашли сколь-нибудь широкого практического применения. Особый интерес представляли первые эксперименты с «индукторами», состоящими из провода, намотанного на железный сердечник, в частности, способность этих устройств порождать искры, когда ток в



обмотке прерывался. Среди известных ученых, занимавшихся изучением этого явления, был американец Джо-зеф Генри, первый секретарь и директор Смитсоновского института. Впоследствии его именем была названа единица индуктивности.

В этих экспериментах выяснилось, что токи, циркулирующие в сплошных металлических сердечниках, рассеивали энергию. Чтобы свести к минимуму эти так называемые вихревые токи, сердечники стали делать не проводящими в направлении, перпендикулярном магнитным силовым линиям трансформатора. Теперь сердечники представляли собой «связку» изолированных железных проводов.

В то время в качестве источников питания для работы с трансформаторами использовались батареи, а чтобы получить необходимые изменения тока, первичная цепь периодически замыкалась и прерывалась. После того как в 60-х годах прошлого века была изобретена динамо-машина — генератор электроэнергии, также основанный на открытиях Фарадея, — появилась возможность использовать переменный ток. Первый, кто подсоединил трансформатор к источнику переменного тока, был Уильям Гроув, которому для его лабораторных опытов понадобился источник высокого напряжения. Однако в отсутствие какого-либо очевидного коммерческого применения этот эксперимент остался незамеченным и ему не придавали значения до тех пор, пока То-

мас Эдисон не начал работать над осуществлением идеи электрического освещения в 1880-х годах.

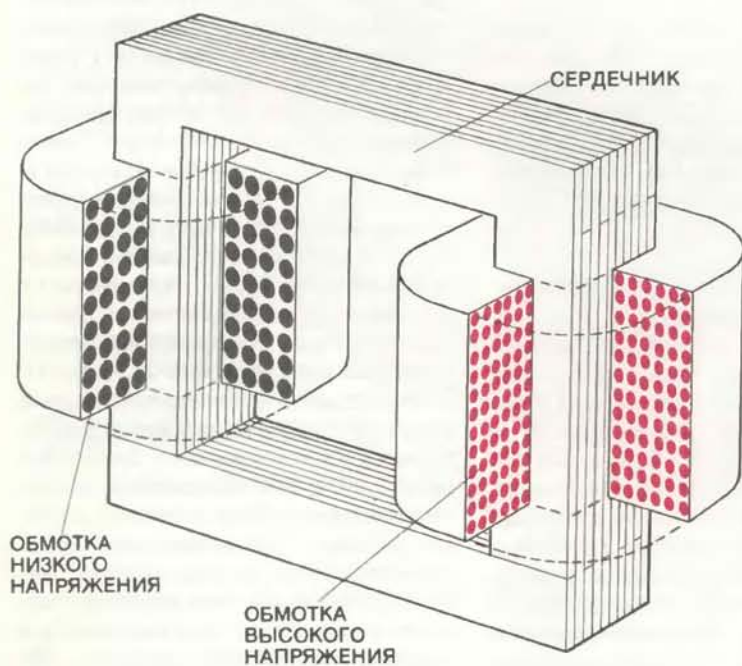
К этому времени уже существовали электрические лампы с платиновыми нитями накала и лампы на основе электрической дуги, или дугового разряда между двумя электродами. Лампы обоих типов работали неплохо, однако их электрические характеристики накладывали некоторые ограничения на способы их включения в электрическую цепь. В частности, все лампы подключались последовательно, подобно ёлочным гирляндам, поэтому они включались и выключались одновременно.

Хотя такой способ был приемлем, например для уличного освещения, невозможность включать и выключать отдельные лампы в произвольные моменты времени, а также высокое напряжение, необходимое при последовательном соединении большого числа осветительных приборов, препятствовали его применению в жилых домах и на небольших предприятиях. Способ же параллельного соединения, в котором каждая лампа работает в своей собственной «подцепи», требовал слишком толстых медных проводов для подведения достаточно сильного тока к лампам, которые имели в то время относительно низкое сопротивление. Одним из главных изобретений Эдисона была лампа накаливания с угольной нитью, которая благодаря своему высокому сопротивлению открыла путь к прак-

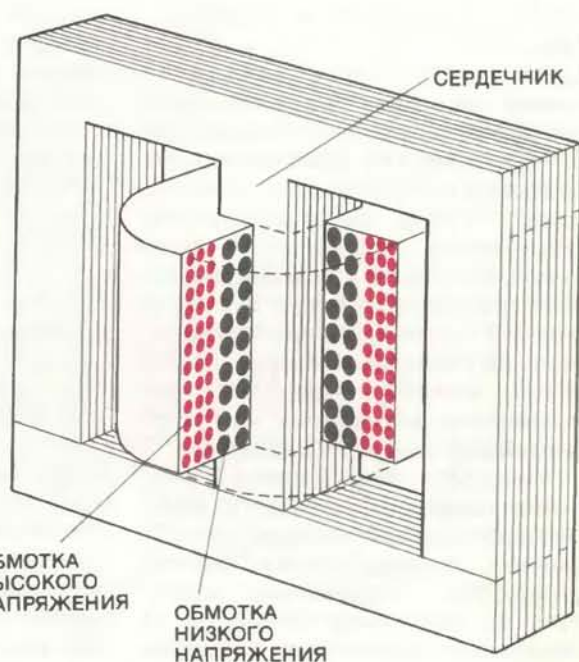
тической реализации систем параллельного подключения осветительных приборов. Используя эти лампы накаливания и генератор постоянного тока, Эдисон в 1882 г. открыл в Нью-Йорке первую промышленную систему электрического освещения.

**П**РИБЛИЗИТЕЛЬНО в то же время трансформаторы были впервые применены в системах электрического освещения в Англии. Французский изобретатель Люсьен Х. Голар и английский промышленник Джон Д. Гиббс воспользовались трансформаторами для подсоединения ламп накаливания к осветительной системе на дуговых лампах. Поскольку дуговые лампы соединялись последовательно, первичные обмотки трансформаторов находились в последовательном соединении с дуговыми лампами. В 1882 г. Голар и Гиббс получили патент на свое устройство, названное ими вторичным генератором. Его работу они продемонстрировали в 1883 г. в Англии, а в 1884 г. — в Италии. Вторичный генератор не нашел широкого применения, однако он стимулировал создание других устройств.

Среди тех, кто заинтересовался работой Голара и Гиббса, были три венгерских инженера из будапештской фирмы Ganz and Company. Они присутствовали при демонстрации работы вторичного генератора в Италии и пришли к выводу, что последовательное соединение имеет серьезные недо-

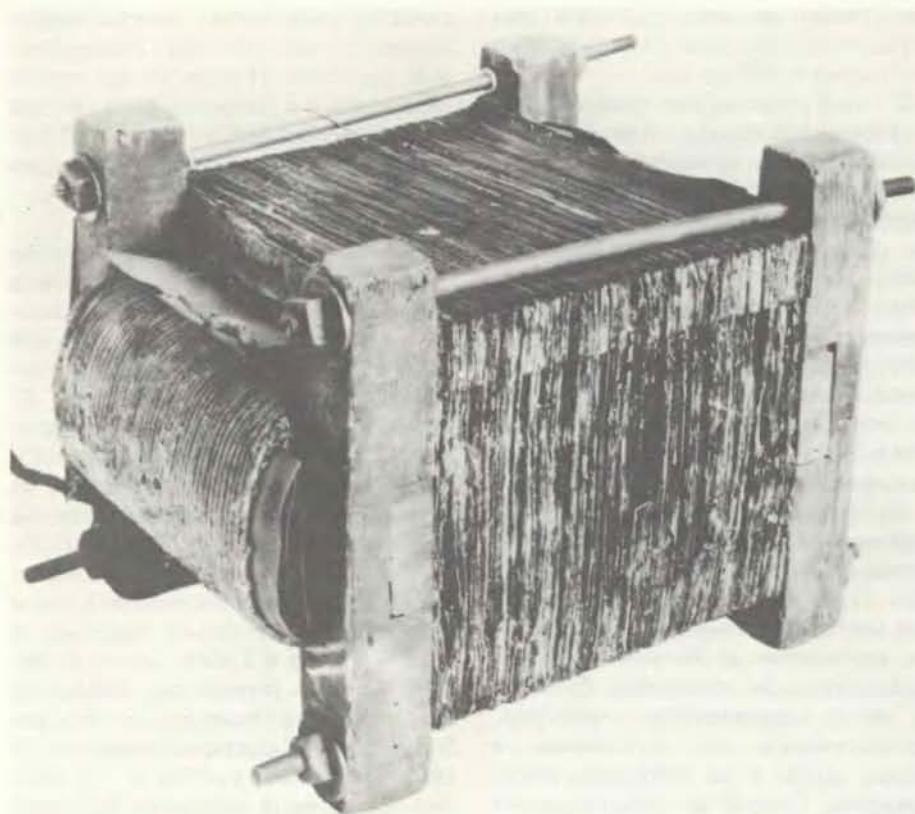


**ТРАНСФОРМАТОРЫ ДВУХ КОНСТРУКЦИЙ** с разными сердечниками. Оба сердечника изготовлены из многих слоев листовой стали. Слева показан стержневой сердечник. Здесь первичная обмотка накинута на один стержень, а вторичная — на другой. Броневой сердечник сделан из Ш-



образных пластин, при этом первичная и вторичная обмотки находятся на одном и том же, среднем стержне сердечника. В трехфазных трансформаторах катушки намотаны на все три стержня (см. рисунок на с. 73).





ТРАНСФОРМАТОР СТЭНЛИ производства 1885 г. с первой электростанции переменного тока в Грейт-Бэррингтоне, шт. Массачусетс. Его длина составляет около 30 см. Обмотка из медного провода в хлопчатобумажной изоляции выступает в его левой части между деревянными ограничителями. Средний стержень сердечника, состоящего из Ш-образных пластин, сложенных в попеременно противоположных друг к другу направлениях, находится внутри заранее изготовленной обмотки. Торцы двух других стержней Ш-образного сердечника видны как более плотно заполненные полоски в верхней и нижней части слоистой структуры.

статки. По возвращении в Будапешт Макс Дери, Отто Т. Блажи и Карл Циперновски сконструировали и изготовили несколько трансформаторов для систем параллельного соединения с генератором. Их трансформаторы (с замкнутыми железными сердечниками, которые значительно лучше подходили для параллельного соединения, чем «связки» железных проводов с открытыми концами) были двух типов. В первом типе провод наматывался на тороидальный сердечник, во втором, наоборот, железные провода сердечника наматывались вокруг тороидальной «связки» проводников.

В мае 1885 г. Дери, Блажи и Циперновски продемонстрировали на национальной выставке в Будапеште свою систему, которую принято считать прототипом современных осветительных систем. Она состояла из 75 параллельно соединенных трансформаторов, подводивших питание к 1067 лампам накаливания Эдисона от генератора переменного тока с напряжением 1350 В. Трансформаторы имели тороидальные железные сер-

дечники. Хотя производство таких трансформаторов было дорогим, они достаточно эффективно выполняли ту функцию, на которую были рассчитаны, — подводить к низковольтным лампам электроэнергию от высоковольтной распределительной системы.

**СИСТЕМА** Голара и Гиббса, демонстрировавшаяся в Италии, произвела также впечатление на американца по имени Джордж Вестингауз. В 80-х годах Вестингауз был уже признанным изобретателем и промышленником. В то время он работал над системой распределения природного газа для освещения. После успехов, достигнутых Эдисоном, Вестингауз заинтересовался новым источником энергии, но сомневался в возможности ее широкого применения. Его скептицизм был в достаточной степени оправданным. В параллельных системах увеличение нагрузки требовало увеличения силы тока, а нагрузка в масштабах целого города потребовала бы колоссальных токов.

Однако передача электроэнергии при больших токах неэффективна. Нужно было либо передавать ток по очень толстым медным проводам, либо строить электростанции в непосредственной близости от потребителя, разбросав множество мелких генераторов по всей территории города.

Многие специалисты искали способы передачи электроэнергии при более высоком напряжении по сравнению с тем, которое требовалось в потребляющих устройствах. В 1884 г. Вестингауз нанял молодого инженера Уильяма Стэнли, у которого возникла идея воспользоваться трансформатором для решения проблемы передачи электроэнергии. Узнав о работе Голара и Гиббса, он посоветовал Вестингаузу приобрести патенты на трансформатор. Стэнли был убежден в преимуществах параллельных схем соединения, и к началу лета 1885 г. им уже было создано несколько трансформаторов с сердечниками замкнутой формы.

Вскоре в связи с ухудшившимся состоянием здоровья Стэнли вынужден был уехать вместе со своей лабораторией из промышленного задымленного Питтсбурга. С одобрения Вестингауза он переселился в Грейт-Бэррингтон, шт. Массачусетс, где продолжал работать над трансформаторами. Тем временем Вестингауз, еще не до конца убежденный в эффективности параллельного соединения, экспериментировал с различными комбинациями вторичных генераторов Голара и Гиббса вместе с другим пионером в области электротехники Оливером Б. Шелленбергером.

К декабрю 1885 г. успехи, достигнутые Стэнли, наконец, убедили Вестингауза. При содействии Шелленбергера и другого блестящего инженера Альберта Шмида Вестингауз приступил к усовершенствованию трансформатора Стэнли, с тем чтобы он (в отличие от венгерского тороидального устройства) стал простым и дешевым в производстве. Сначала сердечник изготавливался из тонких железных пластин в форме буквы Н. Обмотки из изолированной медной проволоки наматывались на горизонтальную часть сердечника, свободные концы которого замыкались дополнительными слоями железных полосок. Стэнли предложил изготавливать железные пластины в форме буквы Ш, с тем чтобы центральный стержень можно было легко вставлять в заранее намотанную катушку. Ш-образные пластины укладывались в чередующихся противоположных направлениях, а на концы пластин укладывались прямые железные полоски для замыкания магнитной цепи. Эта

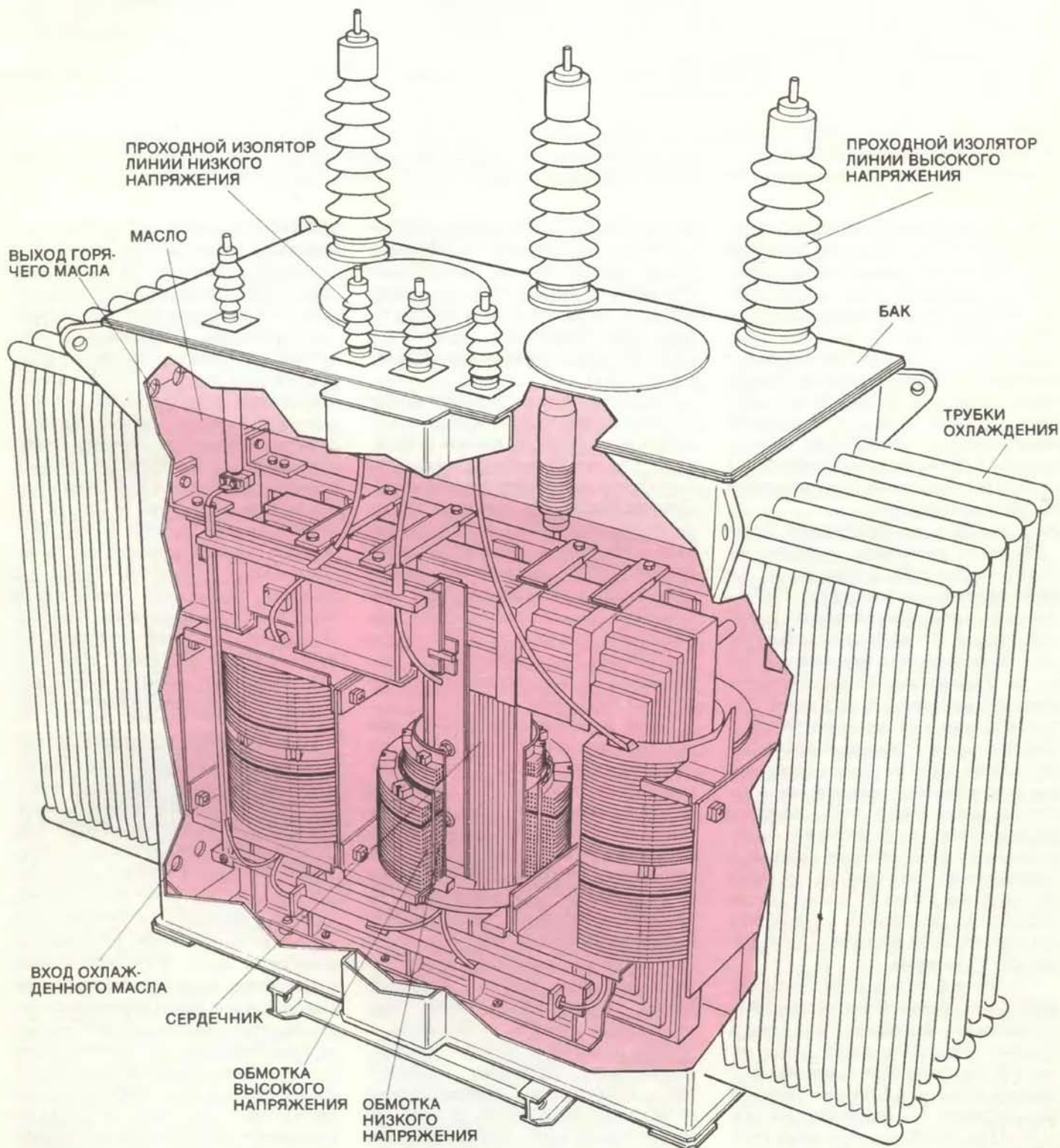


конструкция трансформатора применяется и в наши дни.

В 1886 г. Вестингауз основал компанию Westinghouse Electric. В течение последующих нескольких месяцев он и сотрудники фирмы запатентовали процесс вкладывания слоев желез-

ных пластин в уже готовую катушку с обмотками, а также способ охлаждения и изоляции трансформатора путем погружения его в масло и помещения всего устройства в герметически закрытый контейнер. Стэнли сконструировал и установил несколь-

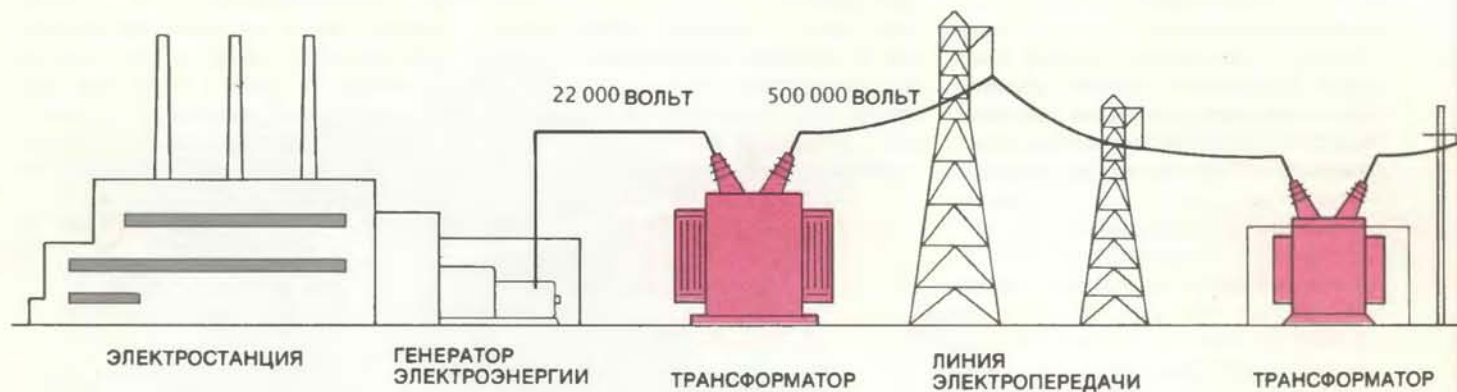
ко трансформаторов в Грейт-Бэррингтоне и построил линию электропередачи от своей лаборатории до центральной части города для распределительной системы с напряжением 500 В. Длина этой линии была около 1,5 км. Чтобы продемонстри-



ТИПИЧНЫЙ СОВРЕМЕННЫЙ ТРАНСФОРМАТОР, погруженный в герметично закрытый бак с охлаждающим и изолирующим маслом. Высоковольтные и низковольтные линии электропередачи подведены к обмоткам через керамические проходные изоляторы. Внутри трансформатора обмотки и сердечник тесно прилегают друг к другу, чтобы

свести к минимуму энергетические потери. Охлаждающее масло циркулирует путем конвекции через внешние радиаторы. В больших трансформаторах охлаждение производится при помощи вентиляторов, прикрепленных к радиаторам, и насосов, осуществляющих принудительную циркуляцию масла.





ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ начинаются на электростанции, где электроэнергия генерируется при напряжении около 22 000 В. Затем напряжение повышается для переда-

чи по высоковольтным линиям. Понижающие трансформаторы уменьшают напряжение до уровней, подходящих для локальных распределительных систем. Далее, напря-

рвать возможность эффективной передачи электроэнергии на большие расстояния, он применил трансформаторы, повышающие напряжение до 3000 В, а затем понижающие его до 500 В, перед тем как посылать ток в городскую линию. 16 марта 1886 г. распределительная система Стэнли была введена в эксплуатацию. Это был крупный успех, и Вестингауз приступил к организации производства и продажи оборудования для систем распределения электроэнергии на переменном токе.

ЭДИСОН и его помощники боролись с системами переменного тока и в залах суда, и в прессе, но они были обречены на поражение. Многофазный мотор, изобретенный Николой Теслой, открыл пути эффективного использования переменного тока, а изобретение Шелленбергером счетчика переменного тока позволило точно подсчитывать количество электроэнергии, потребляемой абонентами. Благодаря этим двум изобретениям, а также низкой себестоимости передачи переменного тока, системы распределения и потребления переменного тока стали более гибкими и удобными по сравнению с системами постоянного тока и вскоре почти полностью вытеснили последние, оставив им лишь несколько узких областей применения.

Следующее десятилетие ознаменовалось быстрым ростом систем энергоснабжения на переменном токе и такими примечательными событиями, как электрическое освещение всемирной ярмарки в Чикаго в 1893 г. и установление на гидроэлектростанции в Ниагара-Фоллз огромных генераторов мощностью 5000 л.с., первые два из которых были введены в эксплуатацию в 1895 г. Вместе с головокружительным ростом мощности электрогенераторов увеличивались и размеры трансформаторов. В 1895 г.

на металлургическом заводе фирмы Carborundum Company в Ниагара-Фоллз был установлен трансформатор мощностью 750 кВА. Уже через пять лет были введены в эксплуатацию трансформаторы мощностью 2000 кВА, рассчитанные на напряжение 50 000 В.

Хотя конструкция трансформатора в основных чертах не изменилась и до наших дней, вряд ли можно утверждать, что это устройство, созданное на рубеже веков, было совершенным. Трансформатор по-прежнему состоит из изолированных железных пластин и обмоток из медного провода, однако с 1900 г. его рабочие характеристики были весьма улучшены. Современные трансформаторы могут работать при напряжении 765 кВ и мощности более 1 млн. кВт, а продолжительность их эксплуатации колеблется от 25 до 40 лет.

Такой значительный прогресс свидетельствует об эффективности исследовательской и инженерно-конструкторской работы, в процессе которой показатели трансформаторов повышались параллельно с общим быстрым развитием электроэнергетики. Исследователи, работая в условиях острой конкуренции и стремясь обеспечить максимальную производительность при минимальных затратах, пытаются лучше понять природные явления, чтобы успешно разрабатывать новые промышленные изделия и процессы, а также совершенствовать старые. Конкуренция заставляет преодолевать ограничения, накладываемые свойствами материалов, и в то же время способствует изобретению более совершенных конструкций и технологий за счет использования преимуществ, даваемых новыми материалами и новыми подходами.

Параметры, характеризующие идеальный трансформатор, в значитель-

ной степени зависят от свойств сердечника, и именно в этой области был достигнут наибольший прогресс. Важнейшие свойства материала, из которого изготавливают сердечники, это магнитная проницаемость, магнитное насыщение, электрическое сопротивление и потери на гистерезис. Магнитную проницаемость, как уже говорилось выше, можно представить как количество силовых линий, порождаемых в материале, находящемся во внешнем магнитном поле. Магнитное насыщение — это состояние магнитного материала, при котором его намагниченность достигает предельного значения. Эти два свойства определяют мощностные характеристики сердечника. Электрическое сопротивление материала сердечника важно постольку, поскольку оно позволяет снизить энергетические потери, обусловленные вихревыми токами.

Гистерезис, или «эффект запоминания» в магнитных материалах, уменьшает коэффициент полезного действия трансформатора. Вследствие взаимодействия между группами «намагниченных» атомов, материал продолжает оставаться в намагниченном состоянии. Поэтому, когда напряженность внешнего магнитного поля временно уменьшается, материал реагирует не сразу. В трансформаторе эта задержка приводит к потере энергии на каждом цикле переменного тока. На протяжении всей истории совершенствования сердечников основные цели, преследуемые инженерами, заключались в том, чтобы повысить магнитную проницаемость, точку насыщения и электрическое сопротивление материала и уменьшить энергетические потери на гистерезис.

В этих исследованиях важную роль играет кривая, которая графически описывает соотношения между такими свойствами намагничиваемого ма-





жение опять понижается для снабжения электричеством мелких предприятий и жилых комплексов. Хотя на этом схематическом рисунке изображена лишь одна линия, на

практике линии электропередачи разветвляются во всех пунктах, где понижается напряжение и начинается распределительная сеть.

териала, как магнитная проницаемость, магнитное насыщение и гистерезис. Эта кривая (кривая  $B-H$ ) представляет собой график числа силовых линий, индуцируемых в материале, или индукции ( $B$ ), как функции изменяющейся напряженности магнитного поля ( $H$ ). Кривая, характерная для каждого цикла переменного тока, порождающего магнитное поле, имеет форму буквы  $S$  с сужающимися концами. Угол ее наклона соответствует величине магнитной проницаемости; точка, в которой кривая выравнивается (в верхней части буквы  $S$ ), соответствует точке магнитного насыщения, а площадь, ограничиваемая кривой (площадь, занимаемая буквой  $S$ ), соответствует гистерезису.

Исследователей всегда интересовал вопрос о том, как эти свойства соотносятся с физическими свойствами материала. Каждое свойство зависит от характера взаимодействия между атомами — элементарными магнитами. Это взаимодействие определяется кристаллической структурой железа и присутствием атомов других элементов — примесей. Наука об этих сложных взаимодействиях называется теорией магнитных доменов. Она помогает специалистам в их поисках более совершенных материалов для трансформатора.

**Т**ОНКИЕ пластины из листовой стали, из которых состояли сердечники первых трансформаторов Стэнли — Вестингауза, характеризовались значительными потерями на гистерезис. Впоследствии потери постепенно стали снижаться за счет тщательного подбора стали, поставляемой различными производителями, и к 1900 г. эти потери были уменьшены вдвое. Возникла также проблема, связанная со старением материала: чем дольше эксплуатировался

трансформатор, тем выше становились потери на гистерезис.

В начале 1900-х годов английский исследователь-металлург Роберт А. Хедфилд провел серию экспериментов с целью установить, каким образом добавки других элементов влияют на свойства железа. В ряде публикаций Хедфилд и его коллеги указывали на перспективность использования кремнистой стали в качестве материала для сердечников. При добавлении кремния потери на гистерезис в железе уменьшались, магнитная проницаемость повышалась, эффект старения практически полностью исчезал, а электрическое сопротивление металла возрастало. Однако производство кремнистой стали натолкнулось на трудности, и прошло несколько лет, прежде чем компания Хедфилда поставила заказчикам свою первую тонну трансформаторной стали. В течение последующих 17 лет применение этого материала позволило электроэнергетической промышленности сэкономить около 340 млн. долл. — по тем временам это была колоссальная сумма.

Следующий скачок в технологии производства сердечников был сделан в начале 30-х годов, когда американский металлург Норман П. Госс, сотрудник компании Cold Metall Process Company, установил, что при комбинированном воздействии проката и нагревания у кремнистой стали появлялись незаурядные магнитные свойства в направлении прокатки. Эффект, физической сущности которого Госс тогда не понимал, заключался в том, что благодаря такой обработке главные оси частиц железа выстраивались в одном направлении, что приводило к коллективному магнитному взаимодействию. Если сердечник, изготовленный из такого материала, был соответствующим об-

разом ориентирован в трансформаторе, магнитное насыщение увеличивалось на 50%, потери на гистерезис сокращались в 4 раза, а магнитная проницаемость возрастала в 5 раз.

И снова процесс воплощения этого открытия в технологии производства листовой стали достаточно высокого качества оказался сложным и длительным. Корпорация Westinghouse Electric Corporation и металлургическая компания Rolling Mill Company объединили свои усилия в попытках создания необходимой технологии. Над этой же проблемой начали работать фирмы General Electric и металлургическая фирма Allegheny Ludlum Steel Company. Обмен лицензиями между этими двумя группами позволял им воспользоваться успехами, достигнутыми на каждой из фирм.

Поскольку теперь металл нужно было специальным образом ориентировать в сердечнике, технологию производства сердечников также потребовалось изменить. Уже нельзя было просто штамповать Ш-образные пластины из сплошных стальных листов. Чтобы добиться оптимальных характеристик, нужно было вырезать каждую ножку Ш отдельно. До 1941 г. открытие Госса не нашло широкого применения в производстве, но в последующий период оно сыграло важную роль в дальнейшем совершенствовании трансформаторов.

Эффективность работы трансформатора зависит также от систем электрической изоляции и охлаждения. Функции этих двух систем тесно связаны, поскольку тепло, выделяемое сердечником и проводниками, влияет на долговечность изоляции, в то время как сама изоляция — будь она твердая, жидкая или газообразная — служит также для того, чтобы отводить определенное количество тепла. Температура внутри транс-



форматора обычно близка к 100 °С, точке кипения воды. В таких условиях ухудшение свойств изоляционного материала может ограничивать долговечность трансформатора.

В первых трансформаторах Стэнли воздух был по существу единственным изолирующим и охлаждающим агентом. Хлопчатобумажное покрытие проводов обмотки служило в основном лишь для разделения этих проводов. Вскоре Джордж Вестингауз погрузил трансформатор в бак, наполненный маслом, а слой сердечника стал располагать таким образом, чтобы масло могло циркулировать между ними за счет конвективного движения. Изолирующие свойства хлопковой ткани, пропитанной маслом, оказались лучше, чем у сухой ткани на воздухе, и сочетание циркулирующего масла и пропитанных маслом целлюлозных материалов стало стандартным, оно широко применяется и в наши дни.

Хотя масло недорогой, хорошо изолирующий и охлаждающий материал, оно легко воспламеняется. Поэтому трансформаторы нельзя было устанавливать в помещении. Начиная с 1932 г. в трансформаторах стали широко применять жидкости на основе хлористых углеводородных соединений, однако недавно выяснилось, что они оказывают длительное токсическое воздействие на человека и поэтому их использование было запрещено. В некоторых трансформаторах в качестве охлаждающего агента используется воздух или азот, а для изоляции — материалы на основе стекла. Такие трансформаторы безопасны в пожарном отношении и их можно устанавливать в помещении. Пробивное напряжение газа иногда повышается за счет добавления небольших количеств фтористого углерода. В других сухих трансформаторах используются эпоксидные смолы, состоящие из полимеризующихся жидкостей, которые, затвердевая, образуют прочные твердые материалы.

Уменьшение габаритов трансформатора, главным образом, было достигнуто за счет более эффективных методов отвода тепла. В первое время масло, в которое погружали трансформаторы, циркулировало в них за счет конвекции. В настоящее время для отвода тепла от масла применяются уже значительно более эффективные системы. Многие устройства охлаждаются при помощи вентиляторов и внешних радиаторов, через которые масло циркулирует за счет конвекции или использования специальных насосов.

В течение многих лет проводились также эксперименты с системами ис-

парительного охлаждения. Непроводящая ток жидкость с низкой температурой кипения, приходя в контакт с горячими деталями, испаряется; ее пары отводятся в специальный конденсатор, где они снова превращаются в жидкость. В настоящее время несколько трансформаторов с испарительной системой охлаждения находятся в эксплуатации. Пока они слишком дороги в производстве и не могут конкурировать с устройствами обычной конструкции, но все же такая система охлаждения выглядит весьма перспективной и работа над ней продолжается.

**С**ЕЙЧАС, когда трансформатор вступает в свое второе столетие, предсказать пути его дальнейшей эволюции нелегко. Исследователи, работающие над аморфными металлами (металлами, по существу не имеющими кристаллической структуры), обнаружили у них многообещающие магнитные свойства, однако достаточно дешевого способа получения этих металлов пока найти не удалось. Трансформаторы на основе сверхпроводимости, обмотки которых практически не имеют электрического сопротивления, уже созданы в лабораториях, однако температура в них должна поддерживаться на уровне нескольких градусов выше абсолютного нуля, поэтому такие трансформаторы пока слишком дороги и неудобны для практического применения. Хотя эксперименты, о которых мы говорили, обещают привести к дальнейшему усовершенствованию трансформаторов, в настоящее время рынок перенасыщен продукцией электроэнергетической промышленности. По-видимому, это несколько замедлит введение каких-либо радикальных изменений в конструкции трансформаторов, однако процесс постепенного усовершенствования системы изоляции и охлаждения, бесспорно, будет продолжаться.

Сохранят ли трансформаторы свое

место, или их заменят какие-нибудь другие устройства? Полупроводниковые приборы уже значительно сократили или даже полностью ликвидировали потребность в трансформаторах во многих видах электронной аппаратуры. Появление же более мощных полупроводниковых приборов позволило в ряде случаев передавать электроэнергию по высоковольтным линиям в виде постоянного тока, а не переменного, хотя и в этих системах трансформаторы еще нужны для необходимых преобразований. Исходя из сказанного, можно предположить, что полупроводниковые приборы могут взять на себя часть функций, выполняемых трансформаторами в электроэнергетике.

Последние достижения в изучении сверхпроводимости вселяют надежды на то, что найдутся материалы, обладающие свойством сверхпроводимости при комнатных температурах. Если такие материалы действительно будут обнаружены и если они смогут проводить очень сильные токи, то, возможно, низковольтные системы распределения электроэнергии постоянного тока станут экономически более выгодными по сравнению с системами переменного тока. Однако пока не известно, когда будут найдены такие материалы, и, кроме того, еще далеко не очевидно, что полная перестройка существующих электроэнергетических систем будет экономически оправданной.

Конечно, в условиях столь бурного технического прогресса и непредсказуемых изменений в технологии было бы неразумно утверждать, что трансформатор будет служить нам вечно. Однако весьма вероятно, что это устройство прослужит свое второе столетие, так же как он прослужил и первое — бесшумно, эффективно и незаметно поддерживая функционирование электроэнергетических систем, от которых зависит так многое в нашей современной жизни.

## Наука и общество

### Космический комплекс

**М**Ы ВСЕ более уточняем свой космический адрес. Сначала астрономы нанесли на карты наше непосредственное окружение: Солнечную систему. В начале XX в. было

установлено, что Солнечная система находится внутри скопления звезд спиральной формы — Млечного Пути. Оказалось, что он в свою очередь есть одна из сравнительно близких к нам галактик, составляющих Местную Группу. За последние десять лет ученые пришли к выводу, что Мест-



ная Группа расположена вблизи края Местного Сверхскопления. Оно представляет собой скопление галактик неправильной формы, составляющее примерно 100 млн. световых лет в поперечнике, возле которого расположены скопления Гидры — Кентавра и, возможно, обширное скопление галактик, известное под названием Великий Аттрактор (см. статью: Алан Дресслер. Крупномасштабный поток галактик, «В мире науки», 1987, № 11).

Как сообщает Р. Brent Талли из Гавайского университета в Маноа, в статье, недавно опубликованной в журнале «Astrophysical Journal», Местное Сверхскопление и его ближайшее окружение принадлежит гораздо большему «комплексу» сверхскоплений. Эта структура является одной из самых больших когда-либо измеренных: она составляет по крайней мере 1 млрд. световых лет в поперечнике (что является примерно одной десятой частью всей наблюдаемой Вселенной) и 200 млн. световых лет по толщине, а ее масса превышает массу Солнца в  $10^{18}$  раз. Талли называет эту структуру комплексом сверхскоплений Рыб — Кита, поскольку при наблюдении с Земли кажется, что он расположен в районе созвездий Рыб и Кита.

Хотя для того чтобы подкрепить это сообщение необходимы новые наблюдения, Вера Ц. Рубин из Института Карнеги в Вашингтоне назвала его «весьма любопытным». «Это очень трудная работа, требующая большого самообладания», — заявила она. Талли нанес на карту не отдельные галактики, а целые скопления, содержащие около 1000 галактик каждое, которые наблюдал и занес в каталог Джордж Абелл в 50-х годах. Талли оценил расстояния до галактик, используя последние измерения их красных смещений.

Талли ограничил свою карту космической сферой радиусом 1 млрд. световых лет с центром в Млечном Пути. Наблюдения галактик, находящихся вне этой сферы, «чрезвычайно неполны», объясняет он. После нанесения на карту скоплений Абелла Талли обнаружил, что большинство из них объединяются в пять ясно различимых групп, занимающих всего 0,5% объема сферы. В центре сферы расположен комплекс сверхскоплений Рыб — Кита. Два других комплекса сверхскоплений примерно того же размера, которые Талли назвал комплексами Геркулеса — Северной Короны и Водолея, расположены рядом. Два оставшихся комплекса Льва — Большой Медведицы меньше по размеру и находятся где-то у пери-

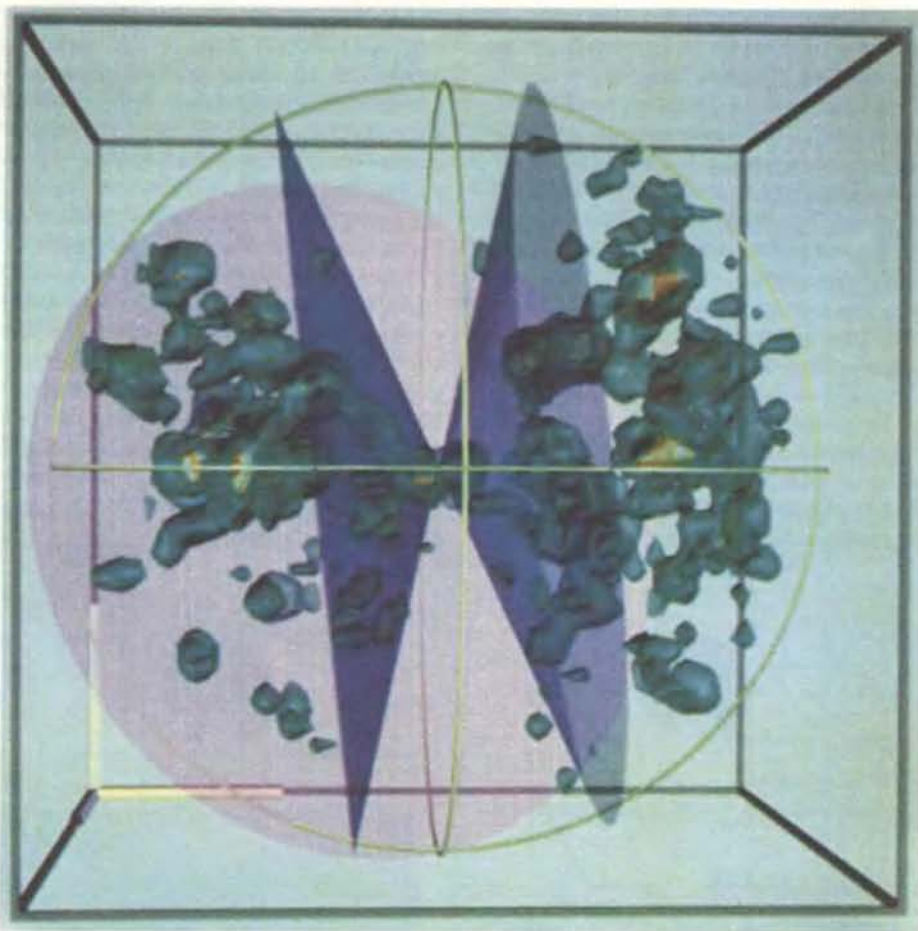
метра сферы; как говорит Талли, они только «просовывают» свои носы в комнату».

Даже до сообщения Талли космологам было трудно объяснить наблюдавшиеся тесные скопления галактик, окруженные ничем не заполненными областями. «Мы всегда думали, что, если посмотреть достаточно далеко, — говорит Джеймс П. Райт из Национального научного фонда, — картина станет более равномерной. Но все оказалось иначе».

Основным доказательством гипотезы происхождения Вселенной в результате Большого взрыва является слабое микроволновое излучение, приходящее к Земле с почти одинаковой интенсивностью из всех направлений. Считалось, что это излучение есть послесвечение Большого взрыва. Теоретики утверждают, что зародыши этих больших структур, таких, как Местное Сверхскопление и комплексы Талли, должны были существовать на ранних стадиях расширения Вселенной. При этом, по их мнению,

микроволновое излучение должно иметь те же самые неравномерности.

Одной из основных попыток объяснить противоречие между равномерностью микроволнового излучения и скученностью галактик, была гипотеза о том, что видимые объекты представляют только часть всей материи пространства. Если же учесть так называемую невидимую материю, то масса во Вселенной будет распределена равномерно. «Некоторые сравнивают материю, испускающую свет, с пеной на темном пиве», — отмечает Райт. Существует много кандидатов на роль невидимой материи (из которых черные дыры, а также нейтронные и космические нити — наиболее вероятные претенденты), однако пока ни одно из наблюдений не подтвердило это. Когда Талли спросили о том, как согласовать его результаты с наличием равномерного микроволнового фона, он ответил: «Меня это не интересует. Единственно, что имеет значение — это реальность существования этих структур».



«КОМПЛЕКСЫ» ГАЛАКТИК населяют сферу диаметром 2 млрд. световых лет; они изображены на карте, составленной с помощью суперкомпьютера Р. Талли. Комплекс сверхскоплений Рыб — Кита представляет собой горизонтальную структуру; три остальных комплекса сверхскоплений: Водолея, Геркулеса — Северной Короны и Льва, расположены соответственно в левом верхнем, правом верхнем и левом нижнем углу. Пустоты — это области, закрытые пылью в Млечном Пути.



## Как объясняются иллюзии контура — яркие фигуры, которых на самом деле нет



ДЖИРЛ УОЛКЕР

**В**ЗГЛЯНИТЕ на рисунок внизу слева: если вы будете рассматривать всю картинку, не останавливая взор на какой-либо стороне контурного треугольника с разорванными сторонами, то, вероятно, увидите белый сплошной треугольник, как бы закрывающий частично три черные кружка и контурный треугольник. Иллюзорный треугольник, который может появиться не сразу, а спустя несколько секунд, часто кажется значительно более ярким, чем белый фон. (Иллюзия усилится, если вы подложите под страницу лист черной бумаги, чтобы не проступал напечатанный на обороте текст.)

Белый треугольник — это пример целого класса так называемых иллюзий контура, на которые в 1976 г. обратил внимание Г. Каниша, работавший в Университете г. Триеста (см. G. Kanizsa. *Subjective Contours*, «Scientific American», April 1976). Картинки, при рассматривании которых наблюдатель видит описанные треугольники, известны как «треугольники Каниши».

Почему появляется иллюзорный треугольник и почему он ярче окружающего фона? В течение десятка лет все попытки специалистов в области психофизики и других дисциплин най-

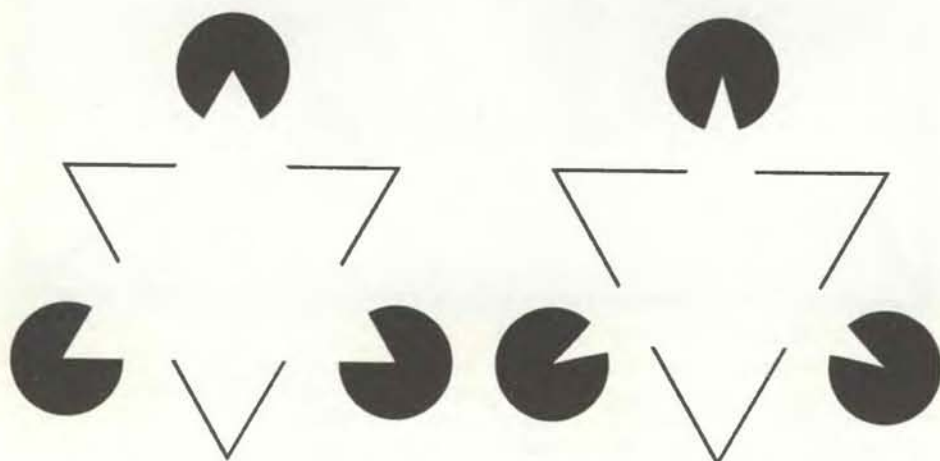
ти на эти вопросы окончательный ответ оканчивались неудачей. (Картинки, порождающие иллюзорные контуры, придумать несложно; возможно, вам захочется самим построить какой-то новый рисунок или попытаться проверить имеющиеся объяснения происхождения иллюзий.)

Одно из самых первых объяснений явления опиралось на факт контраста яркостей в картинках Каниши. Согласно этому объяснению, углы иллюзорного треугольника резко контрастируют с черными кружками, поэтому воспринимаются более яркими, чем белый фон, и эта яркость каким-то образом «распространяется» на весь иллюзорный треугольник. Однако такое объяснение легко опровергается. Если иллюзорный треугольник оконтурить тонкими линиями (так, что треугольник перестает быть иллюзорным), контраст исчезает или ослабляется настолько, что случайный наблюдатель может и не заметить его. При этом контраст яркостей в углах треугольника не снижается. Кроме того, теория контраста не объясняет, почему не кажутся более яркими те участки фона, которые граничат с окружностями: ведь контраст здесь не меньше, чем внутри вырезанных секторов.

В качестве другого объяснения привлекалась специфика функционирования тех частей зрительной системы, которые отвечают за обнаружение линий и границ и их ориентации. Может быть, именно в результате специфики взаимодействия этих частей и возникает иллюзия яркого цельного треугольника на рисунке Каниши? Каким бы привлекательным не казалось такое объяснение, с его помощью нельзя объяснить того факта, почему иллюзорный контур иногда легче разглядеть на нечеткой, расплывчатой картинке или при плохом освещении.

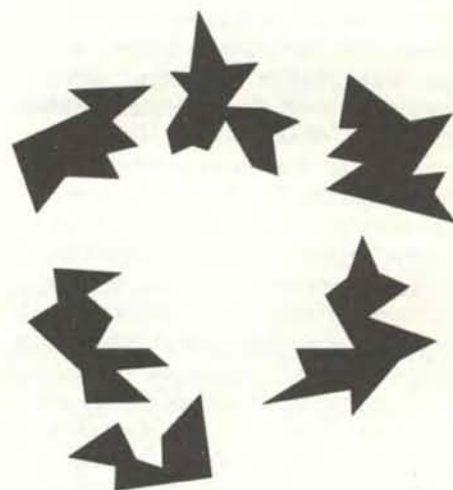
В зрительной системе есть также компонент, которому приписывается функция обнаружения повторяемости элементов, например линий; предположительно, соответствующий процесс аналогичен анализу Фурье. Может быть, в результате такой обработки зрительной информации и появляются иллюзорные линии, дополняющие контур? Это объяснение тоже не проходит: ведь иллюзорные контуры возникают и на картинках, где количество повторений недостаточно для того, чтобы инициировать такой анализ.

В 1986 г. С. Корен из Университета Британской Колумбии, К. Порак из Университета Виктории и Л. Теодор из Йоркского университета пересмотрели и отвергли все объяснения, в которых источником иллюзии предполагается то или иное физиологическое явление. Они обратились к другому классу интерпретаций, в которых для объяснения привлекаются познавательные процессы. Например, вы видите треугольник потому, что ваш мозг автоматически соединяет разрозненные элементы в одно целое и тем самым извлекает смысл из исходного странного рисунка. Или: треугольник появляется потому, что вы относитесь к рисунку как к голово-



Треугольник Каниши

Иллюзорный треугольник  
с искривленными сторонами



«Спрятанный» треугольник

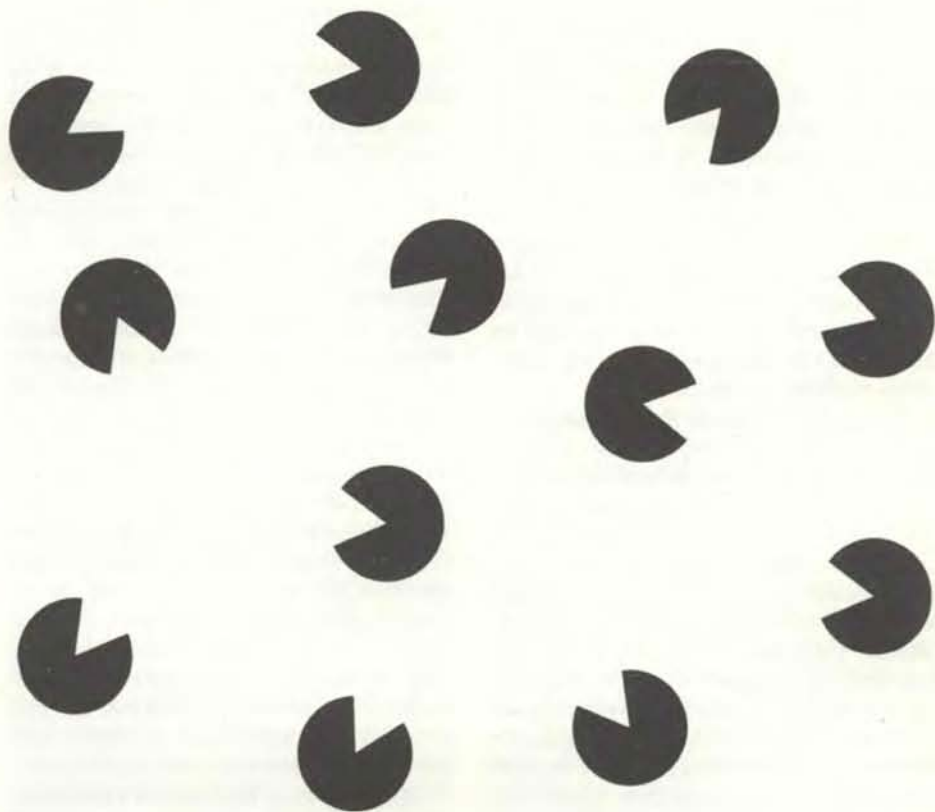


ломке, и решаете ее, обнаруживая знакомые фигуры.

Корен предположил, что существует сильный психологический механизм, который действует при рассмотрении описываемых рисунков и опирается на кажущуюся глубину изображения. Как мы помним, иллюзорная фигура на рисунках Каниши как бы накладывается на другие объекты, частично закрывая их от нашего взора. Но почему при восприятии глубины треугольник должен казаться более ярким? Пока на этот счет нет единого мнения, но может оказаться, что кажущаяся яркость помогает нам осмыслить то, что мы видим: ведь мы знаем, что это иллюзия. Корен предположил существование и еще одного психологического механизма, играющего ключевую роль в восприятии иллюзорного контура. Когда вы воспринимаете иллюзорную фигуру на рисунке, то привлекаете свой предшествующий опыт, хотя можете и не отдавать себе в этом отчет. Предшествующий опыт такого рода называется перцептивной установкой. Например, научившись видеть треугольник на исходном рисунке Каниши, вы быстро обнаружите треугольник с искривленными сторонами на среднем рисунке на той же странице.

Более строгий тест можно провести с помощью третьего рисунка в том же ряду. Он взят из экспериментов, о которых сообщили в 1979 г. И. Рок из Университета Ратгерса и Р. Энсон, который в то время работал там же. Закрыв две первые картинки, предложите кому-нибудь, кто ничего не слышал об иллюзиях контура, рассмотреть третью картинку. Вряд ли ваш испытуемый увидит иллюзорный треугольник в центре изображения или заметит там какое-либо увеличение яркости. Затем дайте ему возможность рассмотреть все три рисунка. Теперь, скорее всего, он увидит в центральной части третьей картинке яркий белый треугольник. Однако иллюзия может не возникать несколько десятков секунд. Если бы ее причина была физиологической, а не психологической, такую задержку было бы объяснить трудно. А сможете ли вы найти иллюзорную фигуру на верхнем рисунке на этой странице? Эта картинка также взята из работ Рока и Энсона.

Иллюзии другого типа возникают при рассмотрении недостроенных решеток, изображенных на этой странице (рисунок внизу слева). Эти иллюзии впервые исследовал У. Эренстайн, и теперь они носят его имя. Если вы будете избегать фиксировать взор на какой-либо точке рисунка, то увидите кружочки или квадратики в местах, где должны пересекаться ли-

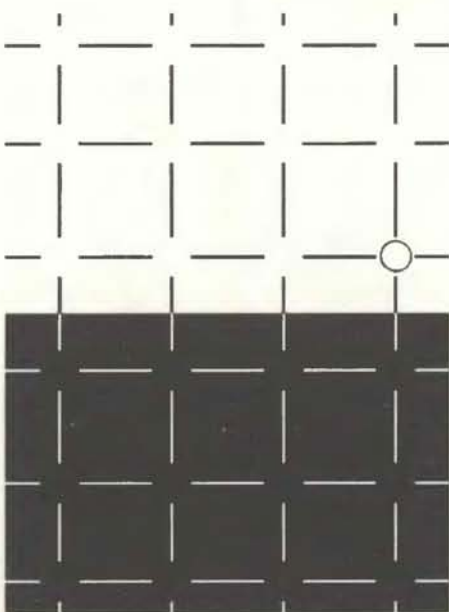


*Есть ли здесь иллюзорная фигура?*

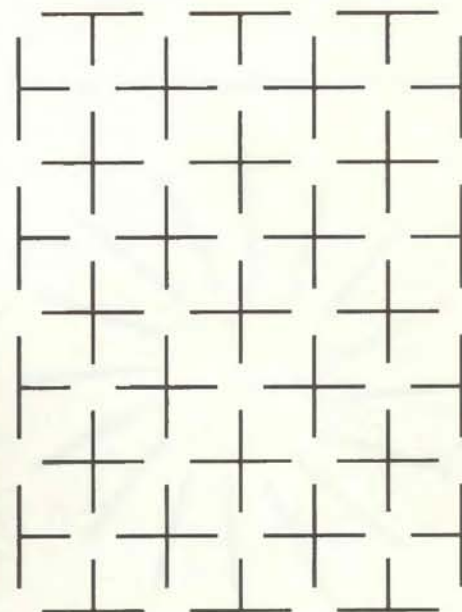
нии решетки. Эти иллюзорные фигурки особенно ярки на рисунке, состоящем из черных линий, и темны на рисунке, образованном белыми линиями. В обоих случаях может казаться, что фигурки как бы наложены на решетку. Иллюзия сохраняется, даже если рассматривать всего одну ячейку решетки с одним пересечением. Однако если фиксировать взором само место пересечения, то пятнышко (будь оно более ярким или более темным) исчезает. Исчезает оно и тогда, когда

место пересечения обводят кружком. Удивительный вариант иллюзии Эренстайна возникает при рассмотрении соседнего рисунка: здесь можно наблюдать появление светлых пятен и соединение их в диагональные полосы.

Как же объяснить эти иллюзорные пятна и полосы? Возможно, пятна появляются из-за желания видеть завершенный рисунок: на него мысленно накладывается нечто, что соединяет линии в местах разрыва. Может



*Решетки Эренстайна*



*Иллюзорные «полосы» Эренстайна*



быть, пятна возникают из-за контраста по яркости между концами линий и области воображаемого пересечения. Третьим объяснением служит мысленное «добавление» глубины в плоскостной рисунок, т. е. восприятие его как решетки, узлы которой закрыты маленькими сферами или, в случае с полосками, на которую наложена другая решетка. Такой вариант объяснения представляется мне очень важным, потому что когда я смотрю на решетки, то весьма явно ощущаю глубину изображения.

В конце 70-х годов Дж. Кеннеди из Торонтского университета описал ряд иллюзий, вероятно, близких по сути к иллюзиям Эренштейна. На первом из четырех изображений на этой странице радиально расходящиеся линии служат причиной возникновения яркого белого круга в центре изображения. Согласно Кеннеди, иллюзорная фигура появляется из-за контраста по яркости между внутренними концами линий и белой центральной областью. Иначе говоря, зона вблизи окончаний линий кажется более яркой, чем на самом деле, из-за близости к темной линии. В случае одной

линии кажущееся возрастание яркости неуловимо, но когда несколько линий расположено так, что зоны возрастания яркости примыкают друг к другу, либо взаимно накладываются, эффект возрастания яркости становится вполне ощутимым.

Три другие фигуры на этом рисунке соответствуют последовательно все большему изменению направлений линий, которые в конце концов становятся касательными к центральной области. По мере увеличения наклона иллюзорный правильный кружок становится все менее заметным, а затем и вовсе исчезает. По мнению Кеннеди, переориентация линий изменяет положение зон яркостного контраста, смещая их наружу от центральной области. Когда линии становятся касательными к ней, белая зона, непосредственно примыкающая к окончанию линии, вплотную подходит к другой линии, мысленного приписывания ей большей яркости уже не происходит и изначальная иллюзия четкого круга в центре зоны пропадает.

Критики этой концепции утверждают, что иллюзия возникает не из-за контраста по яркости, а из-за мыслен-

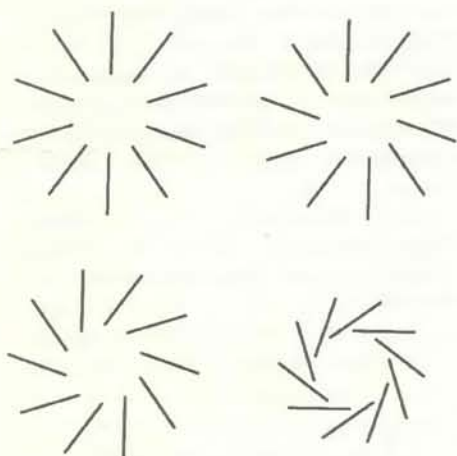
ного соединения линий до их пересечения в центре и «привнесения» глубины в изображение: наблюдатель представляет себе, что линии пересекаются, но место пересечения закрыто от взора яркой сферой. При изменении ориентации линий мысленное пересечение линий не возникает, и это разрушает иллюзию.

В поддержку этой теоретической интерпретации я могу добавить одно наблюдение. Если иллюзия возникает вследствие контраста по яркости у внутренних концов линий, то почему не кажется более яркой по сравнению с фоном зона, примыкающая к их наружным концам? Если я добавляю все больше и больше линий, чтобы максимально сократить расстояние между их наружными концами, то все равно не наблюдаю повышения яркости и возникновения какой-либо иллюзорной фигуры по внешнему контуру. Мне больше нравится объяснение, согласно которому восприятие «привносит» в изображение глубину, порождая иллюзию. Мы все привыкли видеть сцены, когда один объект закрывает другой, более удаленный; я подозреваю, что мы автоматически вносим этот перцептивный опыт, который и влияет на восприятие изображений, построенных Кеннеди.

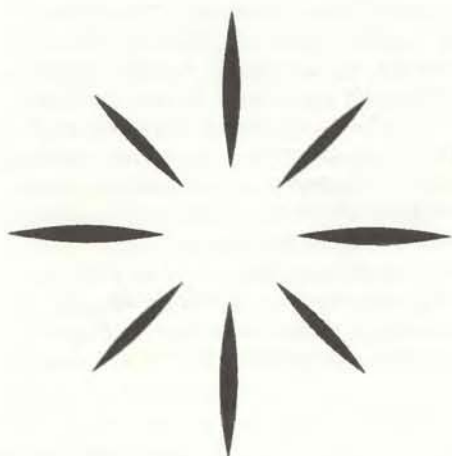
Критикуя теорию скрытого от взора пересечения линий, Кеннеди показал, что иллюзия сохраняется при замене линий «лепестками» с утолщенной средней частью и заостренными концами — как на правом верхнем рисунке. Заостренные концы лепестков не дают мысленно продолжить лепестки до их пересечения. Однако для меня иллюзия центрального круга на таком рисунке оказывается значительно слабее, из чего я заключаю, что хотя скрытое пересечение может быть и необязательным условием, оно, безусловно, помогает возникновению иллюзии.

Другое изображение, проанализированное Кеннеди, представляет собой радиально расходящиеся цепочки черных точек; чем ближе к внутреннему концу цепочки, тем бледнее точки. Другой вариант, предложенный Б. Ричардсоном из Торонтского университета, приведен на левом нижнем рисунке на предыдущей странице. Он состоит из скошенных у внутренних концов полос. Оба типа изображений порождают иллюзию яркого центрального пятна, напоминающего изображение солнца. Если сделать негатив любого из этих рисунков, то в центре окажется темное пятно, похожее на вырезанное отверстие.

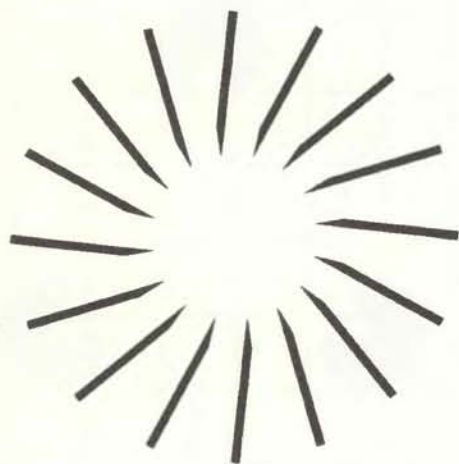
Яркий иллюзорный кружок возникает и при рассмотрении еще одного изображения, построенного Кеннеди, которое напоминает стилизован-



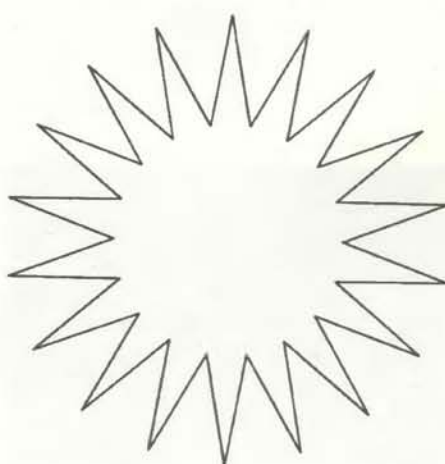
Эффект изменения ориентации линий



Эффект лепестков



Эффект скошенных полос



«Солнце»



ное изображение солнца другого типа (четвертый рисунок на предыдущей странице). По мнению Кеннеди, кажущееся возрастание яркостного контраста между центральной областью и резкими изгибами линий создается отрезками прямых. Это изображение весьма важно, поскольку иллюзия возникает в отсутствие необходимости что-то соединить или завершить контур: все отрезки прямых уже соединены и контур вокруг центральной части замкнут. Так чем же все-таки вызваны иллюзии Кеннеди: контрастом по яркости, перцептивной установкой или иллюзорным восприятием глубины и скрытого от глаза пересечения? А может, просто желанием увидеть хоть что-то интересное на непонятном рисунке? Решение этих вопросов я оставляю читателю.

В 1983 г. А. Фрэйзер из Университета Цинциннати предложил весьма интригующую комбинацию изображений Кеннеди и Эренштейна. Если рассматривать верхний рисунок на этой странице с обычного расстояния, в верхней его части возникают яркие пятна, как при иллюзии Эренштейна, а в нижней части никаких иллюзорных пятен не возникает. Обратите внимание, что нижняя часть выполнена линиями, которые могут рассматриваться как касательные к окружностям на изображениях Кеннеди. Однако пятен не видно, не возникает и необычной яркости. Теперь отодвигайте от себя журнал. На некотором достаточно большом расстоянии яркие пятна в верхней половине рисунка почти исчезнут, зато нижняя окажется заполненной пятнами, которые кажутся более темными, чем вроде бы должны быть. Если наклонить журнал от себя, эффект резко усилится.

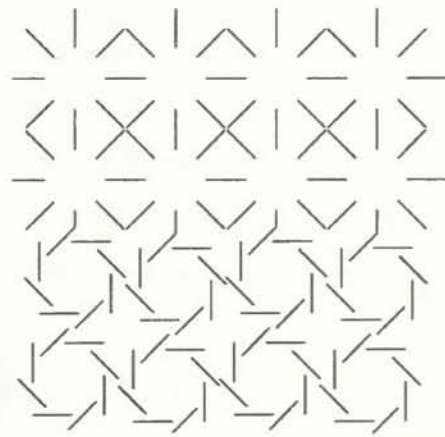
На нижнем рисунке, тоже предложенном Фрэйзером, есть спрятанное изображение. Увидеть его при рассматривании картинки с обычного расстояния почти невозможно. Если же отодвинуть журнал и смотреть на рисунок под углом, то появится слегка затемненная фигура. Она порождается пятнами, окруженными касательными линиями.

В 1981 г. Л. Спиллманн и К. Редис из нейропсихологической клиники Университета во Фрайбурге, ФРГ, предложили модифицировать основную иллюзию Эренштейна путем наложения на решетку прозрачной пленки с точками, нанесенными в случайном порядке. В зонах, где обычно возникают светлые пятна, точки кажутся расположенными менее плотно, чем в других местах. Может даже казаться, что они собраны в правильные кружки. Для меня эти места кажутся выступающими — как будто прикрыты маленькими полусферами, лежа-

щими поверх решетки. Иллюзорное повышение яркости, возникающее при обычной «решеточной» иллюзии, здесь отсутствует.

Если двигать пленку с точками по решетке, эти характерные пятна как бы «вскипают» и начинают двигаться в направлении перемещения пленки. Может быть этот сдвиг происходит из-за того, что зрение как бы задерживается на воспринимаемых пятнах. Если передвигать аналогичную пленку по решетке Эренштейна, порождающей иллюзию ярких полос, то полосы также сдвигаются в направлении перемещения пленки. Если же вести пленку по диагонали в направлении одной группы полос, то эти полосы «оживают», а перпендикулярные им могут вообще исчезнуть. Пленки с точками, расположенными в правильном порядке, или изображениями, образованными пунктирными либо волнистыми линиями, не вызывают обычного иллюзорного повышения яркости на решетке, а при движении по решетке — смещения зон иллюзий.

Похожая иллюзия возникает, если пленку с иллюзорными полосами на



Изображение, придуманное А. Фрэйзером

решетке Эренштейна наложить на экран телевизора, переключенного на пустой канал (для этого больше подходит черно-белый телевизор). В этом случае на экране под теми местами пленки, где вы видите иллюзорные фигуры, возникают маленькие «смерчи», вращающиеся по часовой или против часовой стрелки и состоящие из хаотически движущихся «снежинок».

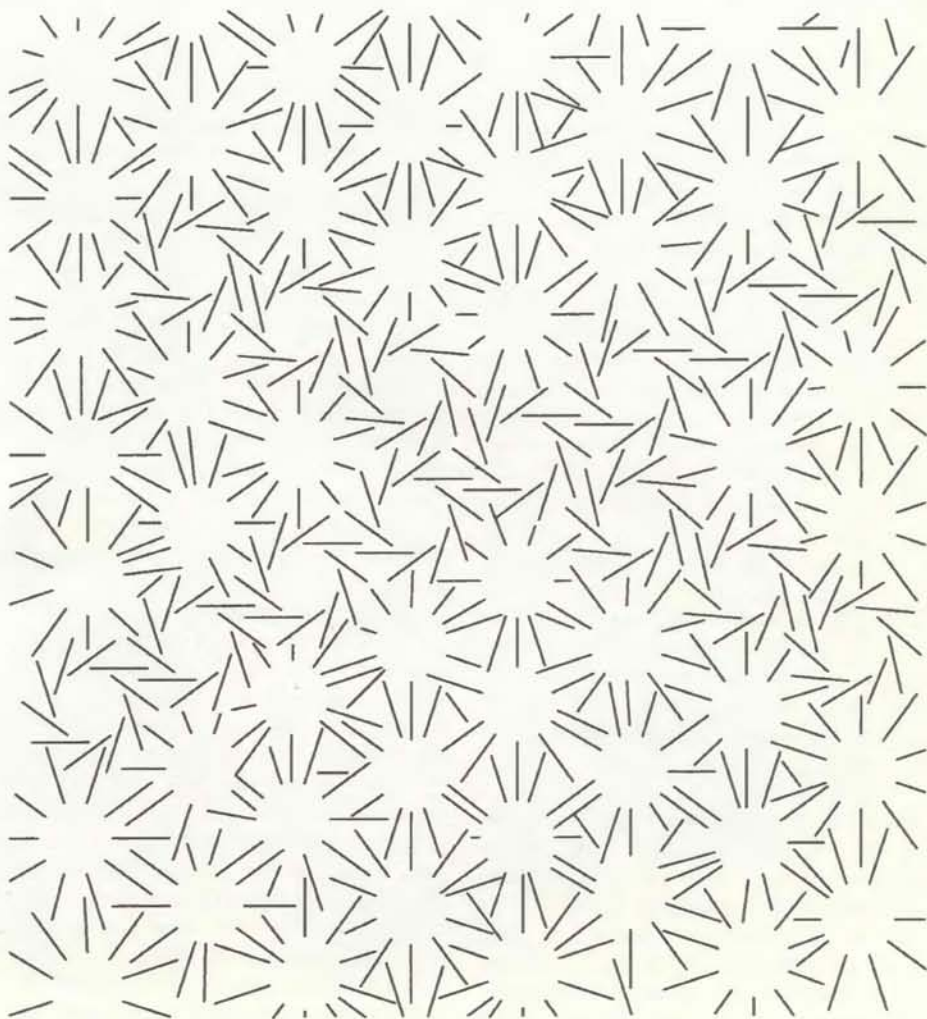


Рисунок Фрэйзера со «спрятанным» изображением



# Занимательный компьютер

## Нанотехнология:

### микроскопические подводные лодки, путешествующие по кровеносным сосудам и управляемые молекулярными компьютерами



А. К. ДЬЮДНИ

**Б**УДУТ ЛИ когда-нибудь машины, размером с митохондрию, введены в организм человека? Если при одной мысли о том, что по вашим внутренностям будут ползать крошечные механизмы, вас пробивает озноб, то подумайте, какие зато открываются при этом возможности. Микроскопические машины в виде миниатюрных подводных лодок, бороздящих сосудистую систему, будут уничтожать вредные микроорганизмы или жировые частицы в крови человека и тем самым они смогут продлить вашу жизнь.

Такие исцеляющие машины в какой-то степени являются изобретением К. Эрика Дрекслера, работающего в рамках международного обмена учеными на факультете вычислительной техники в Станфордском университете. Вот уже более десяти лет Дрекслер разрабатывает основы нанотехнологии — революционной концепции построения машин, имеющих размеры порядка нанометра (одной миллиардной доли метра). Он сконструировал зубчатые передачи и подшипники атомных размеров и описал молекулярные манипуляторы. Он разработал даже логические схемы наноконピューтера, описанию которого в основном и посвящена настоящая статья. И хотя нанотехнология пока завладела воображением лишь Дрекслера и еще нескольких энтузиастов, она, как видно по всему, несет на себе печать неизбежности. Будущее, которое она сулит, представляется более удивительным, чем любая научная фантастика.

Следует заметить, что Дрекслер не первый, кому пришла в голову мысль о нанотехнологии. В 1959 г. Фейнман описал последовательность машин все меньших и меньших размеров; на каждом уровне этой последовательности машины должны создавать себе подобных, но меньшего размера. По мнению Дрекслера, на последней

ступеньке этой лестницы могут находиться механизмы, собранные из деталей размером не более нескольких атомов. Подобные изделия в зависимости от их конструкции и предназначения могли бы путешествовать по организму человека, проникая в раковые клетки и перестраивая их ДНК. Мириады других могли бы работать на стройке, облепив едва заметной металлической пленкой сооружаемое здание. В течение нескольких дней они могли бы завершить сооружение необычной изящной конструкции.

Дрекслер считает, что ключевым шагом в развитии нанотехнологии явилось бы создание машин-ассемблеров, маленьких механизмов, управляющих операциями химического соединения вступающих в реакцию молекул. Запрограммированные на выполнение определенных операций и работающие на миниатюрном сборочном конвейере ассемблеры могли бы создавать микроскопические машины заданной конструкции. Ежечасно такие фабрики размером не более песчинки могли бы выпускать со своих сборочных линий миллиарды машин, которые, подобно струйке пыли, выходили бы из фабричных ворот или в виде коллоидного раствора поступали бы в водную среду.

В природе уже существуют наномашин (своего рода), обитающие в водной среде. Вспомним, например, хорошо известный бактериофаг T4, который воспроизводит себя, проникая в тело бактерии. Бактериофаг прикрепляется к внешнему слою молекул бактерии и затем, подобно крошечному шприцу, впрыскивает в бактерию свою ДНК. ДНК фага перестраивает процесс синтеза белков в бактерии таким образом, что та начинает производить сотни микроскопических компонентов фага. За счет случайных столкновений эти компоненты соединяются друг с другом и образуют новые заряженные ДНК «шприцы», ко-

торые после того, как распадается оболочка бактериальной клетки, распространяются в поисках новых жертв.

Другим примером наномеханизма может служить отдельная часть некоторых бактерий, которые обладают так называемым жгутиком — длинным спиралевидным образованием, выступающим с одного или обоих концов бактериальной клетки. Такие микроорганизмы плавают, вращая своим жгутиком, подобно штопору. Жгутиком управляет своеобразный моторчик, находящийся под оболочкой бактерии. По существу этот моторчик представляет собой белковый ротор, вращаемый силами ионного взаимодействия.

Одним из важнейших компонентов любой мыслимой нанотехнологии является подшипник. Как правило, подшипники в той или иной форме требуют смазки. В 1959 г. Фейнман отмечал, что «говоря о смазке, следует иметь в виду некоторые интересные особенности. Эффективная вязкость масла должна быть все выше и выше по мере уменьшения размеров механизмов, в которых она используется... На самом деле можно обойтись вообще без смазки! Даже совершенно сухие подшипники не будут перегреваться, потому что тепло уходит из таких маленьких устройств очень и очень быстро».

Будет ли работать более легкая смазка? Даже если заменить масло керосином, вязкость все же будет возрастать. Однако, как отмечает Дрекслер, «в масштабах типичной наномашинны молекула керосина скорее является физическим телом, нежели смазочным материалом». В своей статье, посвященной зубчатым передачам и подшипникам, он обращается к проблеме трения в роликовых подшипниках. Благодаря тому, что в структурах микроскопического масштаба необходимо учитывать взаимодействие между отдельными атомами, естественно ожидать, что в роликовых подшипниках нанометрового размера будут возникать значительные силы трения покоя и скольжения. Силы, действующие между атомами, частично могут быть описаны формулой потенциала взаимодействия Вандер-Ваальса. Эта формула содержит экспоненциальный член, описывающий большую часть столкновений между атомами.

Дрекслер полагает, что проблема трения может быть решена путем использования роликовых подшипников, в которых атомы расположены рядами, чередующимися с такими же рядами роликов в обойме подшипника — кольцевой дорожке, вдоль кото-



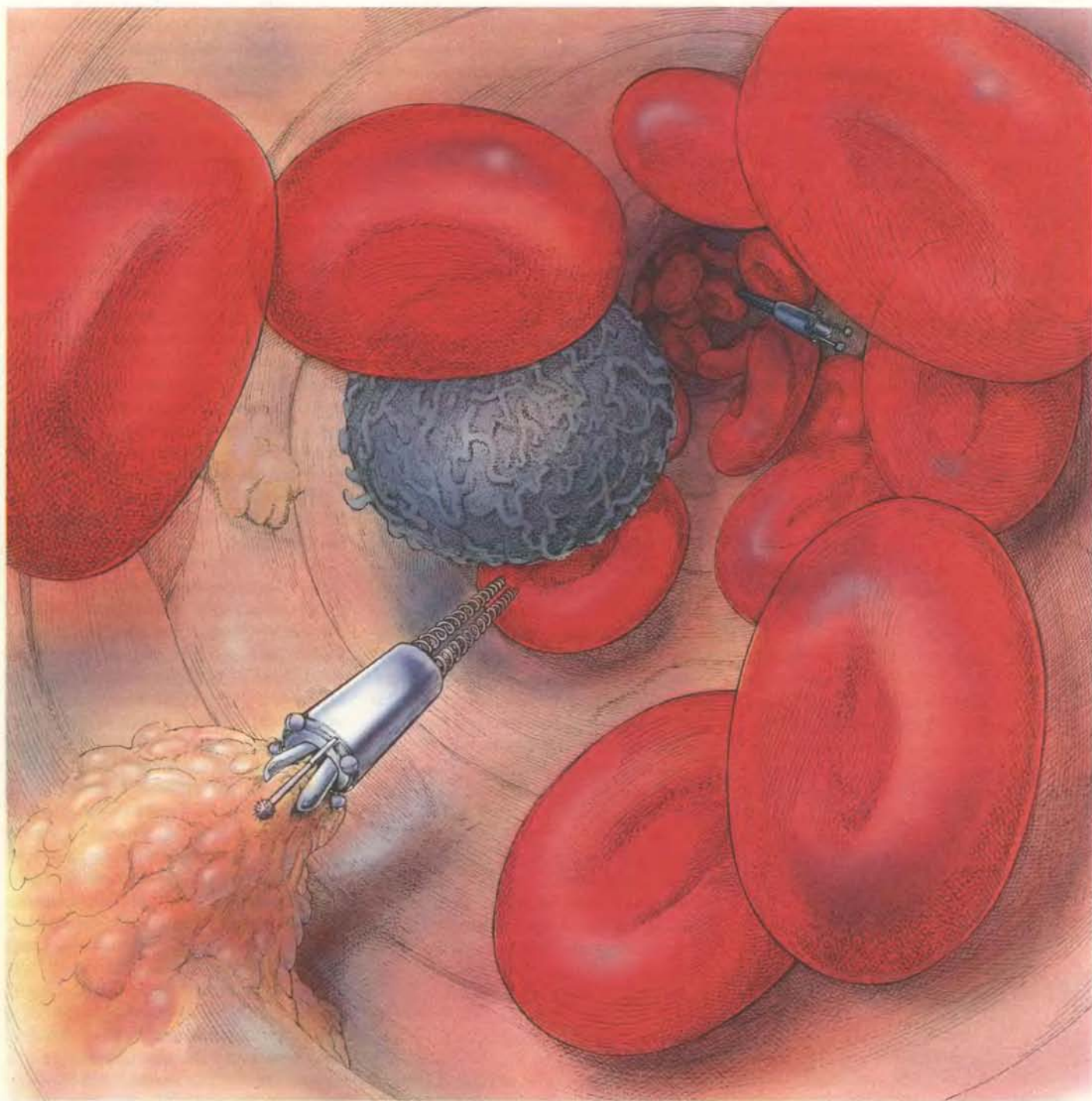
рой двигается подшипник. Ассемблер, способный манипулировать отдельными атомами таких элементов, как углерод и фтор, может построить подшипник и его обойму из атомов углерода в виде структуры с одной связью, аналогичной структуре алмаза. Подшипник будет представлять собой полый цилиндр. Поверхность подшипника и обоймы будет усеяна атомами фтора, расположенными в виде наклонных рядов (см. рисунок на с. 84). По тому же принципу могут быть построены зубчатые передачи.

Дрекслер рассматривает также проблему трения скольжения между поверхностями атомов. Обладая воз-

можностью располагать атомы по определенным позициям, не нарушая при этом физических законов, можно воспользоваться такими расположениями, при которых силы отталкивания Ван-дер-Ваальса становятся меньше. Например, атом, движущийся вплотную к поверхности, которая состоит из рядов других атомов, расположенных подходящим образом, будет испытывать сравнительно небольшое сопротивление. Однако при этом он должен двигаться по прямому пути непосредственно над желобком между двумя соседними рядами. Дрекслер полон энтузиазма и относительно ряда других идей. С некоторы-

ми из них можно познакомиться лишь в технических отчетах Дрекслера, в которых содержится подробная информация о гипотетических винтиках и гаечках нанотехнологии. Более общий обзор положения дел в этой области можно найти в книге Дрекслера «Двигатели созидания» (Engines of Creation, см. библиографию на с. 96).

Представим на минуту, что создание «подводной лодки», способной передвигаться в кровеносных сосудах, о которой говорилось выше, уже технически возможно. Каким образом можно управлять ею? Конечно, наноконьютером, но каким именно?



*Наномашина, проплывающая по капилляру, атакует жировые отложения*



Можно воспользоваться электронными компьютерами, говорит Дрекслер, однако сам он сосредоточил свое внимание на механических компьютерах, основанных на элементах так называемой «стерженьковой логики». Хотя логические операции в этих элементах реализуются перемещением молекулярных стерженьков по миниатюрной матрице, их никак не назовешь медленными. В масштабе атомарных размеров такие стерженьки перемещаются из одного положения в другое всего лишь за 50 пс (пикосекунда — одна триллионная часть секунды).

Основной функциональный элемент компьютера — это логический вентиль. На входе его имеется одна или несколько входных линий и одна выходная линия (которая затем может разветвляться на несколько линий). Входные и выходные сигналы бывают двух видов; обычно они обозначаются 0 и 1. Поскольку значение сигнала в одной и той же линии может со временем меняться, каждую линию удобно обозначать переменной величиной, например  $x$ . Логическую функцию вентиля можно описать формулой. Например, формула « $x$  и  $y$ » соответствует так называемому вентилю И. Выходной сигнал такого вентиля равен 1 тогда и только тогда, когда оба входных сигнала  $x$  и  $y$  равны 1. Аналогичным образом формула « $x$  или  $y$ » описывает функцию вентиля ИЛИ. В данном случае выходной сигнал вентиля равен 1, если хотя бы один из входных сигналов  $x$  или  $y$  равен 1. Из вентилях двух этих типов, вместе с третьим вентиляем НЕ, называемым инвертором, можно построить логическую схему, реализующую любую функцию. Инвертор преобразует сигнал, равный 1, в 0 и, наоборот, равный 0 в 1.

В современных электронных компьютерах схемы логических вентилях собираются на транзисторах микронного размера, формируемых с помощью специальной технологии на поверхности кристалла. Слой обработанного кремния, легированного при-

месями, отличающимися избытком или недостатком свободных электронов, покрывается слоем поликристаллического кремния. Поверх этих двух слоев обычно располагается еще металлический слой, как правило, из алюминия. Он служит проводником для электрической связи транзисторов. Конечно, не все участки поверхности кристалла содержат все три слоя. Точная структура расположения этих слоев определяется схемой соединения транзисторов. Обычно металлический слой имеет вид сверхтонких полосок алюминия, протягивающихся во всевозможных направлениях по всей поверхности кристалла.

В таких микросхемах сигналы, проходящие по миниатюрным алюминиевым проводникам, могут принимать два различных уровня напряжения, кодирующих логические значения 0 и 1. Наиболее широко используются вентиля типа И-НЕ, которые в терминах простых логических функций, описанных выше, можно представить выражением «НЕ ( $x$  И  $y$ )». Другими словами, выходной сигнал вентиля И-НЕ равен 1 в том случае, если оба сигнала на входе  $x$  и  $y$  не равны одновременно 1. Таким образом, если хотя бы один из входных сигналов равен 0, на выходе устанавливается 1. Пользуясь только вентилями И-НЕ, можно реализовать любую логическую функцию независимо от ее сложности.

Микросхемы, конечно, очень малы. Их компоненты имеют размеры несколько микронов (миллионных долей метра). Дрекслер же предлагает нам рассмотреть компьютер, который бы целиком уместился в одном транзисторе кремниевой микросхемы.

Логические функции в гипотетическом наноконьютере Дрекслера реализуются с помощью бесконечно маленьких стерженьков, заменяющих проводники с двумя уровнями напряжения, кодирующими логические 0 и 1. Стержень размером в несколько атомов может скользить между двумя возможными положениями. Эти положения можно рассматривать как представления логических значений 0 и 1. Стержень сделан из карбина, цепочки атомов углерода с чередующимися одинарной и тройной связями. Этот стержень оказывается достаточно жестким и прочным, чтобы выполнять свои функции, и все же остается достаточно гибким, чтобы скользить вдоль не очень острых углов. У карбиновых стерженьков имеются образования, которые мы будем называть головками. Они бывают двух видов (см. верхний рисунок на с. 85). Головки одного вида просто выдаются наружу, мы будем на-

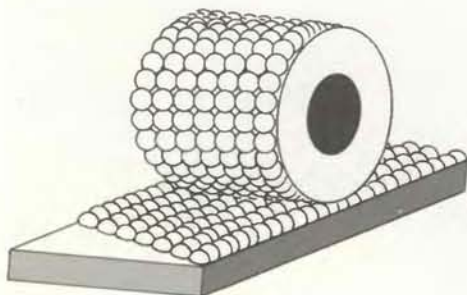
зывать их зондирующими или тестирующими. Головки другого типа подобны створкам и называются блокирующими.

Основание головок обоих типов образовано шестиугольным пиридазиновым кольцом, прикрепленным с каждой стороны к карбиновой цепочке. Тестирующая головка имеет второе углеродное кольцо поверх пиридазинового. Это внешнее кольцо содержит один атом фтора, который выдвинут вперед и играет роль логического зонда. Блокирующая головка несколько отличается от головки зонда, в частности, тем, что она содержит фторированное тиофеновое кольцо. Впрочем, названия здесь не так важны. В дальнейшем мы просто будем предполагать, что такие структуры могут выполнять функции тестирования и блокирования. Достаточно сказать, что Дрекслер провел подробные вычисления, для освещения которых у нас здесь не хватит места и которые касаются, в частности, напряжений, выдерживаемых стерженьками при тепловом колебании молекул.

Кроме стерженьков логические схемы механического наноконьютера состоят также из трехмерной матрицы, построенной из атомов элементов — соседей углерода в периодической таблице. По этой структуре в двух взаимно перпендикулярных направлениях на многих уровнях протягиваются каналы. Каким образом стерженьки реализуют логические функции в этой матрице?

Представим себе один горизонтально расположенный в своем канале стержень, и пусть он находится в одном из двух дозволённых положений. Предположим для простоты, что этот «логический стержень» имеет две тестирующие головки и одну блокирующую (см. нижний рисунок на с. 85). Такой стержень проходит через три замка, полые зоны матрицы, где два стержня (и их головки) пересекаются под прямым углом. При прохождении каждого замка возникает неопределенность, проскользнет ли головка-зонд одного стержня мимо блокирующей головки другого или будет захвачена ею. Из трех замков, через которые может пройти рассматриваемый нами стержень, в двух левых замках находятся блокирующие головки двух вертикальных стержней, обозначенных  $x$  и  $y$ . Замок, расположенный справа, содержит головку-зонд, прикрепленную к третьему вертикальному стержню  $f$ .

Горизонтальный стержень и его замки служат для вычисления логической функции И-НЕ. Два вертикальных стержня слева представляют



Роликовый подшипник из фторированного алмаза

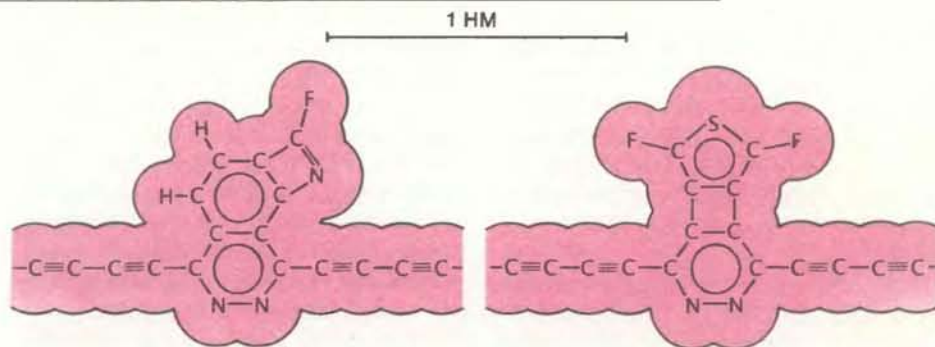


входные переменные  $x$  и  $y$ . Вертикальный стержень справа представляет выходной сигнал операции И-НЕ.

Предполагая, что вертикальный входной стержень представляет логическое значение 0 в верхнем положении и 1 — в нижнем, рассмотрим ситуацию, когда  $x = 0$  и  $y = 1$ . Другими словами, стержень  $x$  находится в верхнем положении, а  $y$  — в нижнем. В этом случае мы не сможем протолкнуть логический стержень влево мимо обоих вертикальных стержней, поскольку  $x$  находится в верхнем положении и его блокирующая головка стоит на пути зонда логического стержня. Только если стержень  $x$  будет также в нижнем положении, обе тестирующие головки рассматриваемого нами стержня смогут миновать соответствующие блокирующие головки, так чтобы стержень мог беспрепятственно скользить влево.

Ну а что же выходной стержень  $f$ ? Он может проверить, перешел ли наш логический стержень в свое новое положение, введя свой зонд в замок, содержащий блокирующую головку логического стержня. Когда горизонтальный стержень находится в правом положении, стержень  $f$  сможет миновать его, перейдя тем самым из логического состояния 0 в состояние 1. Однако, если логический стержень может проскользнуть в левое положение, его блокирующая головка будет препятствовать тестирующей головке  $f$  при ее прохождении через замок и поэтому стержень  $f$  будет иметь состояние 0. Таким образом, значение сигнала  $f$  будет равно 1, когда  $x$  и  $y$  оба одновременно не будут равны 1, что и соответствует требованиям функции И-НЕ.

Вычислительный цикл стержневого компьютера Дрексlera разбивается на три отдельные фазы, которые многократно следуют друг за другом с молниеносной быстротой. На первой фазе устанавливаются входные замки, при этом входные стержни временно оттягиваются. Это позволяет всем логическим стержням уйти в исходное положение. Во второй фазе входные стержни занимают свое текущее положение. Они могут соединяться с различными сенсорами наномашин или с выходами самого нанокomпьютера. Затем в едином движении все логические стержни тянутся влево, если можно так выразиться. Наконец, в заключительной фазе определяются значения выходных переменных, когда ко всем выходным стержням прикладывается сила, вынуждающая их двигаться по своим каналам. Перемещаются же лишь те из них, которые оказываются незаблокированными.



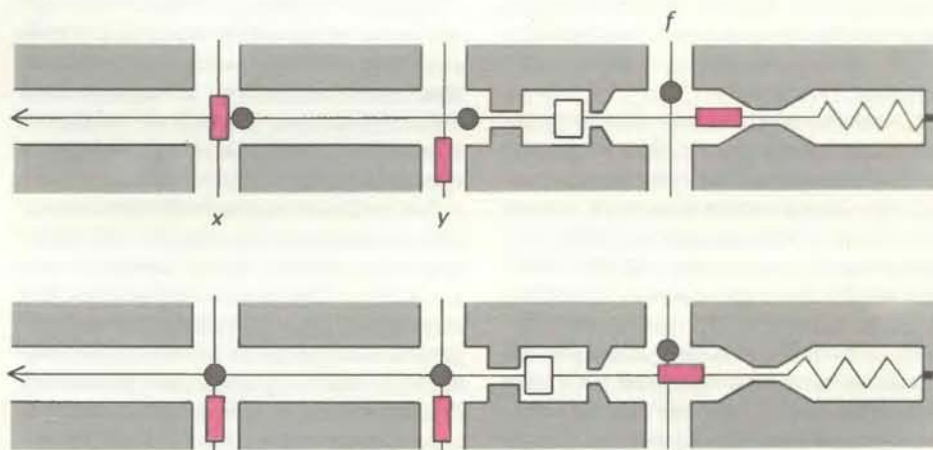
Тестирующая (слева) и блокирующая (справа) головки на карбиновом логическом стержне

Специалисты, работающие в области искусственного интеллекта, наверняка возразят: даже если допустить, что в таком крошечном объеме можно разместить достаточно большие вычислительные мощности, то каким образом Дрекслер собирается наделить свои микроскопические автономные машины необходимым «интеллектом»?

На подобные возражения Дрекслер отвечает, что хотя в его машины можно встроить очень мощный центральный процессор, некоторые наномашинны совсем не обязательно должны обладать значительным интеллектом. Взять к примеру описанный выше нанонаутилус — машину, предназначенную для лечения. Путешествуя по кровеносным сосудам человека, такая наномашинна могла бы поглощать из крови глюкозу и кислород. Эти вещества обеспечивали бы машину необходимой энергией. Возможно, что у человека, в крови которого находятся миллиарды нанонаутилусов, время от времени будут возникать едва заметные неприятные ощущения. Во всяком случае, каждая машинна будет использовать энергию, получаемую от своих «глюкозных двигателей» (конструируемых в настоящее время) для того, чтобы приводить в движение два спиралевид-

ных пропеллера. Движение машины может быть и неуправляемым. Когда она наткнется на что-нибудь, центральный процессор получает сигнал от нанометрового контактного переключателя в ее передних сенсорах. Затем те же сенсоры используют различные встроены в них ключи-шаблоны для определения молекулярной структуры препятствия.

Если препятствие окажется клеткой стенки сосуда, красным кровяным тельцем, лейкоцитом или еще каким-нибудь представителем заданного набора объектов, то наномашинна на короткое время даст задний ход, а затем продолжит свое путешествие. Если же ей встретится болезнетворная бактерия или вирус, то она раскроет свои механические челюсти и проглотит настолько большой кусок объекта, насколько сможет откусить. К таким объектам относятся также вредные отложения и вообще все то, на что будет запрограммирована наномашинна (см. рисунок на с. 83). Проглоченные куски подвергаются искусственному химическому разложению, и продукты переработки, выпущенные в кровь, удаляются впоследствии почками. В кровеносной системе, населенной такими работающими наномашиннами, у болезнетворных бактерий и других нежелательных тел бу-



Логический стержень выполняет операцию И-НЕ



дут очень маленькие шансы на то, чтобы выжить и просуществовать более нескольких часов.

Конечно, все это мечта — по крайней мере пока. Мы едва достигли порога мира нанотехнологии. Прав ли Дрекслер, утверждая, что нечто подобное этой фантастической мечте осуществится на самом деле? Он упорно защищает свои идеи, иногда несколько изменяя их под влиянием серьезных критических замечаний своих ученых коллег. Однако пока он остается технологом без технологии, эрудированным мечтателем. Наверное, максимум, чего ему удастся достичь, — это внести свой вклад в стимулирование научной мысли — движущей силы нашего технического прогресса. При этом лично он не проявляет слепого оптимизма, отдавая себе отчет в том, что реализация нанотехнологии несет в себе опасности, может быть даже большие, чем атомное оружие или генетические эксперименты, вышедшие из-под контроля.

Один из энтузиастов нанотехнологии недавно сказал мне, что «тысячи из тысяч тех, кто живет сейчас, не умрут никогда». Любопытно, что один верующий говорил то же самое моему отцу полстолетия назад.

**В** СТАТЬЕ нашей рубрики в ноябрьском номере мы обсуждали программу Рича Голда, которая моделирует на персональном компьютере вечеринку с несколькими приглашенными людьми. Помещение, в котором собираются гости, представляет собой квадратную решетку на экране дисплея. Гости перемещаются с клетки на клетку в поисках наибольшего комфорта. У каждого приглашенного есть своя предпочтительная дистанция по отношению к каждому другому участнику вечеринки. Он (или она) перемещается в том направлении, которое уменьшает чувство дискомфорта в сложившейся на данный момент конфигурации. Чувство дискомфорта вычисляется путем суммирования разностей между предпочтительной и реальной дистанцией по отношению к каждому гостю.

Основной цикл программ был предельно простым. По мнению А. Чарльзворта из Университета шт. Виргиния, такая простота может несколько исказить картину. Чарльзворт занимался изучением параллельных программных систем, называемых системами «мультирандеву». Если бы каждый гость был представлен в виде отдельного процесса на языке параллельного программирования, то «после каждой итерации все такие процессы могли бы проводить "совещание", чтобы поделиться информацией о новом расположении гостей».

Однако и в нашей обычной последовательной модели можно избежать искажений, если не перемещать гостей до тех пор, пока степень дискомфорта каждого из них не будет подсчитана.

А. Пенсер из Хантсвилля (шт. Алабама) остался неудовлетворенным по поводу функции, с помощью которой вычисляется степень дискомфорта гостей. Он предпочел бы разности между идеальными и реальными расстояниями возводить в квадрат. Насколько существенными будут отличия в поведении тех же гостей при тех же исходных положениях? Очевидно, силы взаимного притяжения и отталкивания будут значительно

сильнее зависеть от расстояния между гостями.

Как я уже говорил в конце своей статьи в ноябрьском номере, существует даже своеобразная наука — проксемика. У. Икингер-младший из Мэрилендского университета построил как-то шестиугольную решетку, которую можно, подобно ковру, расстелить на полу, чтобы наблюдать за расстояниями, разделяющими различных участников сборища. Икингер очень увлечен программами, которые моделируют поведение гостей, и хотел бы связаться со всеми энтузиастами в США, разделяющими его увлечение.

## Наука и общество

### Белки-виновники

**Б** ОЛЕЗНЬ Альцгеймера — заболевание тяжелое и безнадежное. У страдающих им людей развивается слабоумие, они теряют трудоспособность и умирают от различных нарушений жизнедеятельности, обусловленных поражением мозга. В настоящее время в США диагноз «болезнь Альцгеймера» имеют 2 млн. больных и ежегодно 100 тыс. человек умирают от этого заболевания. Выявлены два белка, связанных с болезнью Альцгеймера, — белок А68 и белок  $\beta$ -амилоида. Вначале считалось, что роковую роль играет амилоид, но недавно подозрение пало на белок А68.

Оба белка обнаруживаются в организме взрослого человека в двух случаях — при синдроме Дауна в возрасте старше 35 лет и при болезни Альцгеймера. В мозгу больного белок  $\beta$ -амилоида образует так называемые сенильные бляшки, а белок А68 находится в нейрофибрилярных клубках — скоплениях скрученных филаментов. И бляшки, и клубки способствуют омертвлению и разрушению ткани мозга, что проявляется в прогрессирующем слабоумии.

Белок  $\beta$ -амилоида был первым назван ключевым фактором заболевания. А в 1984 г. Дж. Гленнер и его коллеги из Медицинского центра Калифорнийского университета в Сан-Диего показали, что амилоидные бляшки у лиц, страдающих болезнью Альцгеймера, и у больных с синдромом Дауна одинаковы. Вскоре несколько исследователей установили, что ген белка  $\beta$ -амилоида расположен на хромосоме 21, которая при синдро-

ме Дауна присутствует в клетках в количестве трех копий, а не двух, как в норме. Поскольку многие патологические явления при синдроме Дауна считаются связанными с избыточным производством определенных белков, обусловленным наличием лишней хромосомы 21, это давало основание думать, что и болезнь Альцгеймера объясняется дубликацией гена белка  $\beta$ -амилоида, ведущей к перепроизводству белка. Действительно, Ж.-М. Делабар из больницы Некер в Париже сообщил, что обнаружил дубликацию гена белка  $\beta$ -амилоида в образце ткани, взятом у пациента с болезнью Альцгеймера.

Однако этому противоречат сведения, опубликованные недавно в журнале «Science». В трех отдельных исследованиях изучались посмертные образцы крови и ткани мозга более 100 человек, страдавших болезнью Альцгеймера, с целью обнаружить дубликацию гена амилоида или генов, расположенных вблизи него на хромосоме 21. Во всех случаях количество ДНК, кодирующей ген амилоида, оказалось почти таким же, как в контрольных образцах (взятых у людей без малейших признаков болезни Альцгеймера), и было в 1,5 раза меньше, чем у больных с синдромом Дауна. По мнению П. Джорджа-Хислопа из Массачусетской больницы, который провел одно из этих исследований, если дубликация гена белка  $\beta$ -амилоида и происходит, то очень редко и, следовательно, не может быть тесно связана с заболеванием.

Теперь ключевая роль в болезни Альцгеймера отводится белку А68. Согласно П. Дэвису из Медицинского колледжа им. Альберта Эйнштейна



Университета Иешива в Нью-Йорке, в норме белок A68 присутствует в мозгу человека в раннем детском возрасте, участвуя в запрограммированной гибели клеток, в ходе которой целенаправленно и упорядоченно ликвидируются лишние нейроны. К двум годам, когда этот процесс завершается, белок A68 исчезает. Он вновь появляется в мозгу при болезни Альцгеймера, предшествуя началу заболевания. Данные, представленные Дэвисом на ежегодном съезде Нейрологического общества, свидетельствуют, что наличие в мозгу белка A68 четко коррелирует с болезнью Альцгеймера и синдромом Дауна, а у нормальных людей, в том числе пожилых, он отсутствует.

По-видимому, возможны два пути развития заболевания вследствие присутствия в мозгу белка A68: он вызывает рост нейрофибриллярных клубков или же опосредует гибель клеток, как в мозгу ребенка. Остается неясным, какие факторы обуславливают активацию гена белка A68 после многолетней бездеятельности. Дэвис считает, что дело в каком-то факторе внешней среды. Сейчас важнее установить хромосомную локализацию гена белка A68. Если окажется, что этот ген расположен на хромосоме 21, вновь появится основание считать болезнь Альцгеймера связанной с генетическим дефектом. До тех пор, пока такая локализация гена белка A68 не доказана и не исключена, о связи между болезнью Альцгеймера и синдромом Дауна можно только гадать.

Д. Пэттерсон, возглавляющий Институт Элеоноры Рузвельт по онкологическим исследованиям в Денвере, полагает, что болезнь Альцгеймера, подобно раку, может иметь не одну причину. Дэвис не согласен с этим: «Мне трудно поверить в гетерогенность болезни Альцгеймера, потому что она в очень большой степени предсказуема». Ожидается, что локализация гена белка A68 будет опубликована в ближайшие месяцы; это будет значительным шагом в понимании природы и механизма болезни Альцгеймера.

### *Кризис на бирже и его жертвы*

**К**РАХ. Банкротство. Паника. Какими еще словами можно описать ситуацию, сложившуюся на американской фондовой бирже в октябре 1987 г? Беспокойство за будущее высших учебных заведений охватило представителей администрации университетов и институтов. Общее мнение по этому поводу высказал Э. Керрами, декан аспирантуры Рокфелле-

ровского университета, заявив: «В трудные времена каждый стремится урезать средства на научные исследования и образование».

Неожиданный и сильный удар был нанесен по фондам многих учебных заведений. В «черный понедельник» 19 октября, когда индекс Доу-Джонса в среднем упал на 500 пунктов, объем пожертвований в фонд Станфордского университета снизился на 200 млн. долл., т. е. более чем на 10%. Постоянный университетский фонд шт. Техас размером 3,8 млрд. долл., из которого финансировались Техасский университет и Агрономическо-механизаторский университет того же штата, уменьшился на 400 млн. долл. В то же время представители администрации некоторых университетов, отмечая, что к концу ноября 1987 г. положение рынка было примерно таким же, как год назад, расценивают эти спады не более как «бумажные потери», которые очень слабо повлияют на долгосрочное финансирование. «Наши фонды снизились, но они все же выше, чем были в начале года, — заявил Г. Стрел, казначей Массачусетского технологического института. — Как увеличение средств не сыграло большой роли, так и их уменьшение никак не сказалось».

Другие настроены менее оптимистично. Рокфеллеровский университет, фонды которого упали на 45 млн. долл., недавно уменьшил процент отчислений в годовой бюджет. «Обычно он составлял 6%, — сказал казначей университета Б. Дресс. — Теперь он снизился до 5%. Это означает, что средств на новые исследования и научное оборудование будет отпущено несколько меньше. Хотя сумма останется в пределах допустимого, все же нельзя сказать, что сокращение обойдется безболезненно».

Р. Макдугалл, казначей Гарвардского университета, считает, что «самую большую озабоченность вызывает тот факт, что люди, которые потеряли свои деньги на рынке ценных бумаг, или те, кого ожидают такие потери в будущем, воздержатся от щедрых пожертвований». «Вклады состоятельных лиц, — сказал Макдугалл, — составляют основную часть тех денег, за счет которых американская система высшего образования достигла столь высокого уровня». Приrost фондов уже снизился после того, как в 1986 г. был введен закон, предусматривающий уменьшение налоговых льгот для лиц, вносящих пожертвования. «Сейчас люди призадумываются, прежде чем решиться пожертвовать свои деньги, — заявил Т. Хервитс, вице-президент Кали-

форнийского технологического института. Они воздержатся от пожертвований или завешают эти деньги».

Д. Мирз, ответственный за координацию работ по контрактам и привлечение стипендиатов в Калифорнийском университете, считает, что частные фонды, большинство из которых уже вложили немалые средства в виде ценных бумаг, также могут сократить размер пожертвований. «Мне известен президент одного частного фонда, потерявшего в результате последних событий на бирже 40 млн. долл., — сказал Мирз. Это заставит его строже относиться к расходам». По словам Дресса, крупные корпорации, выделяющие средства на благотворительные цели, такие, как IBM и Monsanto (даже если падение стоимости их собственных акций не сказывается непосредственно на их доходах), могут сократить число оплачиваемых мест для ученых-стипендиатов в университетах из-за страха перед наступающими трудными временами. Как заявил Дресс, «они наверняка сначала сократят число оплачиваемых мест для стипендиатов в университетах, а уж потом урежут средства на собственные исследования и разработки». По прогнозам многих экономистов, «черный понедельник» является предвестником надвигающегося спада в экономике, который будет характеризоваться значительным сокращением потребительских расходов и стоимости закупок товаров производственного назначения. Дж. Россе, проректор Станфордского университета и экономист, отмечает, что никто не может с полной определенностью предсказать, будет спад или нет. «Если говорить прямо, — добавляет Россе, — думаю, что вероятность того, что нам не миновать спада в течение следующих 12 месяцев, возросла».

Дефицит федерального бюджета в значительной степени образовался за счет резкого падения стоимости ценных бумаг на фондовой бирже; урезание бюджета, вызванное этим обстоятельством, может означать сокращение субсидий правительственных организаций на выплату стипендий ученым в университетах. Мирз отмечает, что закон Грэмма — Рудмена — Холлингза, который предусматривает сокращение бюджета на 1988 г. на 23 млрд. долл., снизит общие расходы на науку. «Если обе политические партии считают, что необходимы дополнительные сокращения бюджета с целью сохранения устойчивого положения в экономике, — говорит Мирз, — то эти сокращения могут оказаться еще более значительными, и в дальнейшем они будут производиться еще не раз».



## Книги

Небесные дали;  
скалистые острова; толстые и худые люди

## ФИЛИП MORRISON

*Свенд Лаустсен, Клаус Мадсен, Ричард М. Уест.* Изучая южное небо: Иллюстрированный атлас, составленный Европейской южной обсерваторией

EXPLORING THE SOUTHERN SKY: A PICTORIAL ATLAS FROM THE EUROPEAN SOUTHERN OBSERVATORY, by Svend Laustsen, Claus Madsen and Richard M. West. Springer-Verlag (\$39)

*Р. Брент Талли, Дж. Ричард Фишер.* Атлас ближайших галактик NEARBY GALAXIES ATLAS, by R. Brent Tully and J. Richard Fisher. Cambridge University Press (\$59.50)

*Кристина Джоунз, Вильям Форман.* Небо в различных волновых диапазонах

THE SKY AT MANY WAVELENGTHS, by Christine Jones and William Forman. AS311, Astronomical Society of the Pacific (\$16.50)

**Ч**ТОБЫ показать «исключительную красоту южного неба» и дать представление о том, чем они занимаются, три датских астронома из Европейской южной обсерватории, авторы первой из рецензируемых книг, поместили на страницах своего издания целую коллекцию превосходных фотографий. Купола телескопов, рабочие домики и взлетно-посадочная полоса, — все это составляет маленький городок обсерватории, который расположен на лишенном всякой растительности горном перевале в пустыне Атакама (Чили) на высоте 2438 м. Воздух здесь удивительно чистый и сухой (примерно 5 см осадков за год), и атмосферные условия очень стабильны — как раз то, что нужно для больших и малых телескопов и для недавно введенной в строй большой субмиллиметровой радиоантенны.

Поскольку Млечный Путь находится здесь прямо над головой, ночное небо сияет тысячами звезд. Эти широты дают наилучшую возможность обзора в направлении центра нашего звездного скопления — Галактики и в то же время в направлении более отдаленных областей, которые называют Магеллановыми Облаками. Основная

станция Европейской южной обсерватории — Ла-Силла — обслуживает примерно половину всех астрономов мира, в основном из 8 стран-членов обсерватории. В настоящее время задействованы 14 телескопов, причем на самом большом из них, 3,5-метровом, наблюдения начались 12 лет назад.

На превосходных фотографиях большого формата, сделанных совсем недавно, изображен ряд наиболее интересных для наблюдателя в южном полушарии моментов. Мы видим комету Галлея в 1986 г. и ее изменяющийся газовый хвост. Комета Веста (открытая третьим из авторов в 1976 г.) с ее многочисленными пылевыми хвостами гораздо более яркая и красочная; она устремилась в глубины космоса, и ее можно будет видеть только через миллион лет. Благодаря расторопности авторов их атлас включает в себя сенсацию февраля 1987 г.: Сверхновую 1987А. На протяжении более 300 лет сверхновые не вспыхивали так близко от нас. Звезда как бы плывет в полосе Большого Магелланова Облака (показанного на цветных снимках в моменты до и после вспышки) среди целого скопления красноватых туманностей и пелены из пузырьков, являющихся, вероятно, остатками других сверхновых из далекого прошлого, с которыми наша сверхновая каким-то образом взаимодействовала.

Млечный Путь, как и следовало ожидать, занимает в атласе центральное место. Приложение к атласу представляет собой фотографию длиной в метр (отображающую полный круг Млечного Пути), которая составлена из восьми отдельных снимков, выполненных малой широкоугольной камерой с гидированием. Некоторые из снимков были сделаны в обсерватории Ла-Пальма на Канарских островах, а некоторые — в обсерватории Ла-Силла. Авторы предлагают «путеводитель» по всему кругу Млечного Пути, попутно объясняя многие феномены Галактики с помощью укрупненных фотографий, дающих большое число деталей. Например, три великолепные большие фотографии по-

казывают области в самом центре Галактики, густонаселенные звездами. Одна из этих областей просматривается через плотное облако пыли прямо перед отдаленным центральным ступком, присутствие которого обнаружено по излучению в радио- и инфракрасном диапазонах. В прилегающих областях облака редуют до тех пор, пока по мириадам звезд мы не начинаем понимать, что смотрим (уже не сквозь пылевое облако) в направлении дальнего края центрального звездного скопления нашей Галактики. Именно здесь находится уникальное оптическое окно, открытое Уолтером Баадом, — свободный от пыли район, через который он мог изучать звезды, находящиеся в десять раз ближе к центру Галактики, чем Солнце.

Представлены также другие галактики: маленькая и яркая эллиптическая галактика, которая, очевидно, есть центр большого плоского звездного диска, похожего на спиральную галактику, и великолепный снимок знаменитой сталкивающейся пары в созвездии Ворона с длинными звездными рукавами.

Один небольшой снимок в искусственных цветах действительно поучителен. Это изображение галактики в двух видах, полученное с помощью чувствительного электронного устройства — ПЗС-матрицы. На одном виде использован красный светофильтр, и сам снимок напечатан красным, на другом — голубой светофильтр. Наложенные друг на друга, эти снимки показывают галактику в голубом свете, украшенную десятками размытых красных точек, расположенных в основном по внутренним сторонам ее спиральных рукавов, где яркие новые звезды высвечивают облака атомарного кислорода. Две соседние области выбраны специально, чтобы составлять яркий контраст. Одна из них расположена в направлении пустых глубин неба вдалеке от Млечного Пути. Видны лишь несколько слабых звезд и редко расположенные отдаленные галактики; это, вероятно, самая большая область неба, практически свободная от звезд. Если слегка изменить направление, то можно увидеть целое скопление галактик в созвездии Печь. На следующей странице показано увеличенное изображение одной из этих галактик, которое теперь предстает в виде цветного волчка.

Второй атлас состоит из одних карт; в нем представлены большие четкие карты нашего ближайшего внегалактического окружения, составленные на основе оптических и радионаблюдений. На первых картах (все составленные Джейн Дж. Эк-



# Книги издательства „Мир“

Дж. Гир, Х. Шах  
**ЗЫБКАЯ ТВЕРДЬ**

Перевод с английского



## П

опулярная книга американских сейсмологов посвящена землетрясениям, причинам их возникновения, связанным с ними разрушениям и возможностям прогноза. Большое внимание уделяется инженерным проблемам защиты от последствий землетрясения, рекомендациям для лиц, застигнутых землетрясением, подготовке к возможным землетрясениям в будущем. Изложение отличается обилием фактических сведений, остроумием предлагаемых решений, прекрасным образным языком. Содержание изложено на высоком научном уровне, но в то же время понятно любому читателю. Иллюстрации освежают и оживляют текст.

Содержание: Первое знакомство с землетрясением. Отчего бывают землетрясения? Оползни, разжижение грунта и другие последствия землетрясений. Цунами. Как измерить землетрясение и его эффекты. Прогноз землетрясений. Сейсмостойкое проектирование. Общественное и индивидуальное планирование. Подготовка к следующему землетрясению. Из отзыва доктора физ.-мат.наук Н. В. Шебакина: «Интересно построенная, богато иллюстрированная, обращенная к практическим нуждам человека — эта книга заполняет существенную брешь в популярной литературе о землетрясениях, освещая в доступной форме многие вопросы подготовки человека и общества к неизбежным сейсмическим катастрофам».

1988, 13 л. Цена 70 к.

ПРИБРЕТАЙТЕ КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА «МИР»  
В МАГАЗИНАХ — ОПОРНЫХ ПУНКТАХ ИЗДАТЕЛЬСТВА

121019 Москва,  
просп. Калинина, 26, п/я 42, магазин № 200 «Московский Дом книги»  
103050 Москва,  
ул. Петровка, 15, магазин № 8 «Техническая книга»  
117334 Москва,

▲ Ленинский проспект, 40, магазин № 115 «Дом научно-технической книги»  
191040 Ленинград,

Пушкинская ул., 2, магазин № 5 «Техническая книга»

Книга будет выслана наложенным платежом (без задатка)





кельман из фирмы Mapoa Mapworks, Гонулулу) тщательно отмечены расположения более чем 2400 галактик. Они изображены в виде кружков, треугольников, квадратов черного, синего, красного и других цветов соответственно их видимому размеру, типу и красному смещению. Полоса Млечного Пути практически не содержит внешних галактик, поскольку его пыль скрывает то, что за ней находится. Район южного полюса Галактики открывает другую область с малым числом звезд: в этом направлении расположено относительно мало близлежащих галактик. К северу, в направлении Скопления Девы, галактик, напротив, очень много.

Р. Брент Талли занимается оптической астрономией на Гавайях, а Дж. Ричард Фишер — радиоастрономией в обсерватории Грин-Бенк. Они вместе впервые применили новые эффективные методы измерения расстояний между галактиками. В первом наборе представлены двумерные карты, полученные на основе анализа наблюдений. Они есть, в сущности, проекции на плоскость неба облаков, скоплений, шпор (отростков) и провалов. По ним, однако, можно судить о расположении галактик в пространстве, т. е. одинаковые красные смещения свидетельствуют об одинаковых расстояниях.

Сначала авторы выделяют из этих близлежащих галактик примерно два десятка групп, а затем ставят перед собой более широкую задачу — переходят от двумерной классификации с красным смещением к полной трехмерной модели. На первой пространственной карте отображены только цветные точки на небесной плоскости — это отправной пункт. Затем красное смещение рассматривается как величина, пропорциональная расстоянию в пространстве. Неоднозначность, возникающая из-за внутренних движений в пределах группы, разрешается введением требования, чтобы группы были шарообразными по форме и не имели удлинения в направлении линии визирования. Начиная с 21-й вкладки, изображения приобретают весьма сложную структуру. Мы видим набор цветных контурных карт, целые области и нити галактик в пространстве, показанные в зеленых, желтых и красных цветах, соответствующих плотности галактик на небе. Из всего этого можно выделить Местное Сверхскопление: два больших слоя, содержащих несколько тысяч галактик. Большой слой расположен к северу от плоскости Млечного Пути, а меньший — к югу.

Проекция, используемая для того, чтобы показать эти рассеянные

трехмерные изображения, базируется на уплощенном Местном Сверхскоплении, открытом и изложенном своим скептически настроенным коллегой Антуанеттой и Жераром де Вокулер из Техасского университета. Теперь эта структура стала краеугольным камнем; ее основная плоскость проходит через скопление Девы и Местную Группу. Геометрия этой внутренней области, составляющей примерно четверть миллиарда световых лет в поперечнике, рассматривается в этой плоскости и посредством разбивки на десятки квадратных участков. На двух последних картах сделана попытка показать (хотя и не полностью) галактики, удаленные от нас на расстояния, в десять раз большие. Эта книга даст богатую пищу воображению читателей, которые хотят представить себе наше место во Вселенной. Каталог, изданный специальным томом, содержит данные о галактиках. Как говорят авторы: «Хватит слов. Карты более красноречивы.»

Третья из этих книг написана двумя астрономами, которые предпочитают вести наблюдения при помощи детекторов на орбите, а не с помощью наземных телескопов. Вместо печатной страницы в качестве формы подачи материала они выбрали 35-миллиметровые слайды. Из научных журналов и статей авторы отобрали и составили современные и надежные карты. В начале на картах в сопоставимом формате показано все небо во всех деталях так, как его видит внимательный наблюдатель, причем Млечный Путь представляется как видимая система отсчета; а затем используются «наши новые органы чувств». Эти непривычные для нас пейзажи изображены в виде цветных карт, охватывающих все небо и показывающих его в тех длинах волн, которые недоступны человеческому глазу: в широком радиодиапазоне, в двух узких радиодиапазонах, два изображения в инфракрасном диапазоне, два в рентгеновском и одно — в гамма-лучах. (Для этого последнего, обладающего наибольшей энергией из всех диапазонов излучения, была составлена целая карта на основе подсчета более чем 200 000 отдельных фотонов.) В заключение приведено изображение наиболее «удаленного от нас во времени» неба: в реликтовом микроволновом излучении Большого взрыва. Один из слайдов показывает, какое излучение из всех волновых диапазонов способно проникать сквозь атмосферу. Эти слайды широко распахивают наши окна во Вселенную (хотя нейтринной астрономии еще только предстоит внести свой вклад в составление звездных карт). Конечно, на самом

деле все обстоит гораздо сложнее и разнообразнее.

*Х. В. Менард.* ОСТРОВА ISLANDS by H.W. Menard. Scientific American Library, distributed by W.H. Freeman and Company (\$ 32.95)

ДЛЯ НАЧАЛА попробуйте-ка отыскать на карте какой-нибудь известный вам остров. Сделать это поможет оригинальное введение в последнюю книгу ныне покойного автора, крупного морского геолога из Океанографического института им. Скриппса, чьи популярные книжки так любимы читателями. Кто еще начал бы свою книгу оригинальным маленьким исследованием, которое убедительно доказывает, что острова Тихого Океана были открыты европейскими исследователями совершенно случайно! Открытие же Полинезии, сделанное частью по воле случая, частью в ходе тщательно подготовленных походов, «является величайшим подвигом в истории мореплавания». «В морских исследованиях, — замечает автор, — чистая случайность тоже немалое достижение». Прекрасные фотографии, помещенные в книгу, помогают нам лучше понять специфику морских условий. На одной из них мы видим огромные, как горы, облака, застывшие в небе над Палау; на другой — грозные скалы Св. Елены, острова, называемого «неприступным» из-за отвесных берегов, подобных крепостным стенам, которые вечно штурмуют прибой. Этот возвышающийся над водой остров был в 1502 г. изданы замечен моряками, в поисках благоприятного пассата отклонившимися от привычного курса далеко на восток. В последней главе рассказывается о том, как на острова проникает цивилизация. Вторая мировая война не смогла оборвать долгую жизнь атоллов, хотя ржавяющие обломки орудий усеяли голубые бухты и белоснежные пляжи. Испытания же ядерного оружия прошли для них «бесследно»: несколько островков обратились в пар, зато их собратья «стоят как ни в чем не бывало».

Небольшие и относительно молодые острова Океании, в отличие от Лонг-Айленда или, скажем, Ирландии, представляют для геологов и биологов большой интерес: их изолированность, с одной стороны, и значительное сходство — с другой, превращают их в своеобразные научные лаборатории. Эволюционные идеи впервые пришли в голову молодому Дарвину при изучении скудной фауны Галапагосских островов, а его известное заключение о природе коралловых атоллов было сделано на основе одних лишь карт, с помощью кото-



# Вниманию читателей!

М. Фримантл  
**ХИМИЯ В ДЕЙСТВИИ**

В 2-х частях  
 Перевод с английского



**Т**алантливо и увлекательно написанное учебное пособие по общей химии. Книга изобилует выразительными иллюстрациями, короткими интересными рассказами. Приведены краткие биографии выдающихся ученых, отрывки из научно-популярных статей, где изложена суть исследований и открытий многих Нобелевских лауреатов по химии. В соответствии со своим названием она показывает, насколько тесно связана химия с самыми разнообразными сторонами жизни современного общества. Широко и ярко представлены экологические аспекты.

Из отзыва профессора А. П. Пурмаля: «Я полностью согласен с приведенной на обложке выдержкой из статьи в журнале "New Scientist" об этой книге: «Вероятно когда-нибудь все учебники по химии будут написаны как эта книга.» Выделяя из многочисленных категорий читателей особо учителей школы, я выражаю уверенность в том, что пользуясь книгой Фримантла они могли бы сделать уроки химии не только высокосодержательными, но и увлекательными».

Из отзыва профессора В. В. Сергиевского: «Книга содержит систематическое изложение всех сведений по общей химии, отвечающих полному курсу средней школы на современном уровне. По охвату тем и пропорции между ними она примерно соответствует нашей школьной программе и привлекает большой оригинальностью, свежестью и современностью описательного материала, призванного повысить интерес к изучению химии.»

1989, 80 л. Цена 6 р. за комплект.

Предварительные заказы направляйте в магазины,  
 распространяющие научно-техническую литературу.  
 Издательство заказы не принимает.





рых он увидел работу «единственного геологического фактора — оседания». Х.В. Менард также «использует» острова, но для того, чтобы раскрыть и аргументировать положения теории тектоники плит, он проводит сравнительный анализ в масштабах земного шара и подробно останавливается на таких региональных особенностях, как цепочки вулканических Гавайских островов и их подводных соседей. Стараясь заинтересовать читателя и вместе с тем сделать изложение понятным, автор создал лучший из написанных до сих пор популярных обзоров названной теории. Значительной долей своего успеха книга обязана прекрасно выполненным картам, графикам и фотографиям. Какие только острова не встретишь здесь: Исландия, Бове, Таити, Канарские, Реюньон и многие другие! И все они представлены на иллюстрациях и описаны в тексте не просто как образчики редкой красоты и экзотики, но и как «участники» единого грандиозного процесса.

На одной из страниц книги сравниваются относительно небольшие «сухопутные» вулканы, такие, как Везувий, Мауна-Лоа и другие гигантские океанические щитовые вулканы. Океанское дно по мере охлаждения медленно опускается, так что все тихоокеанские вулканы со временем погружаются в воду. Расчеты с помощью моделей показывают, что нынешней скорости выделения продуктов извержения было бы вполне достаточно, чтобы сформировать острова Тихоокеанской плиты, распределив их согласно возрасту подстилающей коры.

Жизненный цикл океанического вулкана лучше всего проиллюстрировать на примере Гавайских островов. В первой (юношеской) стадии вулкана происходит излияние жидкой лавы, формирующей гигантские гладкие щиты. Вторая стадия — это стадия зрелости: более вязкая лава образует корку из небольших «наростов» на гладкой поверхности щита. Затем следует длительный период бездействия, сопровождаемый значительным разрушением вулкана; изредка оживление его активности может привести к появлению на давно остывшем щите небольших деталей — побочных конусов, таких, как Даймонд-Хэд.

Одной из особенностей вулканов Гавайской группы является их постепенное старение в северо-западном направлении, что объясняется перемещением литосферной плиты над практически стационарным фонтаном горячей магмы, поднимающейся снизу. Современная калий-аргоновая

датировка позволяет построить простую диаграмму зависимости возраста Гавайских островов от расстояния до Килауэа. Удивительно, что эта зависимость в точности соответствует заключению о возрасте островов, сделанному в 1927 г. геологом Честером К. Вентвортом после изучения эрозии этих островов. Менард повторил выкладки Вентворта, пользуясь современными картами, и получил еще более точное совпадение с результатами радиодатировки. Давайте начнем с острова исходной формы (в виде гладкого щита), сложенного вулканическими породами, и представим, как в результате выветривания он приобретает современный, отраженный на картах объем. Долины и гребни, расчленяющие крутые, зеленые и некогда идеально конические склоны, теперь известны своими водопадами. Остров Гавайи с его гладкими крутыми склонами и действующими и по сей день вулканами появился из воды добрые полмиллиона лет назад; острые хребты далекого Кауаи и его обрывистые берега в 10 раз старше. Этот выразительный рельеф, украшение всех туристических брошюр, не является следствием какого-то особого процесса эрозии, а обязан своим появлением конической форме и постоянным ливням. Вентворту удалось провести и абсолютную датировку. На берегу острова Ланаи стволы деревьев кивале были обнаружены почти на метровой глубине. Так был определен объем породы, вынесенной с вышележащего склона; дата завоза на остров этого растения была известна — 1837 г. Полученный таким образом результат практически совпадает с современными радиометрическими данными. Но в то время никто не обратил внимания на убедительные аргументы Вентворта в пользу движения океанского дна.

Сейчас, обладая такими неопровержимыми доказательствами, как плосчатые геомагнитные аномалии и срединно-океанические хребты, мы без труда можем проследить весь путь Тихоокеанской плиты вплоть до давно покоящегося под водой вулкана Эмперор Гийо недалеко от Алеутских островов. Мы даже отмечаем, что гигантская плита изменяет свой курс, — все это благодаря тому, что горячий источник, берущий свое начало где-то в неподвижной конвективной ячейке, скрытой глубоко под океанским дном, оставил на нем свои отпечатки в виде цепи островов. Автор заканчивает книгу вопросом: не удастся ли в островной фауне и флоре, которые уцелели и эволюционировали на протяжении 100 млн. лет на этих перемещающихся островах, обнаружить

какие-либо следы их собственного перемещения вверх по «ступенькам движущегося вниз эскалатора?»

*Джилберт Б. Форбс.* СОСТАВ ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО ТЕЛА: РОСТ, СТАРЕНИЕ, ПИТАНИЕ И АКТИВНОСТЬ

*Gilbert B. Forbes.* HUMAN BODY COMPOSITION: GROWTH, AGING, NUTRITION, AND ACTIVITY. Springer-Verlag (\$ 66)

**В** ОСНОВЕ этой подробной, насыщенной научной информацией книги — два всем известных положения. Первое — жизнь невозможна без воды (причем вода, содержащаяся в живых организмах, близка по солёности к морской). Второе — вода и масло не смешиваются. Третье положение уже требует некоторого знания биохимии: почти все клетки активно поддерживают на постоянном уровне свои на первый взгляд несущественные химические отличия от окружающей среды. Так, внутриклеточная жидкость относительно богата калием — его концентрация здесь более чем в десять раз выше, чем концентрация ионов натрия, химически близкого калию. Однако по другую сторону клеточной мембраны — в плазме крови, лимфатической жидкости или в морской воде — соотношение этих ионов обратное.

Следовательно, измерив общее содержание калия в живом организме, например в теле человека, можно достаточно точно охарактеризовать «внутриклеточную массу» индивида без учета жира, т. е. определить массу работающей, участвующей в энергетическом обмене части человеческого тела. Кровь, как и любая внеклеточная жидкость, содержит мало калия, а жир, который запасается как источник энергии в виде крошечных глобул внутри жировых клеток, почти лишен воды, а значит, и растворенных в ней элементов. Таким образом, общее количество калия в теле характеризует массу организма без учета экстрагируемого эфиром жира — так называемую «тощую» массу.

Существует ряд методов, позволяющих измерить содержание почти любого химического элемента в организме; все они в той или иной мере нарушают исходное состояние объекта. Наиболее распространенный способ заключается в том, что в организм вводят известное количество радиоактивного изотопа и, выждав время, достаточное для его распределения в тканях тела, берут пробы на этот элемент и оценивают степень разбавления. Среди элементов, входящих в состав живых существ, только один — калий — может быть количественно определен без такого вмешательства



извне. У него известен редкий природный изотоп со слабой, но все же заметной радиоактивностью, представляющей собой  $\gamma$ -излучение. Для измерения количества калия в теле человека, достаточно, чтобы обследуемый, приняв ванну и одевшись в хлопчатобумажную пижаму, посидел некоторое время перед сцинтилляционным детектором — рабочей частью счетчика  $\gamma$ -излучения.

Главным недостатком такого метода является то, что у обследуемых развивается небольшая клаустрофобия, поскольку высокочувствительный прибор должен быть тщательно экранирован от внешних воздействий (практически снять эту проблему в какой-то степени можно, поставив в экспериментальном помещении телевизор). Камера для радиационных измерений, используемая Г. Форбсом в Рочестере, имеет восьмидюймовые стальные стенки, облицованные свинцом, и весит 42 т. Сейчас во всем мире имеется 50—100 таких счетчиков разнообразной конструкции; некоторые из них рассчитаны даже на грудных детей. Они сооружены в основном после 1960 г. для диагностических целей и исследований радиоактивного заражения. Обычно хороший счетчик регистрирует у взрослого человека до 100 импульсов, связанных с излучением калия, в секунду. Во время атмосферных ядерных испытаний, сопровождавшихся широкомасштабным выпадением осадков, содержащих радиоактивный цезий, приходилось при экспериментах учитывать фоновое излучение.

Метод имеет важное достоинство: открывается возможность проводить исследования, охватывающие не только два-три десятка человек, но и крупные выборки из десятков тысяч больных и здоровых людей. Вся разносторонняя организация человеческого тела сводится при этом к простому количественному соотношению: разнице между его общей и «тощей» массами. В среднем организм молодого американца содержит около 13,5 кг жира, что составляет 18% общей массы тела. У молодых женщин на долю жира приходится в среднем 28%. Относительное содержание жира постепенно увеличивается с возрастом. В книге приводятся такие данные о эмбрионах, грудных детях и глубоких стариках, о массивных борцах-сумистах и гибких гимнастах, о двухметровых баскетболистах, о больных с потерей аппетита и с тяжелыми формами ожирения. Сравнение их показывает, что «тошная» масса тела имеет верхний предел: у человека, страдающего ожирением, при общей массе более 290 кг она равна всего

около 80 кг. Кривая зависимости «тошей» массы от роста для великанов-баскетболистов четко выходит на плато в области примерно 100—105 кг у мужчин и 70 кг у женщин. Этот предел может быть превзойден только путем применения стероидных гормонов.

Говорят, что в каждом полном человеке прячется худой. В книге приводятся полученные методом аксиальной компьютерной томографии изображения поперечного сечения средней части предплечья двух людей, имеющих близкую «тошую» массу, но совершенно разную общую. Плотные пятна в центре, соответствующие мышцам и костям, выглядят у них практически одинаково. Однако у худого человека они окружены только кожей, а у полного — мощным слоем тканей с низкой плотностью.

Г. Форбс — знаток этого подхода к изучению человеческого тела: организм упрощенно представляется как система из двух частей — «тошей» и «жирной». Заключительная страница книги является своего рода ее графическим резюме. Центр графика соответствует массе индивида, а по осям абсцисс и ординат откладываются соответственно изменения «тошей» и общей массы. Десять линий лучами расходятся из этого центра; их длина отражает величину изменения. Длинная идущая вниз вертикаль представляет совершенно особый случай: чистую потерю жира без изменения «тошей» массы. Такое решение проблемы принадлежит медведю в состоянии зимней спячки. В течение этих 60 дней он расходует значительную часть своего жира, сохраняя «тошую» массу. Продукты окисления жира медленно выделяются из организма, а вода с растворенными в ней веществ-

вами всасывается обратно через стенки мочевого пузыря. Перелетные птицы, расходующие огромное количество энергии во время своих изнурительных путешествий, подобно физически работающему человеку, теряют как жир, так и «тошую» массу. Здесь действует правило: чем больше в особи жира, тем меньше доля «тошей» массы в общем ее снижении. «Тошная» масса у людей с ожирением выше, чем у нормальных людей такого же пола, возраста и роста.

Линия на графике, направленная вправо вверх, соответствует людям нормальным, но перепадающим. У них накапливается в основном жир, однако «тошная» масса также увеличивается. У женщин во время беременности и у лиц, выздоравливающих после истощения, возрастает преимущественно «тошная» масса, а содержание жира изменяется мало. Андрогены (мужские половые гормоны) несколько уменьшают жировые запасы, однако в еще большей степени — «тошую» массу. При низкокалорийной диете нормальный человек теряет больше «тошей» массы, чем жира, а излишне полный — наоборот, худеет за счет жира. Пребывание в условиях пониженного тяготения на космической орбите — так же, как и постельный режим — ведет к небольшому увеличению запасов жира и несколько снижает «тошую» массу главным образом за счет компактного вещества костей. А плод в утробе матери и младенец в колыбели стремительно растут «со всех сторон».

Книга показывает, что остается еще много неизвестного в области физиологии на системном уровне без привлечения молекулярных механизмов.

## Наука и общество

### Нейродарвинизм

**В** МОЗГУ имеется как бы карта, на которой представляется информация, поступающая от органов чувств. Когда тот или иной рецептор, скажем клетка сетчатки, воспринимает соответствующий стимул, в определенной, строго локализованной группе нервных клеток мозга возникает ответная реакция. Организация этой карты определяется генетической программой, но детали подвержены модификации под влиянием индивидуального опыта в ранний период жизни особи и могут изменяться впоследствии, во взрослом организ-

ме. Какова схема соединения элементов карты, обеспечивающая ей фиксированную структурированность и одновременно гибкость?

Согласно одной из теорий, предложенной Дж. Эделманом из Рокфеллеровского университета, мозг потенциально способен представить огромное множество разнообразных стимулов, но избирает лишь те, которые данный индивид испытывает на практике. Такой отбор, по мнению Эделмана, может происходить в том случае, если основной единицей организации в коре мозга является не отдельный нейрон, а группа нейронов. Клетки, составляющие группу, «до-



говариваются» между собой представлять одну определенную область каких-либо рецепторных клеток — так называемое рецептивное поле. К сожалению, такие группы нейронов (если они существуют) должны быть очень малы по размерам — около 50 мкм в поперечнике — и не поддаются изучению существующими методами. Поэтому Эделман, Л. Финкел и Дж. Пирсон прибегли к моделированию при помощи компьютера. Им удалось показать, каким образом сеть нервных клеток с реалистическими анатомическими и биохимическими свойствами может спонтанно образовать нейронные группы. Эта работа описана в статье, опубликованной в «The Journal of Neuroscience» и в книге Эделмана «Neural Darwinism».

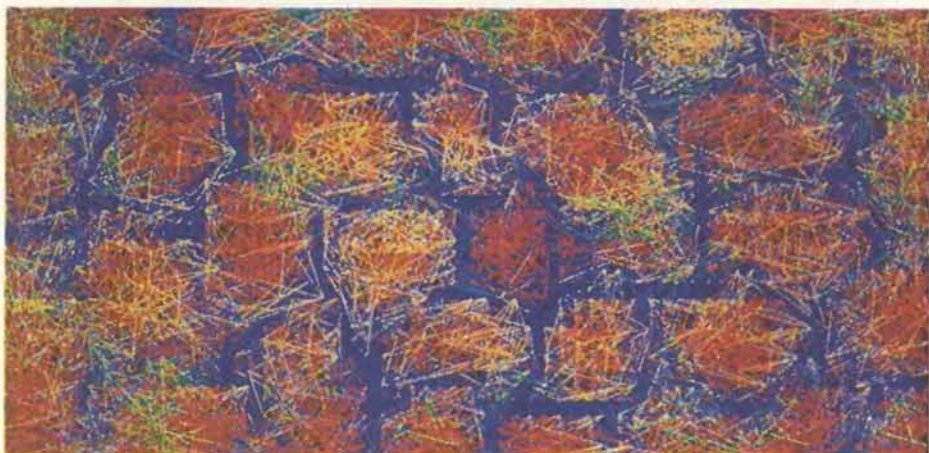
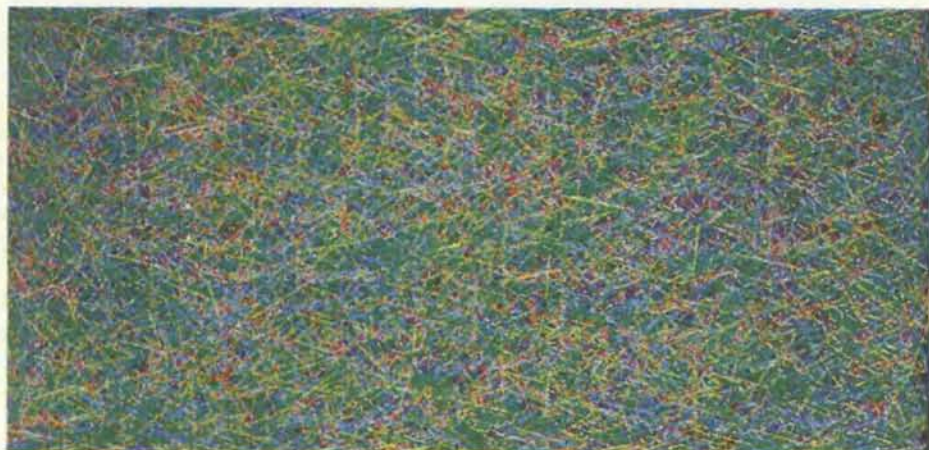
Эделман с коллегами моделировали часть соматосенсорной коры — области мозга, получающей сигналы от чувствительных нервов в коже. При этом анатомические отношения сохранялись; например, набор нейронов, отвечающих на прикосновение к

указательному пальцу, располагался между наборами нейронов, отвечающими на стимуляцию большого и среднего пальцев. В модели воссоздавался пласт нервных клеток коры, связанных с поверхностью кисти. При стимуляции рецептора в коже руки возбуждающие сигналы от него передавались по нервам, веером расходившимся к определенным клеткам коры, соединенным друг с другом множеством связей. В модели было заложено правило синаптической модификации. «Синаптическая сила», т. е. эффективность передачи сигналов между двумя нейронами, зависела от активности сети. Повторение определенной стимуляции усиливало определенные синапсы и укрепляло нейронную активность определенного характера. «Сила» данного синапса увеличивалась, если входной сигнал возникал не только в этом синапсе, но и в большом числе других синапсов той же клетки.

Каждый раз перед началом моделирования «синаптические силы» зада-

вались случайным образом. При стимуляции — прикосновении к руке — рядом расположенные рецепторы посылали сигналы к определенным клеткам коры. Эти клетки, получающие входной сигнал и интенсивно связанные между собой, влияли друг на друга по принципу положительной обратной связи, и это влияние усиливалось, в результате чего образовывались группы очень сильно связанных нейронов. Клетки, которые в это время не стимулировались или не имели достаточного числа связей с нейронами, образующими группу, не присоединялись к ней. Тот же процесс, в результате которого формировались такие группы нейронов, приводил к тому, что в каждой группе развивались прочные связи с определенным рецептивным полем.

Существенно, что моделирование представления ощущений в коре дало результаты, весьма напоминающие то, что наблюдалось в экспериментах на животных, в частности в работе М. Мерцениха из Калифорнийского университета в Сан-Франциско. Так, при моделировании образовывались группы нейронов, избиравшие рецептивное поле только на одной поверхности кисти — либо на ладони, либо на тыльной ее стороне, хотя все нейроны имели равное число нервных связей с обеими сторонами руки. Когда прикосновение к одному из пальцев повторялось, представляющие его группы нейронов увеличивались и по размерам, и по численности. Когда те или иные нервы перерезались, одни группы клеток утрачивали активность, а другие переключались на представление других участков поверхности кисти.



МИНИМУМ      МАКСИМУМ  
СИНАПТИЧЕСКАЯ СИЛА

ПЛОТНАЯ СЕТЬ СВЯЗЕЙ различной силы объединяет 1536 нервных клеток в модели коры мозга (вверху). Стимулы вызывают формирование групп прочно связанных нейронов; они окружены зоной более слабых (синие) связей (внизу).

Уважаемые читатели!  
По всем вопросам доставки  
журнала подписчикам  
просим обращаться по  
адресу: 129853, ГСП, Москва  
И-110, Безбожный переулок,  
д. 19, корп. 6. Начальнику  
Центрального агентства  
«Союзпечать» по  
зарубежным изданиям.  
Телефоны: 280-89-87;  
280-90-88; 280-88-11





линойском университете. Вскоре после этого поступил работать на фирму Westinghouse Electric Corporation, где занимался разработкой электронных ламп СВЧ для РЛС и для средств радиопротиводействия РЛС противника. В 1949 г. был назначен управляющим отделом электроники и ядерной физики. До ухода на пенсию в 1980 г. занимал еще три поста на фирме. Колтман автор многих статей по акустике.

## Издательство МИР предлагает:

### С. Тейлор, С. Мак-Леннан КОНТИНЕНТАЛЬНАЯ КОРА, ЕЕ СОСТАВ И ЭВОЛЮЦИЯ

Перевод с английского

Новая фундаментальная работа известных австралийских петрологов-геохимиков, подытоживающая опыт многолетних исследований по истории формирования и развития континентальной коры, а также ее состава. Приводится обширный справочный материал по распределению редких элементов и их изотопов в древних осадочных, метаморфических и магматических породах. На основании новых данных обсуждаются наиболее вероятные модели эволюции земной коры материков.

Книга имеет важные достоинства: глубокая проработка первичного фактического материала; единая методика обработки результатов и их представление в виде графиков, диаграмм и таблиц, позволяющих читателю самому делать те или иные заключения независимо от вывода авторов; простое и ясное изложение материала, что делает книгу доступной не только специалисту-геохимику, но и геологам других специальностей.

Для геологов широкого профиля, петрологов, геохимиков.  
1988, 27 л. Цена 3 р. 90 к.



### ОЗОННАЯ ДЫРА НАД АНТАРКТИКОЙ

NIMBUS 7 SATELLITE MEASUREMENTS OF THE SPRINGTIME ANTARCTIC OZONE DECREASE. R.S. Stolarski, A.J. Krueger, M.R. Schoeberl, R.D. McPeters, P.A. Newman and J.C. Alpert in *Nature*, Vol. 322, No. 6082, pages 808—811; August 28, 1986.

ANTARCTIC OZONE DEPLETION. In *Geophysical Research Letters*, Vol. 13, No. 12; November Supplement, 1986.

STRATOSPHERIC TRACE GASES IN THE SPRING 1986 ANTARCTIC ATMOSPHERE. C.B. Farmer, G.C. Toon, P.W. Schaper, J.-F. Blavier and L.L. Lowes in *Nature*, Vol. 329, No. 6135, pages 126—130; September 10, 1987.

Кароль И.Л. Озонная «дыра». — «Знание—сила», № 1, 1988.

### КАК КЛЕТКИ- УБИЙЦЫ УБИВАЮТ

MECHANISM OF LYMPHOCYTE-MEDIATED CYTOTOXICITY. Pierre A. Henkart in *Annual Review of Immunology*, Vol. 3, pages 31—58; 1985.

MOLECULAR MECHANISM OF LYMPHOCYTE MEDIATED TUMOR LYSIS. Eckhard R. Podack in *Immunology Today*, Vol. 6, pages 21—27; 1985.

PURIFICATION AND CHARACTERIZATION OF A CYTOLYTIC PORE-FORMING PROTEIN FROM GRANULES OF CLONED LYMPHOCYTES WITH NATURAL KILLER ACTIVITY. John Ding-E Young, Hans Hengartner, Eckhard R. Podack and Zanvil A. Cohn in *Cell*, Vol. 44, No. 6, pages 849—859; March 28, 1986.

A CALCIUM- AND PERFORIN-INDEPENDENT PATHWAY OF KILLING MEDIATED BY MURINE CYTOLYTIC LYMPHOCYTES. John Ding-E Young, William R. Clark, Chau-Ching Liu and Zanvil A. Cohn in *The Journal of Experimental Medicine*, Vol. 166, No. 6, pages 1894—1899; December, 1987.

### РЕАЛЬНОСТЬ КВАНТОВОГО МИРА

QUANTUM THEORY AND MEASUREMENT. Edited by John Archibald Wheeler and Wojciech Hubert Zurek. Princeton University Press, 1983.

FOUNDATIONS OF QUANTUM MECHANICS IN THE LIGHT OF NEW TECHNOLOGY. Edited by S. Kamefuchi, H. Ezawa, Y. Murayama, M. Namiki, S. Nomura, Y. Ohnuki and T. Yajima, Physical Society of Japan, 1984.

THE QUANTUM WORLD. J.C. Polkinghorne. Princeton University Press, 1985.

QUANTUM PHYSICS: ILLUSION OR REALITY? Alastair I. M. Rae. Cambridge University Press, 1986.

Клюшко Д.Н. Простой метод приготовления чистых состояний оптического поля, реализация эксперимента Эйнштейна-Подольского-Розена и демонстрации принципа дополнительности. — Успехи физических наук, 1988, т. 154, вып. 1, с. 133.

### АНТЕННАЯ РЕШЕТКА СО СВЕРХДЛИННОЙ БАЗОЙ

THE VERY LARGE ARRAY: DESIGN AND PERFORMANCE OF A MODERN SYNTHESIS RADIO TELESCOPE. Peter J. Napier, A. Richard Thompson and Ronald D. Ekers in *Proceedings of the IEEE*, Vol. 71, No. 11, pages 1295—1320; November, 1983.

INTERFEROMETRY AND SYNTHESIS IN RADIO ASTRONOMY. A. Richard Thompson, James Moran and G.W. Swenson, Jr. John Wiley & Sons, Inc., 1986.

THE INVISIBLE UNIVERSE REVEALED: THE STORY OF RADIO ASTRONOMY. G.L. Verschuur. Springer-Verlag, 1986. 09. — V.: Yferf, 1976.

Матвеевко Л.И. Видимые сверхсветовые скорости разлета компонент во внегалактических объектах. — Успехи физических наук, 1983, т. 140, вып. 3, с. 464-501.

Матвеевко Л.И. РАДИОАСТРОНОМИЯ. — Сборник статей: Итоги науки и техники, серия «Астрономия». — М.: ВИНТИ, 1977, т. 13.

### ЛИТОРАЛЬНЫЕ РЫБЫ

RECENT STUDIES ON THE BIOLOGY OF INTERTIDAL FISHES. R.N. Gibson in *Oceanography and Marine Biology: An Annual Review*, Vol. 20, pages 363—414; 1982.

INTERTIDAL FISHES: LIFE IN A FLUCTUATING ENVIRONMENT. Robin N. Gibson in *The Behavior of Teleost Fishes*, edited by Tony J. Picher. The Johns Hopkins University Press, 1986.

HERBIVORE RESPONSES TO A SEASONALLY FLUCTUATING FOOD SUPPLY: GROWTH POTENTIAL OF TWO TEMPERATE INTERTIDAL FISHES BASED ON THE PROTEIN AND ENERGY ASSIMILATED FROM THEIR MACROALGAL DIETS. Michael H. Horn, Margaret A. Neighbors and Steven N. Murray in *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, Vol. 103, No. 1, 2, 3, pages 217—234; December 16, 1986.



# Издательство МИР предлагает:

## РАДИАЦИЯ. ДОЗЫ, ЭФФЕКТЫ, РИСК

Перевод с английского

Книга представляет собой обзор данных, собранных Научным Комитетом по изучению эффектов атомной радиации при ООН за 30 лет его деятельности. Рассмотрены вопросы влияния радиации на жизнедеятельность, предельно допустимые дозы, а также наблюдаемые уровни радиоактивности в окружающей среде и продуктах питания (по отдельным регионам).

Книга рассчитана на широкий круг читателей.

1988, 4 л. Цена 30 к.

## М. Харуэлл, Т. Хатчинсон ПОСЛЕДСТВИЯ ЯДЕРНОЙ ВОЙНЫ. ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ЭКОЛОГИЮ И СЕЛЬСКОЕ ХОЗЯЙСТВО

Перевод с английского

Книга американских авторов представляет собой 2-й том сборника «Последствия ядерной войны для окружающей среды», изданного международным Научным комитетом по проблемам окружающей среды (SOPE). Приводятся прогностические данные, характеризующие природные экосистемы, сельское хозяйство и обеспечение человечества продовольствием после ядерной войны.

Для специалистов по экологическому прогнозированию, а также широкого круга биологов, медиков, агрономов.

1988, 34 л. Цена 5 р.



## НЕ ТАКИЕ УЖ РЕДКИЕ ЭТИ «РЕДКИЕ ЗЕМЛИ»

LANTHANIDS AS GEOCHEMICAL PROBE AND PROBLEMS IN LANTHANOID GEOCHEMISTRY — DISTRIBUTION AND BEHAVIOUR OF LANTHANIDS IN NON-MAGMATIC PHASES. Peter Möller in *Systematics and the Property of the Lanthanides*, edited by S. P. Sinha. D. Reidel Publishing Company, 1983.

RARE EARTH ELEMENT GEOCHEMISTRY. Edited by Paul Henderson. Elsevier North-Holland Publishing Co., 1984.

THE CONTINENTAL CRUST: ITS COMPOSITION AND EVOLUTION. Stuart Ross Taylor and Scott M. McLennan. Blackwell Scientific Publications, 1985.

Балашов Ю. А. ГЕОХИМИЯ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ. — М.: Наука, 1976.

Минеев Д. А. ЛАНТАНОИДЫ В РУДАХ. — М.: Наука, 1975.

ОТКРЫТИЕ В ГЕОХИМИИ. В международном ежегоднике «Наука и человечество». — М.: Знание, 1987.

## ИСКУССТВО, ИЛЛЮЗИИ И ЗРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА

FUNCTIONAL ARCHITECTURE OF MACAQUE MONKEY VISUAL CORTEX. D. H. Hubel and T. N. Wiesel in *Proceedings of the Royal Society of London, Series B*, Vol. 198, No. 1130, pages 1—59; July, 1977.

ANATOMY AND PHYSIOLOGY OF A COLOR SYSTEM IN THE PRIMATE VISUAL CORTEX. Margaret S. Livingstone and David H. Hubel in *The Journal of Neuroscience*, Vol. 4, No. 1, pages 309—356; January, 1984.

EYE, BRAIN AND VISION. David H. Hubel, Scientific American Library, 1988.

## ТРАНСФОРМАТОР

A LIFE OF GEORGE WESTINGHOUSE. Henry G. Prout. Charles Scribner's Sons, 1922.

THE RISE OF THE ELECTRICAL INDUSTRY DURING THE NINETEENTH CENTURY. Malcolm MacLaren. Princeton University Press, 1943.

HISTORY OF SOFT MAGNETIC MATERIALS. J. H. Reichtold and G. W. Wiener in *The Metallurgical Society Conferences: Vol. 27*, edited by Cyril Stanley Smith. Gordon & Breach Science Publishers, 1965.

Усагин И. Ф. Сборник. — М.: Издательство МГУ, 1959.

Яблочков П. Н. Труды, документы, материалы. — М.: Издательство АН СССР, 1954.

## НАУКА ВОКРУГ НАС

SUN FIGURE: AN ILLUSORY DIFFUSE CONTOUR RESULTING FROM AN ARRANGEMENT OF DOTS. John M. Kennedy in *Perception*, Vol. 5, pages 479—481; 1976.

THE EFFECTS OF PERCEPTUAL SET ON THE SHAPE AND APPARENT DEPTH OF SUBJECTIVE CONTOURS. Stanley Coren, Clare Porac and Leonard H. Theodor in *Perception & Psychophysics*, Vol. 39, No. 5, pages 327—333; 1986.

## ЗАНИМАТЕЛЬНЫЙ КОМПЬЮТЕР

MOLECULAR ENGINEERING: AN APPROACH TO THE DEVELOPMENT OF GENERAL CAPABILITIES FOR MOLECULAR MANIPULATION. K. Eric Drexler in *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Vol. 78, No. 9, pages 5275—5278; September, 1981.

ENGINES OF CREATION. K. Eric Drexler, Anchor Press, 1986.

# В МИРЕ НАУКИ

Подписано в печать 19.02.88.  
По оригинал-макету. Формат 60 × 90 1/4.

Гарнитуры таймс, гелиос.

Офсетная печать.

Объем 6,00 бум. л.

Усл.-печ. л. 12,00.

Уч.-изд. л. 14,38.

Усл. кр.-отт. 46,36.

Изд. № 25/6061. Заказ 117.

Тираж 24560 экз. Цена 2 р.

Издательство «Мир»

Набрано в Межиздательском фотонаборном центре издательства «Мир»

Типография В/О «Внешторгиздат»

Государственного комитета СССР

по делам издательств,

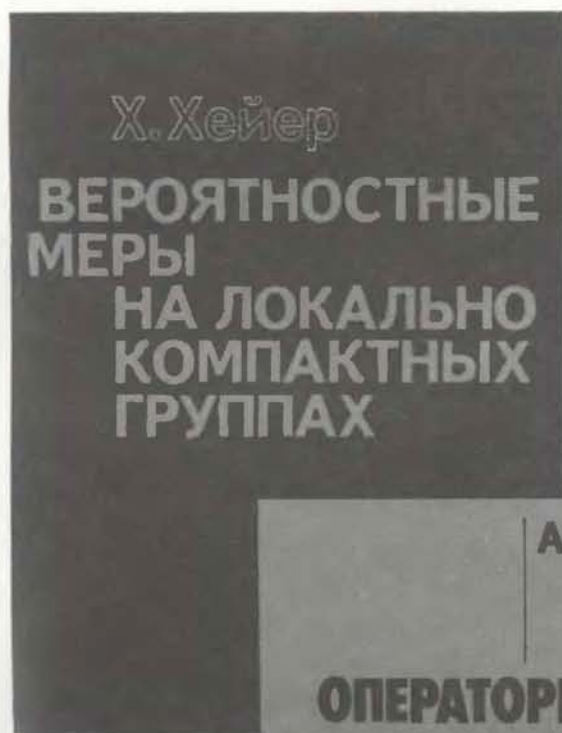
полиграфии и книжной торговли.

127576, Москва, Илимская, 7





# Книги издательства „Мир“



*Хейер Х.*  
**Вероятностные  
меры на локально  
компактных  
группах.**

1981. 4 р. 20 к.



**И МАДСЕН  
Р. МИЛГРЭМ**  
**КЛАССИФИЦИРУЮЩИЕ  
ПРОСТРАНСТВА  
ДЛЯ  
ПЕРЕСТРОЕК  
И  
КОБОРДИЗМОВ  
МНОГООБРАЗИИ**

ИЗДАТЕЛЬСТВО МИР, МОСКВА

**Мадсен И., Милгрэм Р.**  
**Классифицирующие  
пространства  
для перестроек  
и кобордизмов  
многообразий.**  
1984. 2 р. 40 к.



*Пич А.*  
**Операторные  
идеалы.**

1982. 3 р. 80 к.

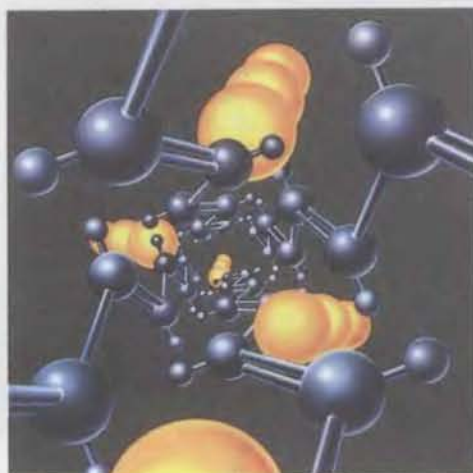
ПРИОБРЕТАЙТЕ КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА «МИР»  
В МАГАЗИНАХ — ОПОРНЫХ ПУНКТАХ ИЗДАТЕЛЬСТВА





# *В следующем номере:*

---



НОВЫЕ ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИЕ ПОЛИМЕРЫ

КАРТИРОВАНИЕ ХРОМОСОМ ПРИ ПОМОЩИ ДНК-МАРКЕРОВ

ПОЧЕМУ СУЩЕСТВУЕТ ВСЕЛЕННАЯ?

$\gamma$ -АМИНОМАСЛЯНАЯ КИСЛОТА —  
ТОРМОЗНЫЙ НЕЙРОМЕДИАТОР

КАК РАЗВИВАЛСЯ КЛИМАТ  
НА ПЛАНЕТАХ ЗЕМНОЙ ГРУППЫ

НЕОБЫКНОВЕННАЯ ПРИСПОСОБЛЯЕМОСТЬ ОПОССУМА

РАМАНУДЖАН И ЧИСЛО  $\pi$

БУБОННАЯ ЧУМА

КАК ОБРАЗУЕТСЯ СЛЕД ДВИЖУЩЕГОСЯ СУДНА

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ  
В МИРЕ БИОМОРФОВ