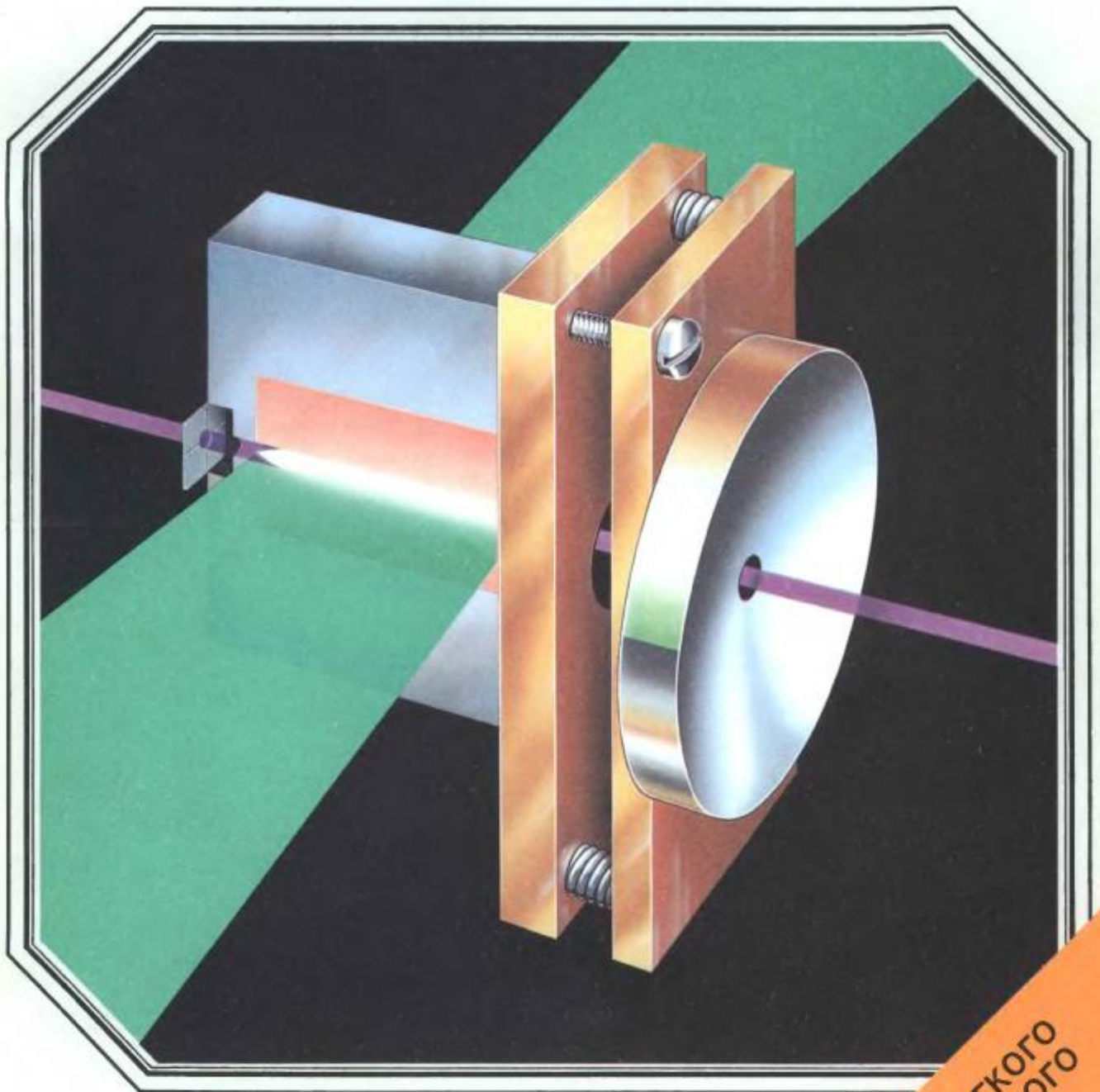


# В МИРЕ НАУКИ

SCIENTIFIC  
AMERICAN

Издание на русском языке



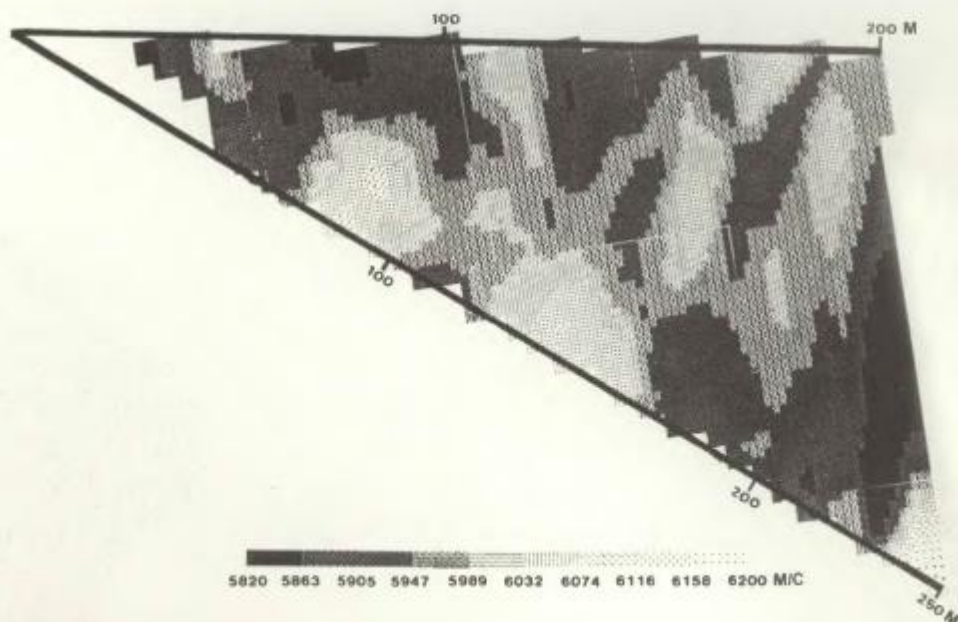
Февраль **2** 1989

ЛАЗЕРЫ МЯГКОГО  
РЕНТГЕНОВСКОГО  
ИЗЛУЧЕНИЯ

# Вниманию читателей!

## СЕЙСМИЧЕСКАЯ ТОМОГРАФИЯ с приложениями в глобальной сейсмологии и разведочной геофизике

Под редакцией Г. Нолета  
Перевод с английского



*Томографическая картина распределения скоростей сейсмических волн в пространстве между скважинами.*

**К**нига представляет собой первую коллективную монографию по сейсмической томографии и написана ведущими американскими и западноевропейскими геофизиками. В ней изложены основы метода сейсмической томографии и его применений в разведочной геофизике и глобальной сейсмологии. Раскрываются возможности межскважинной томографии при выделении рудных тел, зон повышенной трещиноватости и участков горных пород, находящихся в напряженном состоянии. Описана и проиллюстрирована численными примерами методика профильного обращения сейсмических данных. Рассмотрены способы решения томографических задач методом наименьших квадратов, вопросы единственности получаемых решений и способы решения сверхбольших алгебраических систем. Описаны эффективные алгоритмы построения лучей в пространственно неоднородных средах, а также современная методика сбора данных от групп передвижных сейсмологических станций при помощи искусственных спутников Земли.

1990 г., 28 л. Цена 5 р. 90 к.

На книги, выходящие в 1990 г.,  
магазины научно-технической литературы принимают заказы  
с апреля — мая 1989 г.

Издательство заказы не принимает



# 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

№ 2 · ФЕВРАЛЬ 1989

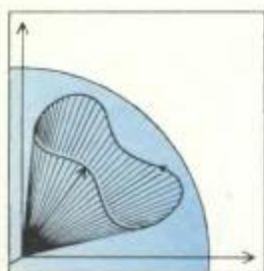
## В номере:

### СТАТЬИ



(Scientific American, December, 1988, Vol. 259, No. 6)

- 6 Проблема бытовых отходов в США**  
*Филип Р. О'Лири, Патрик У. Уоли, Роберт К. Хэм*  
Несовершенство технологии сбора, переработки и захоронения отходов в США создает трудности экономического и экологического характера. Перед местными властями стоит задача обеспечить более эффективное сжигание и захоронение твердых отходов, а также увеличить ассигнования на программы по экономии ресурсов и переработке вторичного сырья



- 14 Геометрическая фаза**  
*Майкл Берри*  
Контур, имеющий форму замкнутой кривой в абстрактном пространстве, может объяснить как необычный сдвиг волновой функции частицы, так и кажущееся вращение плоскости колебаний маятника

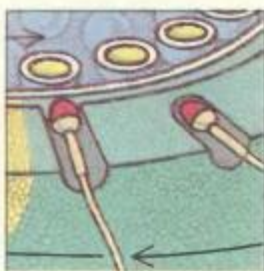


- 22 Пластичность в развитии мозга**  
*Чий Аоки, Филип Сикевич*  
Связи в мозге окончательно устанавливаются уже после рождения и это регулируется ранним опытом. В молекулярных процессах, обеспечивающих способность мозга к изменениям, по-видимому, принимает участие белок, называемый MAP2

### НАУКА В КАРТИНКАХ



- 32 Структурный грунт**  
*Уильям Б. Кранц, Кевин Дж. Глисон, Нелсен Кейн*  
Необычные геометрически правильные структуры на поверхности земли — это побочный продукт обычного физического процесса



**40** Оплодотворение у млекопитающих

*Пол М. Вассарман*

Непосредственно перед слиянием сперматозоида с яйцеклеткой и сразу после него происходит определенная цепь событий. Оказалось, что на многих этапах этого процесса важнейшую роль играет одна и та же молекула



**48** Лазеры мягкого рентгеновского излучения

*Деннис Л. Мэтьюз, Мордекай Д. Розен*

Через четверть века после изобретения оптических лазеров удалось создать экспериментальные рентгеновские лазеры, способные генерировать излучение с длинами волн в 100 раз короче, чем волны видимого света



**56** Сила тяжести и кровообращение у змей

*Харви Б. Лиллиуайт*

Когда змея ползет вверх по дереву или принимает вертикальное положение, ее кровеносной системе приходится функционировать в условиях значительного градиента давления. Влиянием силы тяжести можно объяснить различия в системе кровообращения у древесных и морских змей



**64** Перуанские каналы доинкского периода

*Чарлз Р. Ортлофф*

Строители в государстве Чимор сооружали оросительные каналы протяженностью более 70 км. Используя накопленный опыт, им удавалось противостоять изменчивым геологическим условиям

**РУБРИКИ** 4 Об авторах

5 50 и 100 лет назад

21, 31, 39, 47,

54, 70, 76 Наука и общество

72 Наука вокруг нас

78 Занимательный компьютер

84 Книги

94 Эссе

95 Библиография

# SCIENTIFIC AMERICAN

Jonathan Piel  
EDITOR

Harry Myers  
PRESIDENT AND PUBLISHER

## BOARD OF EDITORS

Armand Schwab, Jr.  
Timothy Appenzeller  
Timothy M. Beardsley  
John M. Benditt, Laurie Burnham  
Elisabeth Corcoran  
Ari W. Epstein, Gregory R. Greenwell  
John Horgan, June Kinoshita;  
Philip Morrison (BOOK EDITOR)  
Tony Rothman, Ricki L. Rusting,  
Russel Ruthen, Karen Wright

Samuel L. Howard  
ART DIRECTOR

Richard Sasso  
DIRECTOR OF PRODUCTION

## SCIENTIFIC AMERICAN, INC.

Claus-Gerhard Firchow  
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER

Georg-Dieter von Holtzbrinck  
CHAIRMAN OF THE BOARD

Gerard Piel  
CHAIRMAN EMERITUS

© 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. Шепелева

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

ЛИТЕРАТУРНЫЕ РЕДАКТОРЫ  
М. В. Суорова,  
Н. А. Вавилова

ХУДОЖЕСТВЕННЫЙ РЕДАКТОР  
С. К. Аносов

ЗАВЕДУЮЩАЯ РЕДАКЦИЕЙ  
Т. Д. Франк-Каменецкая

РУКОВОДИТЕЛЬ ГРУППЫ ФОТОНАБОРА  
В. С. Галкин

КОРРЕКТОР  
Р. Л. Вибке

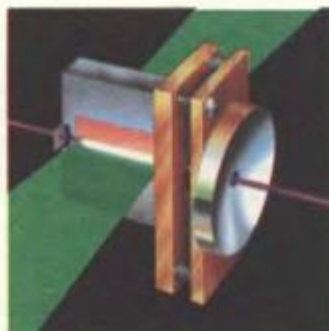
ОФОРМЛЕНИЕ ОБЛОЖКИ РУССКОГО ИЗДАНИЯ  
М. Г. Жуков

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», 1989

## На обложке



## ЛАЗЕРЫ МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

На рисунке изображен первый лазер мягкого рентгеновского излучения, разработанный в Ливерморской национальной лаборатории им. Лоуренса (см. статью Д. Мэтьюза, М. Розена «Лазеры мягкого рентгеновского излучения» на с. 48). Импульс света (*зеленый*) от самого мощного в мире оптического лазера «Нова» облучает с двух сторон мишень из селена, которая испаряется и ионизируется. Электроны, оторвавшиеся от атомов селена при ионизации, бомбардируют возбужденные ионы селена и стимулируют рентгеновское излучение.

## Иллюстрации

ОБЛОЖКА: Hank Iken

СТР.	АВТОР/ИСТОЧНИК	СТР.	АВТОР/ИСТОЧНИК	СТР.	АВТОР/ИСТОЧНИК
7	David Overcash, Bruce Coleman Inc.	35	Roderick J. Ray, Bend Research, Inc. ( <i>вверху</i> ); Tom Moore ( <i>в середине</i> ); Ekkehard Schunke, University of Göttingen ( <i>внизу</i> )		National Laboratory
8	Ian Worpole			50, 51	Hank Iken
9	Warren Faubel, Bruce Coleman Inc.			52	Lawrence Livermore National Laboratory
10, 11	Ian Worpole			53	Hank Iken
12	Philip R. O'Leary	36	James C. Walters, University of Northern Iowa	57	Harvey B. Lillywhite
15	Moche Kugler and Shmuel Shtrikman, Weizmann Institute of Science, Izrael	37	Ekkehard Schunke ( <i>вверху</i> ), Jan Lundqvist, University of Stockholm ( <i>в середине</i> ); Kevin J. Cleason ( <i>внизу</i> )	58	Tom Prentiss
16-22	Gabor Kiss			59	Carl Roessler, Animals Animals ( <i>вверху</i> ); Jeff Foott, Bruce Coleman Inc. ( <i>внизу</i> )
23	Nobutaka Hirokawa, с разрешения Journal of Neuroscience ( <i>вверху</i> ); George V. Kelvin ( <i>внизу</i> )	38	Nelson Caine	60	Harvey B. Lillywhite
24	Carol Donner	41	Paul M. Wassarman	61, 62	Tom Prentiss
25	Torsten N. Wiesel	43	Neil O. Hardy	65	Field Museum of Natural History, Chicago
26	George V. Kelvin	44	Paul M. Wassarman ( <i>слева</i> ); Neil O. Hardy ( <i>в середине и справа</i> )	66-68	George Retseck
27	Chiye Aoki and Philip Siekevitz	45	Neil O. Hardy ( <i>вверху</i> ); David M. Phillips ( <i>внизу</i> )	69	Field Museum of Natural History, Chicago
28	Andrew Matus	46	Paul M. Wassarman	70	George Retseck
29	George V. Kelvin	49	Lawrence Livermore	72	Charlie Company, Inc.
32, 33	Bernard Hallet, University of Washington			73-75	Michael Goodman
34	William B. Krantz ( <i>вверху</i> ); Nelson Caine ( <i>внизу</i> )			79	Kelvin Eber and Jon Saken
				80, 81	Edward Bell

## Об авторах

Philip R. O'Leary, Patrick W. Walsh, Robert K. Ham (ФИЛИП Р. О'ЛИРИ, ПАТРИК У. УОЛШ, РОБЕРТ К. ХЭМ «Проблема бытовых отходов в США») — все из Висконсинского университета в Мадисоне, где занимаются проблемой ликвидации и переработки твердых отходов. О'Лири — доцент, читает курс по организации очистки городов от бытовых отходов. Степени бакалавра и магистра получил в Висконсинском университете, после чего работал там же на факультете природных ресурсов, а затем до 1979 г. возглавлял работы в рамках проектов по охране окружающей среды в фирме McMahon Associates. Уолш — доцент, специалист по сельскохозяйственной технике. Степень бакалавра получил в Университете Пардю, степень магистра — в Массачусетском технологическом институте, а степень доктора права — в Висконсинском университете. С 1977 по 1981 г. работал на факультете права в Висконсинском университете сейчас сотрудничает с органами местного управления, выступая в роли эксперта по проблеме твердых отходов. Хэм — профессор по гражданскому строительству и техническим средствам охраны окружающей среды. Степень бакалавра получил в Университете шт. Миннесота, а степени магистра и доктора философии — в Университете шт. Вашингтон. Уже в течение 20 лет занимается исследованиями различных проблем, связанных с твердыми отходами.

Michael Berry (МАЙКЛ БЕРРИ «Геометрическая фаза») — профессор физики Бристольского университета, изучает геометрические аспекты волновых процессов, в частности те, которые включают связи между квантовой и классической механикой. Ученые степени получил в Университете св. Андрея и в Университете Эксетера.

Chiye Aoki, Philip Siekevitz (ЧИЙ АОКИ, ФИЛИП СИКЕВИЦ «Пластичность в развитии мозга») вели вместе исследования, описанные в публикуемой здесь статье, когда Аоки, будучи студентом, работал в лаборатории Сикевича. Аоки получил степень бакалавра в 1978 г. в Барнард-Колледже, степень доктора философии в области нейрологии — в 1985 г. в Рокфеллеровском университете. В настоящее время преподает в Медицинском колледже Корнелльского университе-

тета. Сикевич стал бакалавром в 1942 г. в Фармацевтическом колледже в Филадельфии, доктором философии в области биохимии — в 1949 г. в Калифорнийском университете в Беркли. Сейчас он профессор клеточной биологии в Рокфеллеровском университете.

William B. Krantz, Kevin J. Gleason, Nelson Caine (УИЛЬЯМ Б. КРАНЦ, КЕВИН ДЖ. ГЛИСОН, НЕЛСЕН КЕЙН «Структурный грунт») подходят к изучению структурного грунта с несколько разных сторон. Все они работают в Колорадском университете в Боулдере. Кранц — профессор химической технологии; он заинтересовался этой проблемой десять лет назад при изучении подземной газификации угля. Глисон в 1984 г. защитил магистерскую диссертацию по структурному грунту под руководством Кранца и Кейна, а теперь работает над докторской диссертацией. Кейн — профессор географии в университете и научный сотрудник в Институте арктических и альпийских исследований; изучение структурного грунта является частью более обширной программы его исследований по перигляциальным образованиям.

Paul M. Wassarman (ПОЛ М. ВАССАРМАН «Оплодотворение у млекопитающих») получил степень доктора философии в области биохимии в 1968 г. в Университете Брандейса, после чего 2 года на средства Фонда Элен Эй Уитни вел исследовательскую работу в Кембриджской лаборатории молекулярной биологии Совета медицинских исследований Великобритании. Затем работал в Университете Пардю, а с 1972 г. — в Медицинской школе Гарвардского университета, где и начал заниматься онтогенезом млекопитающих. С 1985 г. возглавляет кафедру клеточной биологии и биологии развития в Институте молекулярной биологии Роша в Натли (шт. Нью-Джерси).

Dennis L. Matthews, Mordecai D. Rosen (ДЕННИС Л. МЭТЬЮЗ, МОРДЕКАЙ Д. РОЗЕН «Лазеры мягкого рентгеновского излучения») участвовали в создании первых образцов лазеров в мягком рентгеновском диапазоне. Мэтьюз в 1976 г. получил степень доктора философии в области экспериментальной физики в Техаском университете в Остине и с тех пор работает в Ливерморской нацио-

нальной лаборатории им. Лоуренса, где в настоящее время возглавляет разработку лазеров мягкого рентгеновского диапазона и их приложений. Розен получил степень доктора философии в области физики плазмы в Принстонском университете в том же 1976 г. Затем поступил в Ливерморскую лабораторию в качестве конструктора мишеней, необходимых для выполнения работ по программе получения инерциального (лазерного) термоядерного синтеза. В настоящее время занимает должность заместителя руководителя отдела конструирования лазерных мишеней и является совладельцем патента на лазер в мягкой рентгеновской области. За демонстрацию первого такого лазера группе сотрудников Ливерморской лаборатории, создавшей первые образцы лазеров в мягкой рентгеновской области спектра, присуждена награда министерства энергетики США «За вклад в науку».

Harvey B. Lillywhite (ХАРВИ Б. ЛИЛЛИУАЙТ «Сила тяжести и кровообращение у змей») — профессор зоологии во Флоридском университете в Гейнсвилле. Степень бакалавра получил в Калифорнийском университете в Риверсайде, степень доктора философии в области физиологической экологии — в Калифорнийском университете в Лос-Анджелесе. Является членом исполнительного комитета Отделения сравнительной физиологии и биохимии Американского зоологического общества. Давно интересуется проблемой сохранения признаков в процессе эволюции.

Charles R. Ortloff (ЧАРЛЗ Р. ОРТЛОФФ «Перуанские каналы доинкского периода») — инженер по образованию, занимающийся также археологическими проблемами. Ученые степени в области прикладной механики и авиационной техники получил в Нью-Йоркском политехническом институте; защитил докторскую диссертацию по механике жидкостей и газов, прикладной механике и теплофизике в Калифорнийском университете в Лос-Анджелесе. В настоящее время работает старшим инженером в центральной технической лаборатории корпорации FMC. Кроме того, занимается исследованиями в Музее национальной истории в Чикаго, а также в Музее исторических культур в Калифорнийском университете в Лос-Анджелесе.

## SCIENTIFIC AMERICAN

ДЕКАБРЬ 1938 г. «Какое печальное зрелище представляла собой Земля в течение этого теперь стремительно приближающегося к концу года. И в одиночку, и сообща народы мира, несомненно, вели себя нелучшим образом. В Испании до сих пор продолжается кровавая оргия, которую другие страны используют как репетицию военных действий. В Китае растет число «инцидентов», в ходе которых японские солдаты уже уничтожили сотни тысяч и оставили без крова миллионы китайцев. Что касается Европы, то здесь было совершено такое насилие над народами, что новый стиль международных отношений позволительно назвать дипломатией «руки вверх».

«Похоже, что касторовое масло и уголь в ближайшем будущем заменят гусениц шелкопряда: используя эти вещества, химики создают в колбах вязкую жидкость, из которой

можно изготовить волокно, более тонкое и прочное, чем натуральный шелк, и удивительно эластичное. Патентное бюро США зарегистрировало это изобретение, сделанное блистательным химиком из корпорации Du Pont У. Карозерсом. Необыкновенное волокно обещает стать серьезным соперником шелка, особенно в производстве трикотажа».

«Медики готовятся к тому дню, когда станет возможным пересаживать такие органы, как печень, почки, селезенку и даже сердце. В настоящее время орган, пересаженный из одного теплокровного тела в другое, неизменно перерождается. Когда будет найдена причина этого явления и разработаны средства для ее устранения, изношенный орган можно будет заменять на новый, взятый из тела внешне умершего человека».

«Ежедневно регистрируемые колебания земной поверхности в районе Нью-Йорка являются совокупностью колебаний, вызванных движением транспорта, взрывами, редкими землетрясениями и тем, что можно на-

звать «естественным биением сердца Земли». Если бы в Нью-Йорке и вблизи него не было ни людей, ни машин, земная поверхность все равно не оставалась бы в покое. В чем причина этого, до сих пор не известно; полагают, однако, что все дело в океанских волнах, каждую секунду обрушивающихся на побережье».

## SCIENTIFIC AMERICAN

ДЕКАБРЬ 1888 г. «Пишущая машинка стоит в ряду важнейших изобретений века. Почти во всяком учреждении любого крупного города можно обнаружить одну или несколько столь необходимых машин. Сотрудники журнала «Scientific American» используют пишущие машинки в редакторской деятельности, переписке, подготовке каталогов американских патентов. Пишущая машинка дала хорошо оплачиваемую и приятную работу тысячам мужчин и женщин. Она оказалась великолепным «педагогом», поднявшим уровень письма. С ее помощью удастся объединить в одном лице автора, наборщика, печатника и корректора».

«К. Олдрейв недавно совершил путешествие пешком по водной глади реки Хадсон от Олбани до Нью-Йорка. Заклучив пари на 500 долл., он прошел 230 км вниз по течению. Пешеход был обут в «башмаки» из кедрового дерева, подбитые латуной, длиной полтора метра и шириной 30 см и двигался со средней скоростью 1,5 км/ч».

«В сцене дуэли в опере Ш. Гуно «Фауст» можно увидеть поразительный электрический эффект. Брат Маргариты Валентин вызывает Фауста на дуэль, Мефистофель стоит рядом с обнаженной шпагой, готовый прийти на помощь Фаусту. В том месте на сцене, где происходит дуэль, к полу прибиты медные пластины, соединенные с электрической батареей. В башмаки актеров вбиты медные гвозди; провод от гвоздя идет под одеждой актера, выходит из рукава и прикрепляется к рукояти шпаги. Таким образом, стоя на медных пластинах, актеры оказываются «подсоединенными» к электрической батарее и каждый раз, когда их шпаги скрещиваются, от них летит сноп искр, а по залу разносятся треск и шипение, которыми обычно сопровождаются вспышки молнии».



Электрическое «действие» в «Фаусте»

# Проблема бытовых отходов в США

*Несовершенство технологии сбора, переработки и захоронения отходов в США создает трудности экономического и экологического характера. Перед местными властями стоит задача обеспечить эффективное сжигание и захоронение твердых отходов, а также увеличить ассигнования на программы по экономии ресурсов и переработке вторичного сырья*

ФИЛИП Р. О'ЛИРИ, ПАТРИК У. УОЛШ, РОБЕРТ К. ХЭМ

**С**ОЕДИНЕННЫЕ Штаты Америки буквально завалены отходами. По данным промышленных предприятий и местных властей в США ежегодно образуется около 10 млрд. т твердых отходов. В течение 5 лет каждый американец прямо или косвенно выбрасывает в среднем количество мусора, равное по весу статуе Свободы. Только бытовых отходов в стране образуется 140 млн. т в год, а за один день их скапливается столько, что на вывоз требуется примерно 63 тыс. мусоровозов; если все эти машины выстроить в одну колонну, она протянется на 600 км, что равно расстоянию от Сан-Франциско до Лос-Анджелеса. Укоренившиеся у нас привычки обращения с отходами отражаются на благополучии каждого города. Приведем два примера.

Как и многие крупные города, Филадельфия задыхается от отходов: ее свалки заполнены до отказа, вопрос о строительстве мусоросжигательных предприятий продолжает дебатироваться, а программы по экономии материальных ресурсов и переработке отходов претворяются в жизнь слишком медленно. Для ликвидации своих отходов город зафрахтовал грузовое судно "Khian Sea". 5 сентября 1986 г. это судно с 13 тыс. т золы и шлака от сожженного мусора направилось на Багамские острова, чтобы оставить груз на местной свалке. В Филадельфию "Khian Sea" вернулось через 18 месяцев, причем большая часть золы так и осталась на его борту. Багамские острова, Доминиканская Республика, Гондурас, Гаити и Гвинея-Бисау на западном берегу Африки — все отказались принять груз с борта "Khian Sea". Власть Гаити, в частности, заявили, что на побережье острова уже скопилось 3000 т золы. 22 мая 1988 г. судно "Khian Sea" вновь покинуло гавань и к тому времени, когда

писалась эта статья, оно еще не нашло места, где могло бы освободиться от груза.

Другой пример. Власть городка Маркетт (шт. Мичиган), как и многих других провинциальных городов, убедились, что ликвидация бытовых отходов без ущерба для окружающей среды обходится недешево. В 1983 г. местная свалка, куда поступали отходы жизнедеятельности 23 тыс. жителей Маркетта, была закрыта, поскольку не отвечала требованиям принятого в штате нового закона об охране окружающей среды. Отходы стали «временно» перевозить на ближайшую свалку, расположенную в 250 км от города. Ежедневно мусоровозы в течение 6 ч курсировали по городу, вывозя 40 т скапливающихся за день отходов; затраты при этом возросли более чем в три раза. Хотя в окрестностях Маркетта имеется немало свободных территорий с невысокой стоимостью земли, нежелание властей соседних районов создавать новые свалки и стремление властей Маркетта сохранить свои земельные и водные ресурсы тормозит решение назревшей проблемы. Сейчас, когда вы читаете эту статью, в Маркетте, возможно, уже приступили к сооружению полигона для захоронения отходов, удовлетворяющего требованиям закона штата об охране окружающей среды, однако это мероприятие обойдется не дешевле, чем вывоз отходов за 250 км от города.

С древнейших времен до наших дней от твердых отходов избавлялись, сваливая их просто в каком-то месте на поверхности земли. В 1986 г. сотрудники Агентства по охране окружающей среды (АООС) подсчитали, что более трех четвертей всех твердых бытовых отходов вывозится на городские свалки, которых в стране насчитывается 6000. Однако тради-

ционный способ борьбы с мусором начинает вызывать протесты. Тех, кто проживает вблизи свалок, всегда волновало снижение стоимости земельной собственности в этих местах, а также запах и вид мусорных отвалов; теперь их тревожит опасность для здоровья, вызываемая газами, микроорганизмами и токсичными веществами, образующимися в разлагающихся отходах.

Учитывая это, ведомства по охране окружающей среды во многих штатах и АООС уже приняли или разрабатывают законы, предусматривающие существенное ужесточение действующих норм по содержанию и сооружению полигонов для захоронения мусора, с тем чтобы защитить людей и природу от загрязняющих веществ. В результате многие такие полигоны закрыты, другие закроют в скором времени, а сооружение новых будет ограничено. В течение ближайших 5 лет предполагается закрыть 1200 полигонов, хотя в некоторых местах, где положение безвыходное, отдельные полигоны будут расширены. С 1981 по 1986 г. было открыто всего 563 новых мест захоронения и складирования отходов, что на 35% меньше по сравнению с предыдущим пятилетием. Уменьшение суммарной емкости свалок и растущие затраты на контроль за состоянием окружающей среды привели к резкому увеличению стоимости сооружения и содержания полигонов для захоронения отходов. В некоторых районах, в особенности на северо-востоке США, плата за хранение бытовых отходов на свалках увеличилась за один год в два-три раза.

Местные власти могут смягчить остроту проблемы, если прибегнут к созданию комплексной системы управления ликвидацией твердых отходов, которая сводит к минимуму



риск загрязнения окружающей среды, — и все это в пределах имеющихся у местных властей финансовых возможностей. Такая система могла бы включать программы по экономии материальных ресурсов с целью снижения количества отходов, программы переработки вторичного сырья и получения из отходов полезной продукции, различные технологии сжигания мусора, а также новые технологии захоронения бытовых отходов с соблюдением действующих норм по охране природы. До сих пор американцы не проявляли особого интереса к альтернативным мерам по ликвидации отходов и бездумно растрачивали ресурсы. Чтобы избежать «мусорного кризиса» в следующем десятилетии, необходимо изменить отношение к этой проблеме и приступить к ее решению на основе тщательно продуманного планирования.

**Е**СЛИ непосредственной причиной «мусорной проблемы» является возрастание объема твердых бытовых отходов, то проблемы охраны окружающей среды связаны с неоднородностью этих отходов. Хотя в различных районах состав твердых отходов далеко не одинаков из-за различий в природных условиях, социальном составе населения, экономических условиях и других факторах, независимые исследования, субсидированные АООС, позволили установить, что в среднем более 50% (по весу) твердых бытовых отходов составляют бумага, картон и так называемые дворовые отходы, к которым относятся сухие листья, смет и прочее; около 40% — металлы, стекло, пищевые отходы и пластмассы и 10% — дерево, резина, кожа, ткани, а также ряд неорганических материалов. Поскольку в мусоре все эти материалы

смешаны, способ их ликвидации должен учитывать их различные химические и физические свойства. Когда эти материалы рассортированы, переработать их можно более эффективно.

Итак, существуют два основных пути уменьшения отходов — это экономия материальных ресурсов и переработка вторичного сырья. Экономия ресурсов заключается попросту в снижении расхода материалов, необходимых для выполнения той или иной задачи. По этому пути могут следовать и производители, и потребители, и сфера управления. Промышленные предприятия, например, могут перейти к более экономичным способам упаковки готовой продукции и более совершенной технологии выпускаемых изделий, требующей меньшего расхода материалов. Еще одна возможность — это выпускать более долговечную продукцию, не так



МОРСКИЕ ЧАЙКИ, слетающиеся на мусорную свалку в Линдхерсте (шт. Нью-Джерси). На такие свалки вывозится большая часть тех 380 000 т отходов, которые ежедневно

образуются в США. Вследствие неэкономичности, опасности и антисанитарных условий многие свалки, подобные этой, пришлось закрыть.

быстро превращающуюся в отходы. Потребители в свою очередь способны стимулировать эти изменения, выбирая более долговечные товары. Власти же могут усилить «давление» потребителей, запрещая использовать определенные виды упаковок, облагая налогом применение отдельных материалов и разъясняя потребителям, как разумно выбирать товары. Экономия материальных ресурсов не получила широкого распространения, но это направление должно стать важной частью в общей системе мер по контролю за отходами.

Переработка вторичного сырья предполагает сбор, сортировку и утилизацию или компостирование отходов, таких как бумага, стекло, металл, пластмассы и растительные отходы. В США теоретически можно перерабатывать более 75% твердых бытовых отходов, но пока объем перерабатываемых отходов не столь велик из-за отсутствия и подходящих технических возможностей, и содействия со стороны населения, и соответствующих рынков. Однако эффективные методы могут уже сегодня обеспечить переработку 30%, а в дальнейшем 50% отходов.

Официальные лица, ответственные за ликвидацию отходов, разрабо-

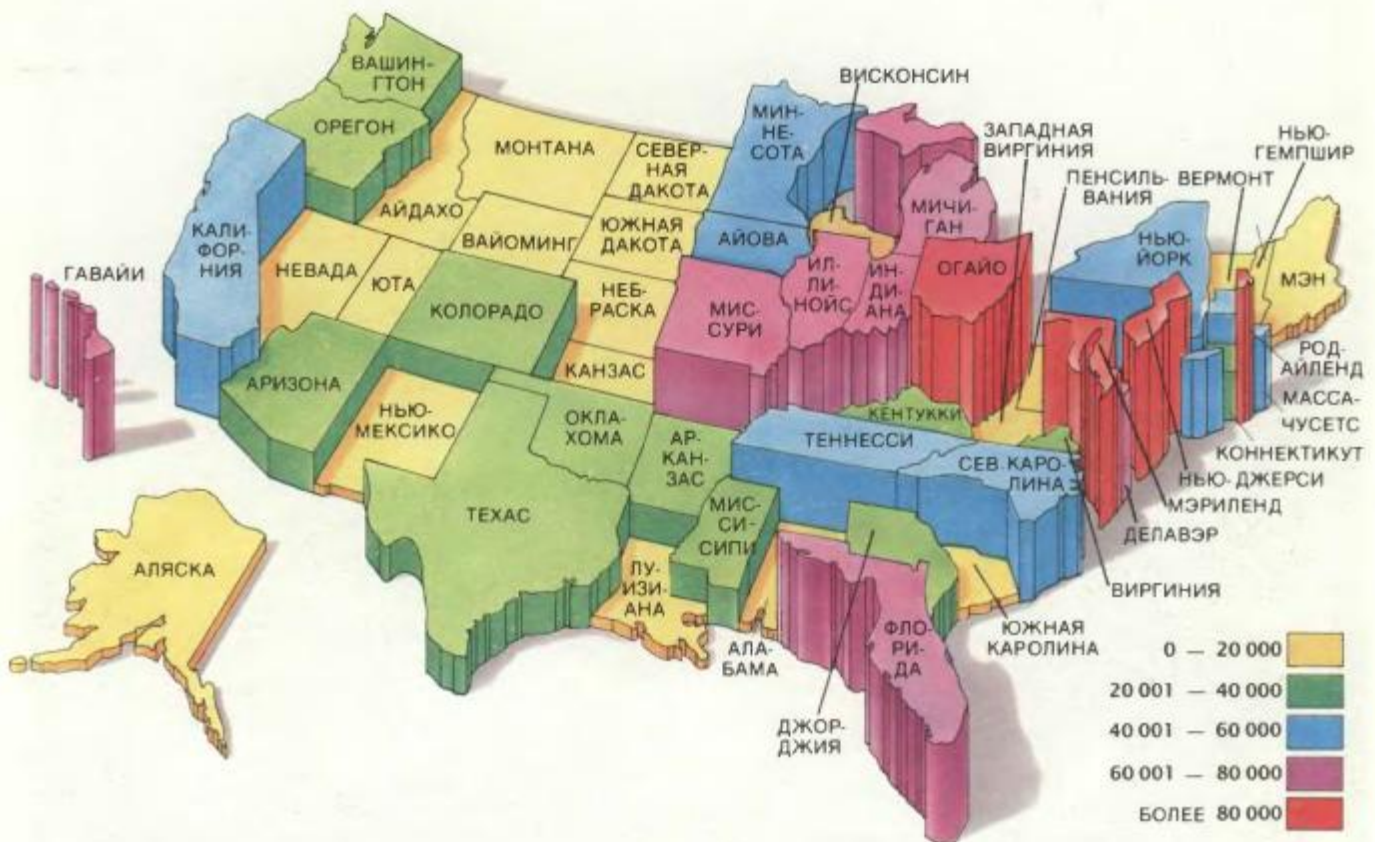
тали ряд обязательных и добровольных программ, которые возлагают ответственность за сортировку и сбор подающихся переработке материалов и на население, и на фирмы, утилизирующие отходы. Методы, с помощью которых внедряются эти программы, могут существенно повлиять на активность населения и величину затрат. Зачастую население не удавалось привлекать к участию в добровольных программах в течение сколько-нибудь длительного времени. В некоторых случаях, однако, общественный интерес стимулировался выплатой вознаграждений за участие в программе или частичным погашением взносов при покупке определенных товаров; еще один способ повлиять на население — это повысить цены на пакеты для мусора, в которые собираются материалы, не поддающиеся переработке. Обязательные программы могут привлечь более широкие слои населения, но могут вызвать и противодействие и привести к появлению незаконных свалок.

Программы по переработке отходов осуществляются наиболее успешно в тех случаях, когда они удобны для населения. В принципе фирмы, занимающиеся переработкой мусора, могут собирать все отходы и извлекать из них

материалы, годные для переработки. Однако, если связанные с этим производственные затраты слишком велики, жители могут сами отбирать материалы для переработки, а фирмы — обеспечивать удобный график сбора таких материалов и поставлять контейнеры для их перевозки.

**Д**ОСТОЙНЫ внимания некоторые новые эффективные программы по переработке отходов. Во многих районах местные власти уже приняли меры к тому, чтобы жители складывали отходы, годные для переработки, в окрашенные особым образом контейнеры и выставляли их рядом с остальным мусором. Сборщики мусора загружают материалы для переработки в специальные бункеры мусоровозов, а остальные отходы — в основной отсек. Цветные контейнеры хорошо заметны и многие жители чувствуют себя обязанными включиться в такой порядок сбора отходов. Даже в тех случаях, когда эти мероприятия носили добровольный характер, в них принимало участие до 80% жителей.

В графстве Мэрин (шт. Калифорния) действует добровольная программа, обеспечивающая переработку 22% общего объема твердых отхо-



ЧИСЛО ЖИТЕЛЕЙ, «обслуживаемых» одной свалкой твердых бытовых отходов, в различных штатах США. Диаграмма построена по данным Агентства по охране окружающей

среды на 1986 г. Количество выбрасываемого населением мусора во многих районах столь велико, что свалки оказываются переполненными.

дов. Каждая участвующая в этой программе семья платит по 1 долл. в месяц на финансирование программы и получает специальный контейнер для отходов, подлежащих переработке. В Уилтоне (шт. Нью-Гемпшир) отбирается и перерабатывается 44% общего объема твердых отходов, что составляет около 270 кг в год на каждого из 8500 жителей этого небольшого городка. Эта обязательная программа в городе была введена в 1979 г.; жителям разрешается складывать пакеты с отходами, предназначенными для переработки, у края дороги рядом с домом или относить их на пункты сбора утиля. В городе собирается все — от стекла, металла и бумаги до старых ислевших вещей; за счет этого город ежегодно экономит около 50 тыс. долл. на расходах по сбору отходов и получает дополнительно 25 тыс. долл. от продажи вторичного сырья.

Одно из быстро развивающихся направлений в переработке отходов — это компостирование. Дворовый мусор и пищевые отходы собираются и складываются в кучи, где они разлагаются на воздухе и значительно уменьшаются в объеме. Компостирование отходов — мероприятие также добровольное. С помощью дробильной машины с металлоулавливателем можно приготовить смесь отходов с высоким содержанием органических веществ и затем разложить ее кучами или загрузить в контейнеры. Эту смесь пропитывают обычной водой или сточными водами, чтобы она приобрела определенную влажность. Компостирование отходов в кучах — наиболее распространенный способ, но можно прибегнуть и к машинной переработке, в результате которой достигается лучшее перемешивание и аэрация компоста. При этом масса смеси уменьшается до одной трети первоначальной массы твердых отходов. Остается пока открытым вопрос, насколько велика — с позиции охраны окружающей среды — концентрация в этой смеси тяжелых металлов и токсичных веществ.

Применение новых технологий и активное участие населения — это еще не самые главные факторы экономической переработки вторичного сырья. Местные власти должны также иметь возможность продавать вторичное сырье тем, кто может изготавливать из него полезные изделия. Газетная бумага превращается в новые газеты и гофрированную бумагу; из переработанного стекла и алюминия делают тару для пищевых продуктов; пластмассовые емкости из-под молока становятся трубами; металлолом идет на производство стали, а компост добавляется в почву. Неко-



**ПЕРЕРАБОТКА** макулатуры может значительно уменьшить количество отходов. На этом перерабатывающем заводе старая бумага измельчается, а затем из полученной массы делают салфетки, бумагу для газет и цветочные горшки.

торые администраторы ошибочно считают, что мероприятия по переработке отходов всегда окупаются и даже приносят доход от продажи вторичного сырья. К сожалению, потребность в этом сырье колеблется от месяца к месяцу и цены на него то падают, то поднимаются. Возможна и такая ситуация, когда перерабатывающее предприятие берет деньги за то, чтобы принять вторичное сырье, но даже в этом случае расходы могут оказаться ниже, чем при захоронении отходов на полигоне. Ожидается, что с развитием индустрии переработки вторичного сырья цены на него стабилизируются. А пока некоторые штаты пытаются расширить рынок вторичного сырья, предлагая государственным организациям покупать продукцию, изготовленную из переработанного вторичного сырья, и снижая налог предприятиям, включающим в свою производственную деятельность переработку отходов. В рамках комплексной системы ликвидации отходов к реализации программы по переработке вторичного сырья можно приступить незамедлительно и этот путь влечет наименьшие затраты.

**ФУНКЦИЯ** мусоросжигательных предприятий всегда сводилась к сжиганию твердых отходов с целью снизить их объем, но со временем она изменилась. Первоначально мусоросжигательные установки выбрасывали все продукты сгорания прямо в атмосферу; после того как в 70-е годы был введен закон о чистоте воздуха, эксплуатация таких установок стала

менее рентабельной, поскольку на них потребовалось монтировать дорогостоящие улавливатели твердых частиц. Некоторые мусоросжигательные предприятия пришлось реконструировать, чтобы удовлетворить новым требованиям к чистоте воздушной среды, но многие пришлось закрыть. Удорожание захоронения отходов на полигонах в последнее время стало более ощутимым, чем расходы по контролю чистоты воздуха и по сооружению более совершенных мусоросжигательных установок, поэтому сжигание мусора вновь стало рентабельным.

Другой фактор, стимулирующий сооружение новых мусоросжигательных установок — это возможность получения энергии при их работе. При сгорании одного грамма переработанных твердых отходов образуется от 10 до 17 тыс. джоулей тепла. (Для сравнения: сжигание 1 г угля дает 23 тыс. джоулей.) Многие технологии сжигания отходов позволяют использовать образуемую при этом тепловую энергию в практических целях. В таких печах сжигаются несортированные и переработанные твердые отходы. Производительность мусоросжигательных установок с модульным принципом работы составляет 140 т в день, но ее можно повысить, если увеличить число модулей, которые будут работать в параллельном режиме. Мусоросжигательные установки большой мощности для массового уничтожения отходов имеют более высокую производительность — до 900 т и больше в день. Печи той и

другой конструкции снабжены камерами, в которых сгорают твердые отходы, и котлами, где выделяющееся тепло превращается в энергию пара. Этот пар можно использовать для обогрева зданий, для производственных процессов или для получения электроэнергии. Из имеющихся в США 90 мусоросжигательных установок 33, работающие по модульному принципу, и 25, предназначенные для массового сжигания мусора, снабжены энергопреобразующими системами.

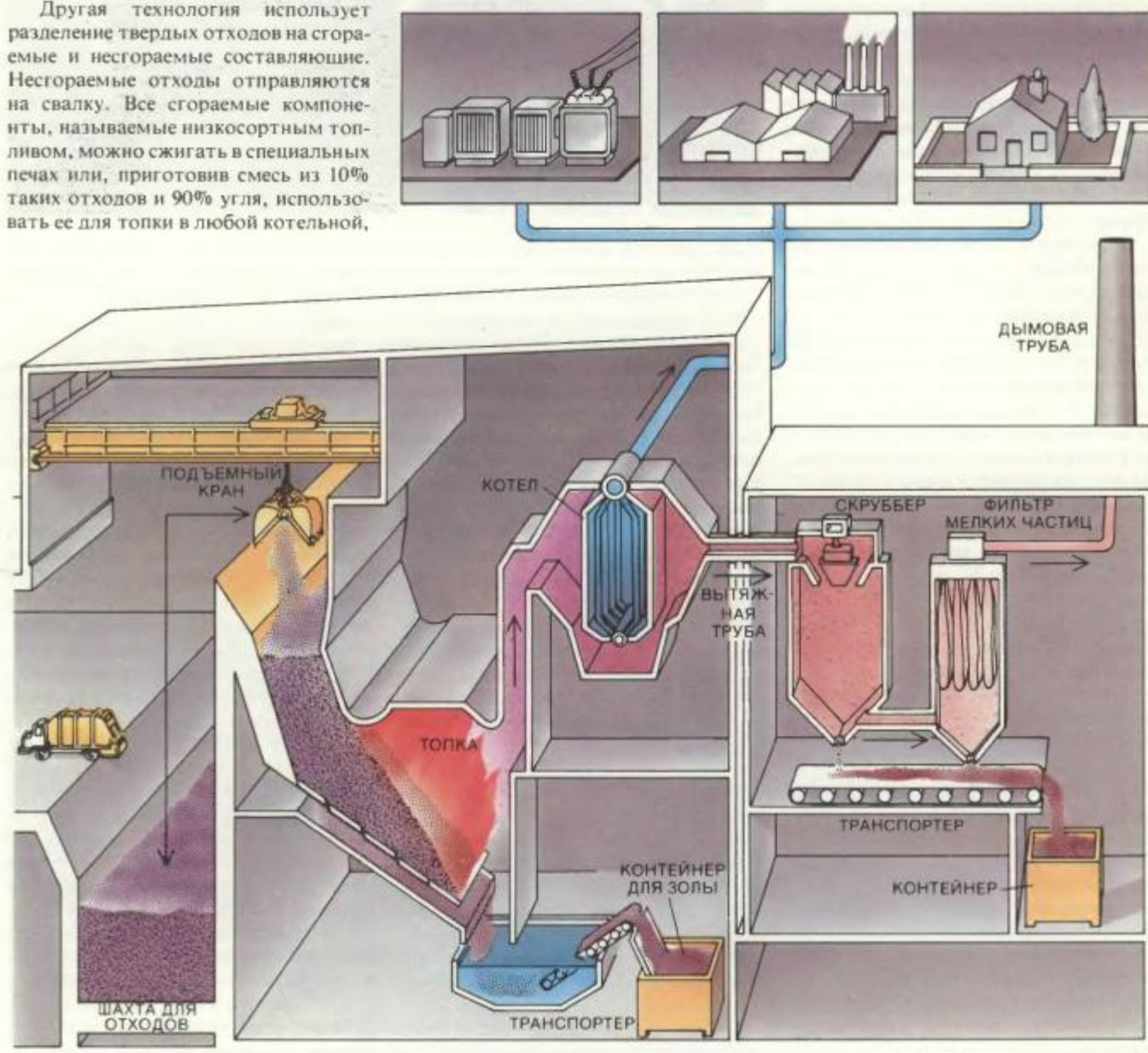
Другая технология использует разделение твердых отходов на сгораемые и несгораемые составляющие. Несгораемые отходы отправляются на свалку. Все сгораемые компоненты, называемые низкосортным топливом, можно сжигать в специальных печах или, приготовив смесь из 10% таких отходов и 90% угля, использовать ее для топки в любой котельной,

снабженной специальным приспособлением. В США имеется девять предприятий, работающих на низкосортном топливе и способных ежегодно сжигать 3,5 млн. т твердых отходов.

Сжигание твердых отходов, однако, — это не обязательная акция. Мусоросжигательные предприятия требуют больших начальных капитальных вложений и на их строительство обычно уходит от трех до пяти лет. Чтобы взяться за это дело, власти должны убедиться, что их район нуж-

дается в энергии, вырабатываемой таким способом, и всесторонне учесть воздействие такого объекта на окружающую среду.

Главной проблемой остается загрязнение воздуха. Выбросы мусоросжигательного предприятия содержат твердые частицы и летучие вещества таких несгоревших веществ, как хлористоводородная (соляная) кислота, оксиды азота, диоксины и фураны. Имеется немало специальных приспособлений, способных



**УСТАНОВКА ДЛЯ СЖИГАНИЯ ОТХОДОВ**, снабженная системой, обеспечивающей уменьшение загрязнения окружающей среды и утилизацию получаемой при сжигании тепловой энергии. Такая установка, изображенная здесь схематически, превращает за день 1000 т твердых отходов в 250 т золы. Мусоровозы сваливают отходы в шахту. С помощью крана отходы загружаются в топку, где они сгорают при высокой температуре. Выделяющееся тепло нагревает котел, пар из которого подается на электрогенератор, в систему отопления зданий или используется для других производственных нужд. Зола и шлак с помощью транспо-

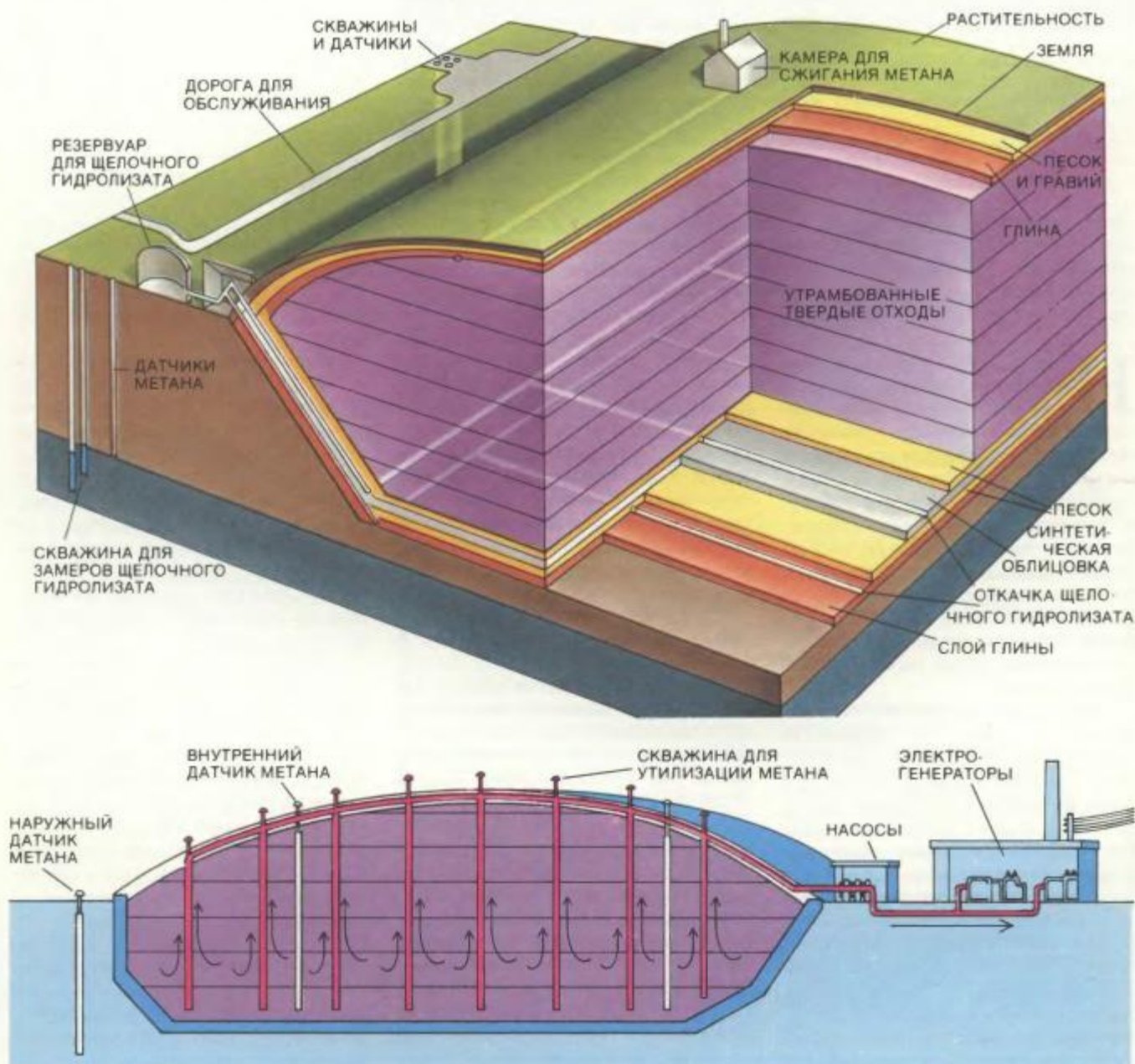
ртера извлекаются из пода печи. Дым, выбрасываемый из трубы, предварительно проходит через два фильтра. Скрубер впрыскивает в дым влажное или сухое соединение кальция, которое вступает в реакцию с соединениями тяжелых металлов и токсичными органическими веществами и, таким образом, снижает их концентрацию в дыме. Фильтр тонкой очистки задерживает мельчайшие частицы золы; последние проходят либо через пористый материал, либо сквозь электрическое поле, в котором заряженные частицы оседают на одном из электродов.

улавливать эти составляющие. Эффективность очистных сооружений и влияние химических веществ на окружающую среду и здоровье людей до сих пор являются предметом широкого обсуждения, и в этой области требуется провести еще немало исследований.

Вызывает озабоченность и проблема загрязнения почвы, поскольку зола, остающаяся после сжигания отходов, как правило, выбрасывается на

свалки. В некоторых штатах существует правило, по которому зола и шлак с мусоросжигательных предприятий должны проверяться на содержание токсичных веществ. Если в золе обнаружено повышенное содержание токсинов, то в соответствии с Актом об экономии и повторном использовании ресурсов с ней следует обращаться как с веществом, опасным для жизни. Некоторые золы после сжигания твердых отходов соде-

ржат в опасных для здоровья человека концентрациях свинец и кадмий, но неоднозначность толкования федеральных законов дает возможность не подвергать твердые бытовые отходы проверке на содержание опасных для здоровья веществ. Если захоронение золы после сжигания отходов производить по правилам, действующим в отношении опасных для здоровья веществ, то технология мусоросжигания в самом деле стала бы



**НОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ** захоронения отходов (*вверху*) может предотвратить загрязнение природной среды. Дождевая вода и вода из других источников вымывает загрязняющие вещества из отходов, образуя раствор, называемый щелочным гидролизатом. Чтобы защитить грунтовые воды от попадания в них гидролизата, карьеры, в которые сваливаются отходы, выстилают глиной или синтетическим материалом с малой гидравлической проводимостью. Облицовка задерживает щелочной гидролизат, который откачивается через трубы. Привозимые каждый день отходы уплотняют и засыпают слоем земли. Когда карьер запол-

няется, его засыпают глиной, песком, гравием, землей, а наверху высаживают растения, забирающие воду и тем самым уменьшающие образование щелочного гидролизата. Другим вредным компонентом, образуемым бактериями в процессе разложения отходов, является газ метан. Для контроля за образованием щелочного гидролизата и метана по периметру карьера бурят скважины, в которых устанавливают датчики. Образующийся метан можно сжигать или «впустую» или использовать выделяемую при его сгорании энергию (*внизу*). Такая система аккумулирует метан и питает турбину, вырабатывающую электроэнергию.



ДОМ в Мадисоне (шт. Висконсин), расположенный через дорогу от закрытого полигона с отходами, 19 ноября 1983 г. пострадал от взрыва. Образовавшийся в результате разложения отходов метан просочился под землей в помещение и взорвался. Двое жильцов погибли. После этого случая на полигоне была установлена система контроля за выделяющимся метаном.

слишком дорогой. Приемлемым решением было бы сооружение полигонов, специально предназначенных для захоронения золы, образующейся после сжигания твердых отходов.

**НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ**, связанные с применением технологии мусоросжигания, выдвигают на первый план задачу экономии ресурсов и переработки вторичного сырья. Но даже после того, как образовавшиеся в минимальном количестве бытовые отходы собраны, переработаны и сожжены, остатки, составляющие по меньшей мере 20% первоначального количества, должны быть захоронены на полигонах. Таким образом, полигоны являются необходимым звеном в общей системе ликвидации отходов.

Технология захоронения твердых отходов на полигонах развивается медленно. До 1970 г. под такие полигоны отводили наиболее удобные с точки зрения этой технологии места на самых дешевых земельных участках. Гидрогеологические условия и возможные последствия для окружающей среды при этом не рассматривались. Такие полигоны, как правило, устраивались на влажных почвах, болотах, в заброшенных шахтах, карьерах, где добывался гравий, местах старых открытых выработок. Никакие меры по охране окружающей среды не принимались, за исключением того, что сваленные отходы присыпали сверху землей, чтобы уменьшить зловоние, размножение грызунов и замусоривание ближайшей территории.

Многие лица, занимавшиеся этими мероприятиями, не понимали, что загрязняющие вещества с полигонов, засыпанных землей или открытых, могут переноситься в другие места. Вначале дождевая вода или жидко-

сти, содержащиеся в самих отходах, из-за биохимических процессов приобретают кислые свойства. Просачиваясь через массу отходов и растворяя присутствующие в них различные элементы и соединения, они образуют концентрированный раствор, называемый щелочным гидролизатом. С течением времени щелочная среда в сваленных отходах становится преобладающей. Если полигон больше не может удерживать влагу, щелочной гидролизат проникает в окружающую среду в непредсказуемых количествах, концентрациях и направлениях. Расположенные на прилегающей территории водоемы, водоносные пласты и вся экосистема часто отравляются щелочным гидролизатом и разрушаются.

Хотя в США имеется немного таких полигонов, которые могут содержать щелочной гидролизат, сейчас инженеры возводят защитные сооружения для предотвращения выхода отравляющих веществ в окружающую среду. После того как выбрано место и вырыт котлован, его стенки и дно выкладывают одним или несколькими слоями материала, задерживающего воду, и таким образом создают своего рода бассейн для щелочного гидролизата. Накапливающийся в нем вредный щелочной раствор откачивается и направляется по трубам к очистным установкам. Для облицовки обычно используют либо синтетический материал, либо глину. В первом случае берут листы полимера толщиной около 1,5 мм, которые задерживают щелочной гидролизат. Глина имеет высокую гидравлическую проводимость (около  $10^{-9}$  м/с) и пропускает от 5 до 20% гидролизата, в зависимости от типа котлована. Синтетическая облицовка обладает низкой гидравлической проводимостью (около  $10^{-15}$  м/с) и пропуска-

ет незначительную часть гидролизата. На практике, однако, случается, что в синтетической облицовке имеются неплотные швы или отверстия, которые значительно ухудшают ее свойства. Большая проводимость глиняной облицовки компенсируется ее способностью уменьшать химическую активность ядовитой жидкости. Содержащиеся в щелочном гидролизате химические вещества, просачиваясь через глину, вступают в химические реакции и за счет этого концентрация вредных веществ уменьшается. Там, где глина встречается в избытке и ее добыча относительно дешева, использование ее для облицовки может оказаться предпочтительнее; синтетическую же облицовку лучше применять в тех районах, где есть опасность, что глиняная облицовка будет пропускать щелочной гидролизат в используемые для питья грунтовые воды. В настоящее время полигоны для захоронения мусора во многих штатах нуждаются в глиняной, синтетической или комбинированной облицовке.

В течение времени, пока полигон остается действующим, грунтовые воды должны постоянно проверяться на присутствие в них щелочного гидролизата. В подавляющем числе случаев образующийся на полигоне гидролизат направляется непосредственно на очистные станции, однако не все они могут справиться с сильно загрязненной сточной водой. Работа многих очистных предприятий основана на деятельности бактерий, разлагающих нечистоты, и в случае поступления жидкости с сильной концентрацией щелочного гидролизата нормальные условия их работы могут быть нарушены. Бывает, что очистная установка не обеспечивает устранение многих токсичных веществ и те в переработанном виде уходят со станции или накапливаются в отстойниках. На полигонах, где образуется щелочной гидролизат, можно применить комбинацию биологических и химических методов для обработки его на месте, до того как он будет откачен и отправлен на очистную станцию.

Уменьшение объема воды, просачивающейся сквозь массу отходов на полигоне, — это еще один способ предотвращения образования щелочного гидролизата. Некоторые сооруженные недавно полигоны имеют многослойное покрытие из грунта или синтетического материала, которое отводит атмосферные осадки от отходов. Растительность наверху полигона способствует уменьшению эрозии и, питаясь влагой, предотвращает просачивание воды через отходы.

Помимо щелочного гидролизата, на полигонах образуется бесцветный и взрывоопасный газ метан, выделяющийся в процессе жизнедеятельности бактерий, разлагающих отходы. Если быть более точным, то бактерии вырабатывают газовую смесь, состоящую на 50—60% из метана и на 40—50% из диоксида углерода (углекислого газа) со следовыми количествами других газов.

Если за образованием метана на полигоне не следить, он может проникнуть в грунт за пределы полигона. Присутствие метана может привести к снижению содержания кислорода в почве и ухудшению ее плодородия. По подземным каналам метан может также проникнуть в расположенные неподалеку от полигона здания; при этом, если его концентрация в воздухе достигает 5—15%, может произойти взрыв или самовозгорание. Из 29 таких случаев в 23 метан в опасных концентрациях накапливался на расстояниях до 350 м от места свалки, расположенной в проницаемой почве. В 20 случаях произошли взрывы и пожары, в результате которых погибло пять человек.

За выделяющимся метаном можно следить, беря пробы почвы вблизи полигона. Если количество газа превышает норму, его можно откачать и использовать в виде топлива. Теплотворная способность метана равна 2300 Дж/г. Для утилизации этой энергии в США разработаны и действуют специальные газоочистительные системы. В свалке или поблизости от нее бурятся скважины под трубы, через которые забирается выделяемый отходами газ. Этот газ можно сжигать непосредственно в топке промышленного котла либо использовать в двигателях внутреннего сгорания или в газовых турбинах электрогенераторов. Такие системы могут иметь мощность несколько мегаватт. Несколько существующих больших систем отфильтровывают следы примесей и диоксид углерода и направляют метан в магистральный газопровод. Некоторые из них «добывают» столько метана, что его хватает на 10 тыс. односемейных домов.

Большинство действующих полигонов пока еще не оборудовано установками для очистки щелочного гидролизата и использования выделяющегося метана. Из 6000 имеющихся в США полигонов для захоронения твердых бытовых отходов 15% имеют облицовку, 5% оборудованы системами сбора гидролизата, на четверти осуществляется контроль за чистотой грунтовых вод. Сейчас рассматривается вопрос об установке оборудования для сбора метана примерно на 100 полигонах с целью более

полного использования ресурсов и производства электроэнергии.

**П**ОКА эта статья готовилась к публикации, АООС предложило «минимальный национальный стандарт», ограничивающий сооружение полигонов на влажных территориях и устанавливающий строительные нормы для полигонов в сейсмически активных зонах. Если предусматриваемые в этом стандарте положения будут приняты, всякую свалку потребуется покрывать каждый день после нового завоза отходов. Придется также устанавливать системы контроля за чистотой грунтовых вод и проверять вновь привозимые отходы на содержание в них ядовитых веществ. В соответствии с этим стандартом облицовка и системы сбора щелочного гидролизата не обязательны, но, вероятно, во многих случаях этого все-таки не избежать, чтобы содержание свалок отвечало требованиям стандартов по обеспечению безопасности здоровья людей. Новые правила также требуют, чтобы владельцы земель, на которых расположены свалки, поддерживали на этих участках чистоту и порядок в течение 30 лет по-

сле того, как свалка будет закрыта, и чтобы контроль за ее состоянием продолжался неограниченно долго.

Ликвидация мусора и содержание свалок должны совершенствоваться с появлением более достоверных методов оценки факторов, влияющих на здоровье людей и окружающую среду. Что касается самих граждан, то от них в первую очередь требуется активное содействие и участие в программах по экономии материальных ресурсов и переработке вторичного сырья. Общественность должна выступать за применение таких методов сбора, переработки и уничтожения отходов, которые не нанесли бы вред окружающей среде, а также за комплексный подход, учитывающий все аспекты проблемы твердых бытовых отходов. Население же страны в целом должно понять, что затраты на ликвидацию отходов будут увеличиваться, а их влияние на окружающую среду возрастать до тех пор, пока каждый американец в отдельности и общество в целом не изменит своего отношения к проблеме или пока жизнь в стране, заваленной отходами, станет невыносимой.

## Вниманию читателей!

### БИОЛОГИЯ РАЗВИТИЯ МЛЕКОПИТАЮЩИХ. МЕТОДЫ

Перевод с английского  
Под ред. М. Манк

В методическом руководстве, созданном авторитетными авторами из Великобритании и США, освещена вся совокупность подходов, применяемых при изучении ранних эмбрионов млекопитающих (в том числе и человека). Книга относится к зарекомендовавшей себя серии «Методы», издаваемой «ИРЛ Пресс».

В руководстве описаны следующие методы: содержание различных линий мышей; манипуляции с эмбрионами и их культивирование; получение химер; анализ мейотических и митоти-

ческих хромосом; анализ активности ферментов; оценка изменения состава белков на первых этапах раннего эмбрионального развития; создание кДНК-библиотек, выделение иРНК и клонирования кДНК; получение трансгенных животных; методы длительного сохранения ооцитов и эмбрионов мыши; получение ооцитов человека и оплодотворение *in vitro*; культивирование ранних эмбрионов человека.

Для эмбриологов, молекулярных биологов, студентов-биологов старших курсов.

1990, 30 л. Цена 4 р. 80 к.

На книги, выходящие в 1990 г.,  
магазины научно-технической литературы принимают заказы  
с апреля — мая 1989 г.  
Издательство заказы не принимает



# Геометрическая фаза

*Контур, имеющий форму замкнутой кривой в абстрактном пространстве, может объяснить как необычный сдвиг волновой функции частицы, так и кажущееся вращение плоскости колебаний маятника*

МАЙКЛ БЕРРИ

**В**ОЗЬМИТЕ карандаш, положите его на северный полюс глобуса и сориентируйте в направлении любого меридиана — вы получите линии долготы, исходящие из полюса. Сдвиньте карандаш вниз вдоль такой линии к экватору и, удерживая его перпендикулярно экватору, сместите к другой линии долготы. Сместив карандаш назад к северному полюсу вдоль нового меридиана, вы обнаружите, что, хотя карандаш вернулся в свою исходную точку и нигде не поворачивался, он больше не ориентирован вдоль первоначальной линии долготы.

Этот простой пример показывает, как «параллельный перенос» вектора (величины, которая характеризуется длиной и направлением) по замкнутому контуру на искривленной поверхности приводит к отсутствию голономности: некоторые переменные, описывающие систему, при таком переносе не возвращаются к своим первоначальным значениям. Неголономность в рассмотренном примере обусловлена тем, что карандаш перемещался по поверхности сферы, все время оставаясь параллельным меридианам на ней. Это чисто геометрическое явление; оно не зависит от энергии или массы карандаша. Кроме того, оно не зависит от его исходной ориентации. Степень нарушения голономности определяется лишь площадью и кривизной поверхности, охватываемой контуром.

В 1983 г. я обнаружил, что сходный геометрический эффект присущ квантовым волнам, описывающими вещество и его взаимодействия на микроскопическом уровне. В данном случае неголономное поведение характерно для волновой функции системы (математического описания физического состояния системы) после того, как система совершила перемещение по замкнутому контуру на абстрактной поверхности в «параметрическом пространстве». Я называю это проявление неголономности геометрической фазой, поскольку его характерной особенностью является сдвиг фазы

волновой функции — величины, определяющей, в каком месте цикла своего периодического изменения находится волновая функция при любых заданных значениях временной и пространственных координат.

Оказывается, геометрическая фаза позволяет дать изящное объяснение различных квантовомеханических явлений в системах, окружение (внешние условия) которых подвергается циклическому изменению: это и нейтроны, проходящие через спиральное магнитное поле, и поляризованный свет в свернутом в спираль оптическом волокне, и заряженные частицы, вращающиеся в изолированном магнитном поле. Возможно, более удивительно то, что понятие «геометрическая фаза» можно обобщить для применений в классической физике. Например, оно дает новый способ описания поведения таких часто встречающихся в учебниках объектов, как маятники.

**Я** ОБНАРУЖИЛ общую применимость понятия «геометрическая фаза» в квантовой механике, изучая стационарные квантовые состояния, в которых могут находиться микроскопические системы при неизменном окружении. Изолированный атом водорода — пример стационарного квантового состояния, поскольку единственный электрон этого атома движется в постоянном электрическом поле его ядра. В таком состоянии (описываемом определенным набором квантовых чисел) измерения характеристик атома дадут один и тот же результат в любой момент времени, за исключением несущественных сдвигов фазы волновой функции данной системы.

Подобные фазовые сдвиги являются результатом существования динамической фазы, свойственной любой волне — квантовой или классической. Динамическую фазу легче всего объяснить, рассматривая хорошо известный пример: распространяющаяся волна получается, если встряхивать один конец натянутой веревки, дру-

гой конец которой закреплен. Серия фотографий такой волны показала бы, что те точки на веревке, которые приходятся на гребни волны на одной какой-нибудь фотографии, не будут на гребнях на другой фотографии (если, разумеется, фотографии не оказались случайно синхронизованы с движением волны). Другими словами, фаза волны изменяется от фотографии к фотографии. Скорость подобного изменения равна мгновенной частоте волны, которая для стационарного квантового состояния пропорциональна его энергии. Поскольку динамическая фаза никак не влияет на энергию или пространственную протяженность волновой функции квантовой системы, она не должна влиять на систему, находящуюся в стационарном состоянии.

Изучение стационарных состояний составляет предмет квантовой статистики. Однако статика представляет лишь одну часть как квантовой, так и классической физики. Другая часть — это динамика, в которой изучаются меняющиеся силы и переходы между различными стационарными состояниями. Область, которая особенно меня заинтересовала, лежит на границе между статикой и динамикой; я изучал влияние на систему очень медленных изменений окружения. Их называют адиабатическими изменениями, и они описаны теоремой, которая первоначально была сформулирована вне рамок формального квантовомеханического описания А. Эйнштейном и П. Эренфестом в 1911 г. и строго доказана с помощью методов квантовой механики М. Борном и В. Фоком в 1927 г.

Согласно этой квантовой теореме, система, находившаяся сначала в стационарном состоянии, характеризуемом определенным набором квантовых чисел, будет оставаться в стационарном состоянии, определяемом тем же набором квантовых чисел, даже при медленном изменении ее окружения. Значение теоремы связано с тем, что начальное и конечное окружения (и, следовательно, действительная



форма соответствующих стационарных состояний) могут довольно сильно различаться — условие адиабатичности требует только, чтобы изменение окружения было медленным, но отнюдь не малым. (Если изменение не медленное, то теорема не применима и система будет совершать переходы в состояния, которым соответствуют другие квантовые числа.)

Возможно, наиболее полезное применение адиабатической теоремы связано с построением приближенных квантовых состояний молекулы, которая представляет собой совокуп-

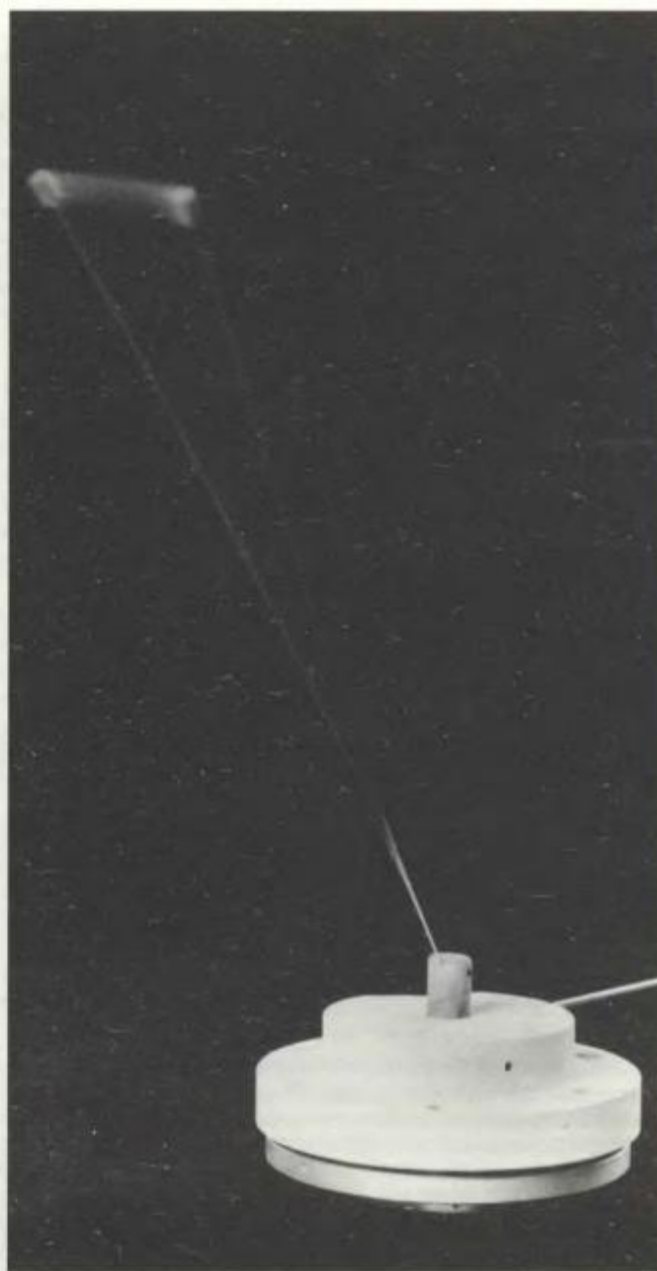
ность непрерывно движущихся электронов и ядер. Точное решение квантовомеханического уравнения, описывающего даже простейшую молекулу (молекулу водорода в ионизированной форме с двумя протонами и одним электроном), не было получено физиками. Однако массы ядер в несколько тысяч раз больше масс электронов, поэтому можно считать, что они движутся гораздо медленнее электронов. Поскольку ядра составляют «окружение» электронов, можно полагать, что электронные состояния изменяются адиабатически по ме-

ре движения ядер. Таким образом, можно предположить, что в процессе непрерывного движения ядра пройдут через последовательность «замороженных» конфигураций, каждая из которых характеризуется квантовыми состояниями, определяемыми соответствующими стационарными состояниями электронов.

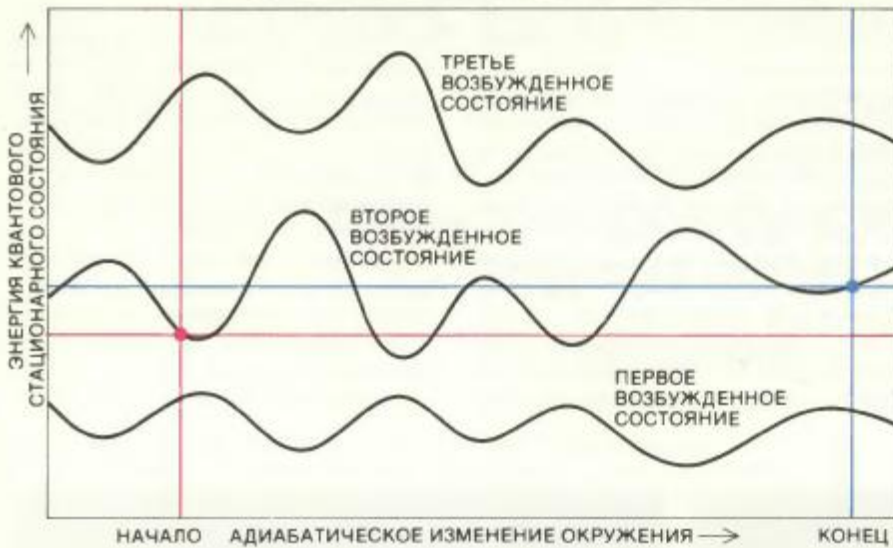
Поскольку квантовая система при медленно изменяющемся окружении остается в стационарном состоянии, может показаться, что адиабатическое изменение на самом деле вовсе не есть изменение. Во всяком случае, та-



**НЕГОЛОНОМНОСТЬ** — явление, лежащее в основе геометрической фазы — демонстрируется с помощью прибора, построенного М. Куглером и Ш. Штрикманом из Вейцмановского научно-исследовательского института. Неголономность — это геометрический эффект, при котором переменные, описывающие систему, не возвращаются к сво-



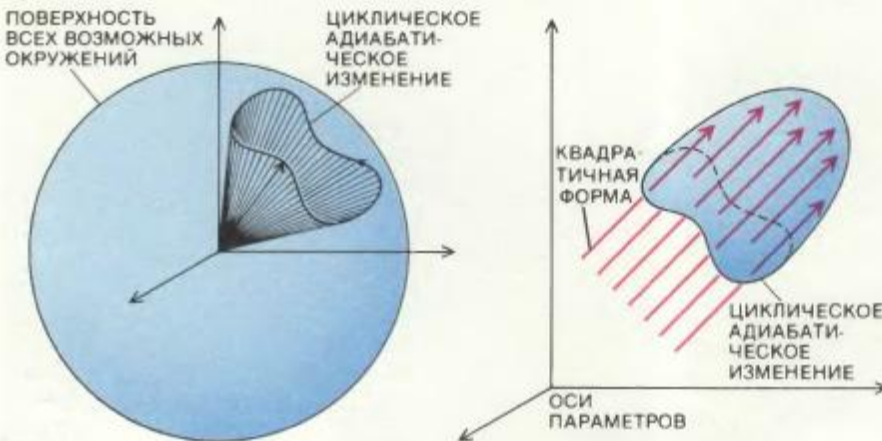
им исходным значениям после того, как система совершила циклическое изменение. В этом приборе в некоторой плоскости возбуждаются колебания проволоки, прикрепленной к основанию, и основание поворачивается (*слева*). После того как система совершила полный оборот, проволока больше не колеблется в той же плоскости (*справа*).



**АДАБАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ** — это изменения в окружении системы, происходящие достаточно медленно для того, чтобы она постоянно оставалась в равновесии со своим окружением. Обычно система находится в так называемом стационарном состоянии (которое обозначается некоторым набором квантовых чисел), когда ее окружение статично. Однако в соответствии с квантовой адиабатической теоремой система в стационарном состоянии может оставаться в этом состоянии с тем же набором квантовых чисел, даже если окружение изменяется — при условии, что изменение адиабатично. Эта теорема применима и в том случае, когда конечные окружение и энергия системы сильно отличаются от ее начальных окружения и энергии.

кая точка зрения была распространена среди физиков в течение многих лет, поэтому необычное и тонкое влияние адиабатического изменения на фазу волновой функции осталось неисследованным.

**РАССМОТРИМ** фазу волновой функции квантовой системы, испытывавшей циклическое адиабатическое изменение — такое, при котором окружение остается в том же состоянии, что и до изменения. Хотя началь-



**ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ФАЗА** квантовой системы, окружение которой подверглось циклическому адиабатическому изменению, может быть получена путем нанесения на график всех ее возможных окружений в системе координат, на осях которой откладываются параметры — физические переменные, описывающие данное окружение. Циклическое адиабатическое изменение представляется тогда контуром (замкнутой кривой) в «параметрическом пространстве». В простейшем случае геометрическая фаза определяется площадью любой поверхности, натянутой на контур. Если поверхность сферическая (слева), то эта площадь эквивалентна телесному углу, порожденному данным контуром. Геометрическую фазу легче обобщить на пространство параметров с более чем тремя измерениями, если выразить ее через математическую величину, называемую квадратичной формой (справа). Можно считать, что квадратичная форма представляет плотность потока некоторой величины в пространстве. Тогда геометрическую фазу можно рассчитать путем интегрирования (или суммирования) квадратичной формы по любой поверхности, «принимавшей» весь поток квадратичной формы через контур.

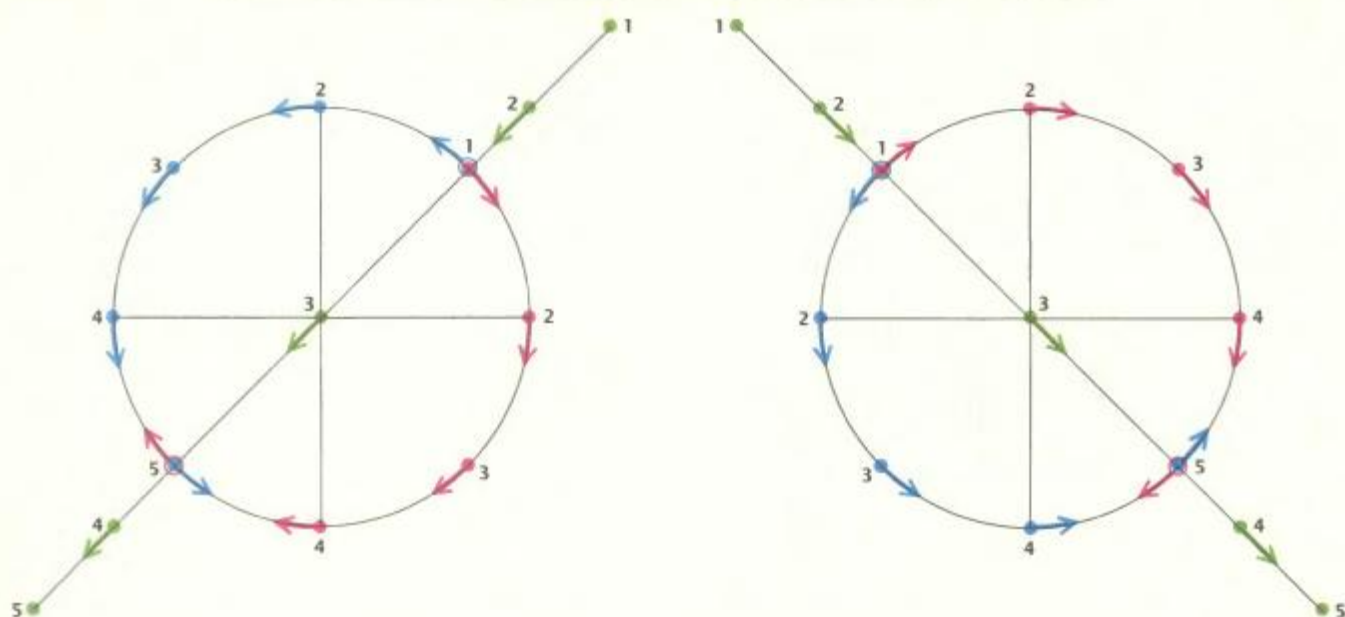
ное и конечное состояния системы совершенно одинаковы, фазы соответствующих им волновых функций будут различаться вследствие зависимости от времени динамической фазы волновой функции. Эта разность фаз возникает, даже если окружение не изменилось; причина в том, что для прохождения цикла системе требуется время.

Многое из этого было хорошо известно. Мне удалось показать, что любое циклическое адиабатическое изменение может вызвать сдвиг фазы волновой функции другим, довольно неожиданным образом, и вывести формулу для нового фазового сдвига на основе квантовой физики. Смысл формулы лучше всего понять, если представить медленные изменения окружения в виде замкнутого контура в абстрактной системе координат, являющихся параметрами — физическими переменными, которые описывают окружение системы. Аналогия с примером карандаша и глобуса очевидна: фазовый сдвиг можно считать результатом неголономности, возникающей всякий раз, когда система проходит по замкнутому контуру на искривленной поверхности в параметрическом пространстве.

Действительно, как показал Б. Симон из Калифорнийского технологического института, математическое описание параллельного переноса вектора по контуру на искривленной поверхности дает (при надлежащем обобщении) тот же результат, что и формула для фазовой компоненты, полученная мною на основе квантовой физики. Как и в примере с карандашом и глобусом, фазовый сдвиг может быть рассчитан по площади и кривизне поверхности, охватываемой этим контуром.

Поскольку такой фазовый сдвиг зависит только от геометрии контура в параметрическом пространстве, я и называю его геометрической фазой. Он не зависит от времени прохождения системой контура (при условии, что процесс протекает достаточно медленно, чтобы выполнялось условие адиабатичности), однако чувствителен к форме контура и начальному квантовому состоянию системы. Таким образом, геометрическая фаза дает наилучший ответ на вопрос: «Какой путь в параметрическом пространстве избирает система?» В этом смысле она представляет собой разновидность квантовой «памяти», поскольку содержит информацию об окружениях системы в прошлом.

**ПОСКОЛЬКУ** мною установлена теоретическая применимость геометрической фазы для любого циклического адиабатического измене-



СУПЕРПОЗИЦИЯ (смещение) двух противоположно направленных круговых движений может приводить к линейному движению. Суммирование координат красных и синих точек, которые движутся по концентрическим окружностям равного радиуса, дает координаты третьей точки (зеленая), которая движется вперед-назад вдоль линии. Направление этой линии зависит от разности фаз двух движущихся по кругу точек. Если обе точки начинают движение в верхнем правом квадранте координатной системы (слева), то угол наклона линии составит 45°. Если

движения начинаются в верхнем левом квадранте (справа), то угол наклона будет равен 135°. С помощью аналогичного принципа объясняется, как два наложенных друг на друга (смешанных) состояния циркулярно-поляризованного света с электрическими векторами, вращающимися в противоположных направлениях, могут давать линейно-поляризованный свет. Как и в случае движущихся точек, разность фаз этих состояний определяет направление поляризации света.

ния, она рассчитывалась для ряда систем, совершавших переход по замкнутым контурам в параметрическом пространстве. Это явление исследовалось также экспериментально по поведению медленно «поворачиваемых» квантовых спинов. Спин частицы можно приближенно представить в виде крошечного волчка, вращающегося вокруг своей оси. Стационарные спиновые состояния частицы характеризуются квантовым числом, дающим значение проекции ее углового момента (векторной величины) на направление, определяемое конкретной симметрией ее окружения. Подобное направление симметрии задается, например, направлением магнитного поля в случае частиц, подверженных действию магнитных сил. Если направление симметрии медленно изменяется, то согласно адиабатической теореме спин частицы будет медленно поворачиваться вслед за направлением симметрии, так что будет сохраняться проекция углового момента частицы на направление симметрии и, следовательно, ее спиновое квантовое число.

Направление симметрии может быть представлено вектором единичной длины с фиксированным началом. Поскольку направление симметрии выбирается произвольно, концы всевозможных векторов, задающих это направление, лежат на сфере еди-

ничного радиуса, центр которой совпадает с общим началом векторов. Поверхность этой единичной сферы представляет собой параметрическое пространство для повернутых спинов, так как направление симметрии определяет окружение, в котором измеряется спин частицы. Любая последовательность изменений направления симметрии представляется поэтому кривой на поверхности сферы. Замкнутость кривой, разумеется, указывает на то, что эти изменения циклические. Применяя квантовую теорию, я показал, что, следуя по такой кривой, частица приобретает геометрическую фазу, которая определяется произведением ее спинового квантового числа и телесного угла, ограниченного этой кривой на поверхности сферы, задающей параметрическое пространство.

Как можно измерить геометрическую фазу повернутых микрочастиц? Несмотря на свою фундаментальную природу, фаза квантовой волны не может быть измерена непосредственно; она становится измеримой только тогда, когда две или более квантовых волн перекрываются, создавая так называемую интерференционную картину. При наложении двух волн амплитуда результирующей волны будет равна сумме амплитуд составляющих волн, если гребень одной волны совпадает с гребнем другой, а впади-

на — с впадиной. Но когда гребни приходится на впадины, амплитуда результирующей волны равна разности амплитуд составляющих волн. Следовательно, распределение амплитуд результирующей волны — интерференционная картина — показывает соотношение фаз составляющих ее волн. [Разность фаз двух волн есть доля цикла, которую должна пройти одна из волн, чтобы ее гребни и впадины совпали с аналогичными точками другой волны. Доли цикла обычно выражаются в угловых единицах (градусах или радианах), причем полный цикл составляет 360°, или 2π радиан.]

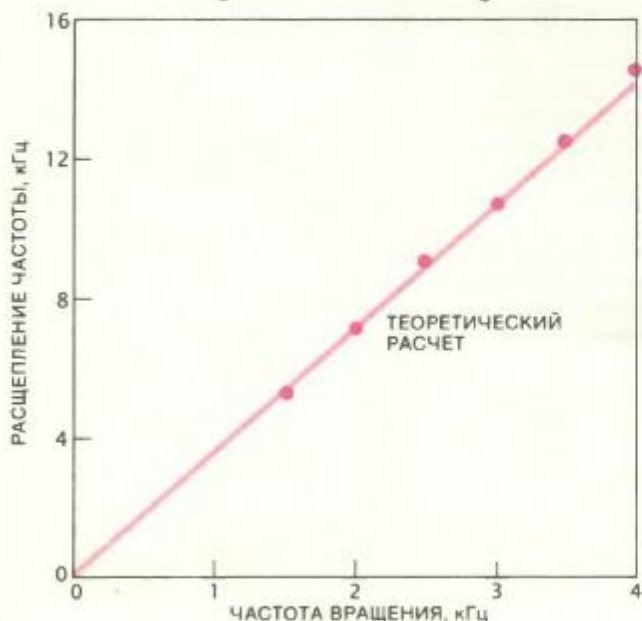
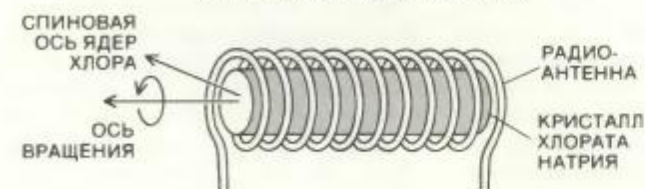
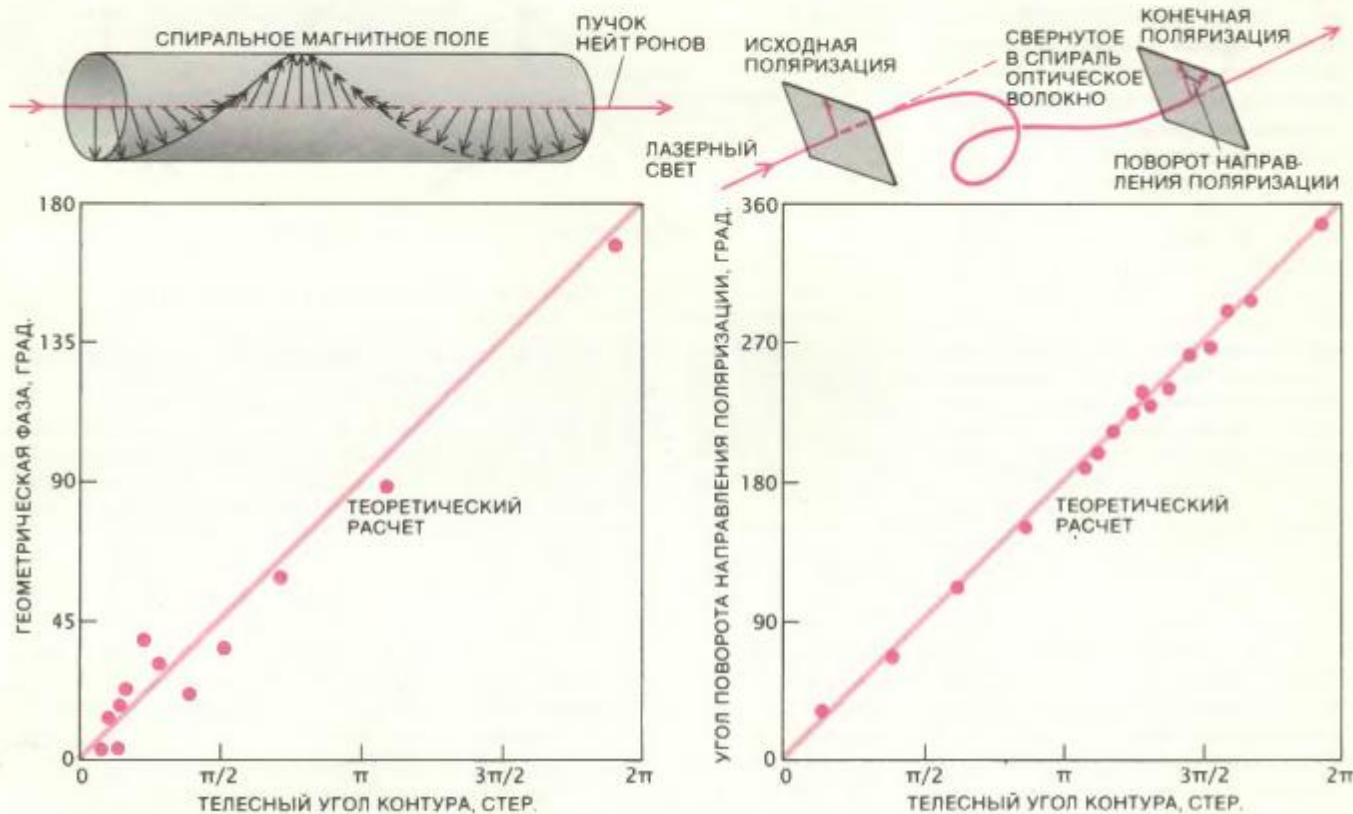
Ясно, что для измерения геометрической фазы повернутой частицы ее волновую функцию надо сначала «суммировать» с волновой функцией второй частицы, чтобы получить измеримую интерференционную картину. В принципе это возможно сделать, расщепив пучок частиц, находящихся в одинаковом спиновом состоянии, повернув спины одного из расщепленных пучков и затем снова сведя пучки. Это иногда удается на практике, однако соответствующие эксперименты трудно выполнимы.

Как правило, исходный пучок состоит из частиц, квантовые состояния которых представляют собой суперпозицию различных спиновых состояний, обозначаемых различными спиновыми квантовыми числами.

При суперпозиции состояний они смешиваются друг с другом таким способом, который зависит от соотношения фаз соответствующих волновых функций. Поскольку геометрическая фаза волновых функций зависит от соответствующих им спиновых квантовых чисел, фазы составляющих смешанное состояние волновых функций по-разному сдвигаются при пово-

роте спина частицы, что приводит к изменению способа смешения отдельных спиновых состояний. Такие изменения формы смешанного состояния, как правило, легче определить, чем изменения в интерференционной картине, полученной при наложении пучков повернутых и исходных спинов частиц, находящихся в одном квантовом состоянии.

**Ф**ОРМУЛА с телесным углом для геометрической фазы повернутых спинов была подтверждена для частиц различных типов. Т. Биттер из Гейдельбергского университета и Д. Дубберс из Института им. М. Лауэ и П. Ланжевена в Гренобле исследовали нейтроны, у которых направление спина и магнитного момента совпадают. Магнитный момент нейт-



ТРИ ЭКСПЕРИМЕНТА, в которых спин частиц периодически «поворачивается», подтверждают реальность существования квантовой геометрической фазы. Т. Биттер из Гейдельбергского университета и Д. Дубберс из Института им. М. Лауэ и П. Ланжевена в Гренобле использовали тот факт, что спиновая ось нейтрона совпадает с направлением его магнитного поля для поворота пучка нейтронов при пропускании его через спиральное магнитное поле, у которого можно менять шаг спирали (вверху слева). Геометрическая фаза измерялась как сдвиг спиновой оси нейтронов. Р. Чао из Калифорнийского университета в Беркли, Ион-ши Ву из Университета шт. Юта и А. Томита из AT&T Bell Laboratories осуществили поворот спинов фотонов в двух смешанных состояниях, направив линейно-поляризованный свет через свернутое в спираль оптическое волокно (вверху справа). Наблюдаемый угол поворота направления поляризации света равен расчетному значению геометрической фазы. В эксперименте, выполненном Р. Тико из Bell Laboratories, спины возбужденных ядер хлора поворачивались путем вращения кристалла хлората натрия относительно оси, отличной от спиновой оси этих ядер (внизу слева). Ядра приобретали геометрическую фазу, которая измерялась как сдвиг частоты излучаемого ими радиосигнала.

рона позволяет поворачивать его спин путем изменения направления магнитного момента, поскольку силовые линии поля задают направление симметрии. В своем эксперименте Биттер и Дубберс циклически меняли направление симметрии, пропуская пучок нейтронов через спиральное магнитное поле, создаваемое специальной катушкой с током. Телесный угол, порожденный замкнутой кривой в соответствующем параметрическом пространстве, можно было легко изменять, меня напряженность другого магнитного поля, направленного вдоль оси пучка.

Хотя фотон также имеет спин, у него нет магнитного момента, с помощью которого можно было бы поворачивать спин. Тем не менее Р. Чао из Калифорнийского университета в Беркли, Ион-ши Ву из Университета шт. Юта и А. Томита из AT&T Bell Laboratories поставили эксперимент, в котором спин фотонов поворачивался. Они исходили из того факта, что спиновый вектор фотона ориентирован либо в направлении его движения, либо в противоположном направлении. Следовательно, спин фотона можно поворачивать, меняя направление его движения. Удерживая пучок лазерного света в свернутом в спираль оптическом волокне, Чао и его коллеги смогли повернуть спин фотона; обеспечив параллельность концов волокна, исследователи сделали этот процесс циклическим.

Они использовали также то обстоятельство, что линейно-поляризованный свет (свет, электрический вектор которого колеблется в одном направлении) состоит из фотонов, у которых два возможных спиновых состояния смешаны. При этом направление поляризации определяется разностью фаз двух спиновых состояний (см. рисунок на с. 17). Как следствие, любое изменение разности фаз, которое выражается в различии двух спиновых состояний, приводит к неодинаковым геометрическим фазам и может непосредственно наблюдаться как поворот направления поляризации света. [Такой поворот впервые наблюдал в 1984 г. Н. Росс из Центральной лаборатории Управления по производству электроэнергии в Летерхеде (Англия), однако он не связал его с геометрической фазой.]

Поворот, который наблюдали Чао и его коллеги, также хорошо может быть объяснен с помощью классических понятий. Его можно трактовать как результат параллельного переноса светового вектора электрического поля по свернутому в спираль волокну. Тогда для света в закрученном волокне квантовая неголономность фазы эквивалентна классической неголо-

номности параллельного переноса вектора поляризации; Чао и Ву выражают это так: «Мы склонны считать рассматриваемые эффекты топологическими свойствами ... которые берут свое начало на квантовом уровне, однако проявляются... на классическом уровне». Как указали некоторые другие исследователи, связь с телесным углом в данном случае может быть установлена без обращения к квантовой механике — на основе уравнений Максвелла классической теории электромагнетизма.

Один из последних экспериментов с поворотом спина провел Р. Тико из Bell Laboratories. Он возбуждал ядра хлора в кристалле хлората натрия в смешанные состояния с помощью радиоволнового импульса. Так как спины этих ядер направлены вдоль оси симметрии кристалла, ему удалось повернуть спины возбужденных ядер путем вращения кристалла вокруг оси, отличной от оси симметрии. При этом разность фаз между спиновыми состояниями ядер — компонентами смешанного состояния — возрастала согласно формуле с телесным углом. В результате повторных вращений разность фаз должна была непрерывно возрастать, что Тико и обнаружил как расщепление частоты радиосигнала, излучаемого системой ядер после воздействия импульса.

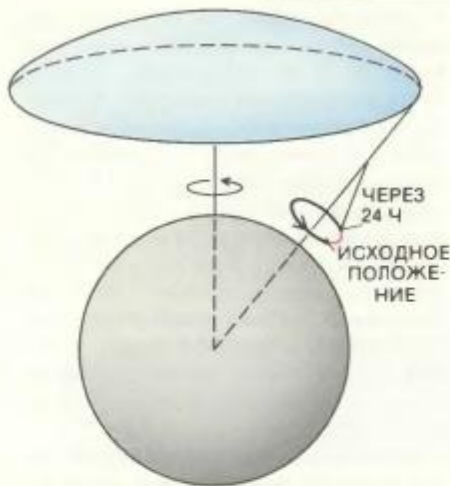
**В** О ВСЕХ экспериментах с поворотом спинов, о которых упоминалось выше, предполагалось, что параметры окружения, влияющие на систему, могут быть определены (по крайней мере в принципе) с неограниченно высокой точностью и что окружение не чувствительно к любым фазовым сдвигам, вызываемым им в системе. В действительности ни одно из этих предположений не оправдано. Первое несправедливо потому, что параметры, будучи физическими переменными, подчиняются законам квантовой механики, устанавливающим принципиальную невозможность их точного измерения. Второе предположение также несправедливо, поскольку в физике не существует одностороннего действия. По этим причинам то, что я до сих пор называл «квантовой системой», должно, строго говоря, включать и окружение: лабораторную установку, в которой выполняются эксперименты с поворотом спинов. Однако, поскольку полное, квантовомеханическое описание окружения чрезвычайно сложно, им обычно пренебрегают.

Тем не менее можно предсказать необычное влияние геометрической фазы квантовой системы на волновую функцию ее окружения. Оказывается, волновая функция любого со-

стояния «полной» системы (произведение волновых функций квантовой системы и ее окружения) должна быть однозначной функцией: должна иметь только одно-единственное значение (включая фазу) для любого заданного набора параметров. Математически это возможно в том случае, если во время прохождения квантовой системой любого контура в параметрическом пространстве волновая функция окружения приобретает компенсирующий фазовый сдвиг, который по величине равен фазовому сдвигу системы и противоположен ему по знаку.

Можно было бы подумать, что такой фазовый сдвиг для окружения является математическим артефактом, обусловленным разделением квантовой системы и ее окружения, но на самом деле он может приводить к наблюдаемым физическим эффектам. Подобные эффекты существуют, например, в молекулах, в которых электроны образуют квантовую систему, а ядра — окружение. В 1979 г. А. Мид и Т. Трулар из Миннесотского университета (работа которых послужила основой для многих последующих исследований по геометрической фазе) указали на то, что изменения волновой функции электронов (система) должны влиять на волновую функцию, описывающую движение ядер (окружение), изменяя энергию молекулярных колебаний и вращений. Подобные изменения отражаются на энергии фотонов, излучаемых или поглощаемых молекулой, и могут быть обнаружены с помощью спектроскопических методов.

Эксперимент, проведенный Г. Делакрета и Л. Вёсте из Швейцарского федерального технологического института, Э. Грантом и Й. Цванцигером из Корнеллского университета, а также Р. Уэттеном из Калифорнийского университета в Лос-Анджелесе, позволил обнаружить такие спектроскопические изменения в молекуле, состоящей из трех атомов натрия. Ядра натрия в этой молекуле совершают циклическое движение (называемое псевдовращением), которое приводит к тому, что самое низкое электронное энергетическое состояние приобретает удивительно большую геометрическую фазу  $180^\circ$ : в соответствующей волновой функции гребни становятся впадинами и наоборот. Эти ученые установили, что геометрическая фаза электронной волновой функции в свою очередь влияет на ядерную волновую функцию, изменяя наблюдаемые энергетические уровни, связанные с псевдовращением ядер. Эти изменения согласуются с расширенным квантовомеханическим анализом геометрической фазы.



**УГЛОВОЙ СДВИГ** положения колеблющегося относительно Земли маятника — пример геометрической фазы в классической физике, согласно описанию Дж. Ханнея из Бристольского университета. Можно предположить, что шарик маятника, движущийся по кругу с частотой 1 об/с, через 24 ч возвращается в то же место в пространстве, из которого он начал движение. Но в действительности конечное положение шарика будет смещено относительно его исходного положения на угол (показан красным цветом), называемый углом Ханнея и равный телесному углу, описываемому осью вращения маятника (синий цвет). Такой маятник был применен в 1851 г. французским физиком Фуко, убедительно продемонстрировавшим с его помощью вращение Земли. Однако маятник Фуко раскачивался вперед-назад, а не двигался по кругу, и геометрическая фаза проявлялась как вращение его плоскости колебаний.

**ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ** фаза системы, подвергающейся циклическому адиабатическому изменению, может быть представлена в наиболее изящном виде, если ее выразить через математическую величину, называемую квадратичной формой, которая определяет поток величины через единичную площадь. Тогда геометрическая фаза рассчитывается путем интегрирования (или суммирования) квадратичной формы по любой поверхности, натянутой на контур, который описывает система в параметрическом пространстве, т. е. по любой поверхности, «принимающей» весь поток квадратичной формы через контур. Такой мощный математический прием вызывает в воображении «образ» квадратичной формы, скрывающейся в параметрическом пространстве как призрак и вызываемой к действию квантовой системой, завершающей прохождение контура в данном пространстве. Эффект, предсказанный в 1959 г. Я. Аароновым из Университета шт. Южная Каролина и

Д. Бомом из Лондонского университета (оба затем работали в Бристольском университете), может быть точно объяснен путем выражения геометрической фазы через квадратичную форму.

Эффект Ааронова — Бомы — это сдвиг фазы волновой функции заряженной частицы, появляющийся при движении частицы вокруг силовых линий изолированного магнитного поля в свободном от поля пространстве. Этот эффект был подтвержден экспериментально в 1960 г. Р. Чемберсом из Бристольского университета. В данном случае параметрическое пространство, через которое движется частица, определяется не абстрактными переменными, такими, как направления симметрии; это обычное пространство, через которое частица прокладывает свой путь (контур), описываемый известными координатами (соответствующими длине, ширине и высоте). Аналогично фазовая квадратичная форма не является просто удобным математическим построением; она представляет собой произведение напряженности магнитного поля и заряда частицы, деленное на постоянную Планка ( $6,626 \cdot 10^{-34}$  Дж·с). Выраженная таким образом геометрическая фаза частицы, проходящей вокруг силовых линий магнитного поля, зависит от магнитного потока — величины, вполне укладываемой в понятия классической физики.

**ЧТО, ОДНАКО,** не укладывается в представления классической физики — это тот факт, что магнитное поле влияет на фазу заряженной частицы, несмотря на то что частица никогда не пересекает силовые линии магнитного поля. Согласно классической физике, на заряженные частицы действуют силы, только когда они находятся в контакте с электрическими или магнитными полями. Однако в эксперименте Ааронова — Бомы на заряженную частицу действует магнитное поле, хотя она с ним не контактирует! Физики говорят, что поле, по-видимому, воздействует на заряженную частицу нелокально. В отличие от вращения плоскости поляризации в эксперименте Чао и его коллег эффект Ааронова — Бомы не может быть объяснен с помощью понятий классической физики.

Квадратичная форма геометрической фазы служит для описания квантовомеханических явлений, которые кажутся странными с точки зрения нашего повседневного опыта, но ее также можно обобщить для описания хорошо известной механики пружин и маятников. Дж. Ханней из Бристольского университета обнаружил классический аналог квантовомеханической

геометрической фазы. Он начал с рассмотрения макроскопических систем колеблющихся тел, конфигурация которых в любой момент времени задается одной или более угловыми переменными. В этом случае окружение системы медленно изменяется, однако процесс начинается и заканчивается при одном и том же наборе параметров. После завершения цикла колебания имеют такую же амплитуду, как и в начале цикла, однако угловые переменные изменяются.

Ханней понял, что в угловых сдвигах можно выделить динамическую и геометрическую части точно так же, как в фазовом сдвиге квантовомеханической системы. Динамическая часть — это величина, которая рассчитывается в предположении, что угол возрастает со скоростью, соответствующей мгновенному значению частоты колебаний. Заслуга Ханнея в том, что он определил геометрический вклад, называемый теперь углом Ханнея, и вывел формулу, позволяющую рассчитать этот угол как поток величины, имеющей вид квадратичной формы, через замкнутый контур в параметрическом пространстве. (Аналогия с квантовой механикой не полна, потому что классические движения часто бывают не циклическими, а хаотическими. Для таких систем нельзя определить угловые переменные и углов Ханнея не существует.)

В одном из примеров Ханнея рассматривается шарик, скользящий без трения с постоянной скоростью по некруговой проволочной петле (замкнутому контуру), когда петля медленно поворачивается один раз в своей плоскости. В данном случае угловая переменная — это расстояние, пройденное шариком вдоль контура и отсчитанное от определенной точки на нем. Угол Ханнея дает положение шарика после поворота контура относительно положения, в котором находился бы шарик, если бы контур не поворачивался. Этот угол представляет собой чисто геометрическую комбинацию периметра контура и охватываемой им площади; он велик для данного узкого контура и равен нулю для кругового.

Другой пример Ханнея дает классический аналог квантовой геометрической фазы медленно поворачиваемых спинов. Рассмотрим шарик маятника, движущийся по круговой траектории. В этом случае сила тяжести определяет направление симметрии, а именно вертикальную линию, проходящую через центр Земли. По мере вращения Земли направление симметрии поворачивается в пространстве (если эксперимент не проводится на одном из полюсов), так что через сутки положение круговой

траектории шарика маятника будет сдвинуто на угол (угол Ханнея), который равен телесному углу, порожденному направлением симметрии.

Такой сдвиг положения шарика маятника более заметен, если он движется вперед-назад, а не по кругу. Движение шарика вперед-назад можно рассматривать как суперпозицию двух круговых движений в противоположных направлениях (точно так же, как линейно-поляризованный свет можно считать суперпозицией двух циркулярно-поляризованных состояний света). Через сутки качаний маятника две круговые составляющие его движения приобретут противоположные по знаку угловые сдвиги, что проявится как поворот плоскости качаний маятника.

С помощью только что описанного опыта французский физик Фуко продемонстрировал в 1851 г. вращение Земли. Хорошо известное явление вращение плоскости колебаний маят-

ника — популярный демонстрационный опыт во многих научных музеях мира — есть частный случай угла Ханнея, представляющего в свою очередь классический аналог квантово-механической геометрической фазы. Оно может быть объяснено также как результат параллельного переноса, в данном случае плоскости качаний маятника при вращении Земли.

**В**ВИДУ возвращения к теме параллельного переноса, с которой началась эта статья, можно сказать, что я завершил цикл. Однако подобно фазе системы, совершающей адиабатический цикл, конец отличен от начала. Параллельный перенос, который вначале иллюстрировал абстрактное понятие, теперь появляется в реальных системах, поведение которых регулируется физическими законами при малых изменениях окружения. Геометрическая неголономность перешла в динамическую неголономность.

## Наука и общество

### По следам «Дискавери»...

**В** КАКОМ хрустальном шаре можно увидеть будущее американских космических исследований? Шар, в который смотрит Л. Фиск, показывает исключительно ясную картину, хотя и окрашенную в розоватые тона. «Мы вступаем в небывалый по активности период развития космической науки», — говорит Фиск, занимающий должность руководителя отдела космических наук и их приложений в Национальном управлении по авиации и исследованию космического пространства (НАСА). «Частично это объясняется необходимостью решить проблемы, возникшие в результате катастрофы с «Чэлленджером», — добавляет он, — но мы намерены двигаться и дальше».

Источник такого оптимизма виден невооруженным глазом. Программа НАСА по запуску кораблей многоцелевого использования, приостановленная на 2 года и 8 месяцев, была возобновлена 29 сентября 1988 г., когда корабль «Дискавери» стартовал с площадки Центра космических полетов им. Дж. Кеннеди. В тот же день Канада, Япония и Европейское космическое агентство приняли решение выделить в доленое участие 8 млрд. долл. в помощь США для развертывания к середине 1990-х годов космической станции «Фридом». «Эти два события, — сказал Фиск, — особенно благоприятны для того, чтобы про-

должить изучение поведения живых организмов и неживой материи в условиях невесомости». В ближайшие пять лет 17 полетов шаттлов будут нацелены на решение задач в рамках программы «Спейслаб», предусматривающих проведение опытов по обработке материалов и биологических экспериментов. Эти исследования лягут в основу более детальных экспериментов в условиях микрогравитации, которые предполагается провести на космической станции.

Возврат к жизни шаттлов позволит также пустить в дело космические аппараты, уже несколько лет стоящие в ангарах. К этим аппаратам, которые могут быть выведены в космос только с помощью шаттлов, относятся «Магеллан», предназначенный для съемки поверхности Венеры, «Галилей», который должен отправиться к Юпитеру, а также такие комплексы, как космический телескоп «Hubble Space Telescope», солнечная обсерватория «Улисс» и обсерватория по изучению гамма-излучения «Gamma-Ray Observatory». Первые два аппарата предполагается запустить в 1989 г., остальные — в 1990 г. Отмечая, что Белый дом запретил запуски коммерческих спутников с помощью шаттлов и что Пентагон разрабатывает свои собственные средства доставки, Фиск считает, что НАСА может уложиться в запланированные сроки.

Вместе с тем, идя навстречу ученым, озабоченным зависимостью их исследований от капризов шаттлов,

НАСА пытается приобрести непилотируемые ракеты-носители. «Если какой-либо аппарат можно отправить в космос с обычной ракетой, а не с шаттлом, эта возможность будет использована», — говорит Фиск. НАСА закупает ракеты для запуска аппаратов «Cosmic Background Explorer» в 1989 г., «Extreme Ultraviolet Explorer» в 1991 г. и «Mars Observer» в 1992 г. Эта организация также приобретает ракеты-носители для запуска более простых научных систем (предназначенных, например, для наблюдения за сверхновыми). «Мы надеемся осуществлять по 2 таких запуска в год, начиная с 1991 г.», — говорит Фиск.

Чтобы гарантировать поддержку своей космической программе в грядущем столетии и далее, НАСА будет пытаться начинать ежегодно по меньшей мере один крупный, долгосрочный проект. НАСА получило «добро» на испытания рентгеновской обсерватории, которая может быть запущена к 1995 г. Отдел, которым руководит Фиск, считает, что особое внимание следует обратить на комбинированный зонд для исследования астероидов и Сатурна, многоспутниковую систему для исследования Земли и инфракрасную обсерваторию. Судьба большинства из этих планов зависит, несомненно, от щедрости правительства и конгресса. Фиск и здесь настроен оптимистично. Он отметил, что программа космических исследований получит в 1989 финансовом году большую долю средств, чем другие программы НАСА и добавил: «Мы имеем хорошую поддержку конгресса и правительства».

Дж. Ван-Аллен из Университета шт. Айова приветствует предложения Фиска, но задается вопросом, насколько они реалистичны. В то время как НАСА настаивает на крупных программах с пилотируемыми аппаратами, Ван-Аллен считает, что небольшие программы с использованием беспилотных аппаратов будут менее уязвимы для возможных уменьшений бюджетных ассигнований. Он предупреждает, что космические станции могут превратиться в «настоящих обжор», поглощающих непропорционально огромную долю бюджета НАСА и немалую дающих космической науке. С ним согласен и Т. Донахью из Мичиганского университета, возглавляющий отделение космической науки Национальной академии наук. «Многие из нас чрезвычайно воодушевлены тем, что человек вышел в космическое пространство, — говорит он. — Но большой пользы от работы людей в открытом космосе мы не видим.»

# Пластичность в развитии мозга

*Связи в мозге окончательно устанавливаются уже после рождения под влиянием раннего опыта. В молекулярных процессах, обеспечивающих способность мозга к изменениям, по-видимому, принимает участие белок, называемый MAP2*

ЧИЙ АОКИ, ФИЛИП СИКЕВИЦ

**КАЖДЫЙ**, кто наблюдал, как ребенок пытается достать игрушку, согласится, что способности взрослого человека к восприятию и движению не являются врожденными, а должны развиваться со временем в результате тренировки. Генетическая программа, реализуемая за время эмбрионального развития, обеспечивает новорожденного интактными органами чувств и сформировавшимся мозгом, 100 млрд. нейронов (нервных клеток) которого уже соединены в цепи, специализированные для выполнения специфических функций. Но прежде чем мозг достигнет полной мощи в обработке и анализе сенсорного опыта, сам опыт должен оставить свой отпечаток на тонкой структуре мозга.

Хотя в главном организация мозга после рождения не изменяется, детали его структуры и функционирования остаются некоторое время пластичными, особенно в коре мозга — слое нервной ткани, формирующем извилистую поверхность мозга. Опыт, т. е. восприятие внешних стимулов — света, вкуса, запаха, звука, прикосновения — активирует определенные нейронные цепи и они со временем фиксируются, а другие остаются без употребления. Так, например, несбалансированное функционирование двух глаз в детстве приводит к постоянной недостаточности зрительного восприятия у нетренированного глаза. Развивающийся мозг можно уподобить системе автодорог — какие-то пути оказываются заброшенными, а те дороги, которыми часто пользуются, расширяются, при необходимости сооружаются дополнительные полосы.

Каким же образом опыт формирует структуры мозга? На основании результатов наших экспериментов на кошках мы предложили модель последовательности молекулярных событий, которая инициируется внешними стимулами и вносит вклад в пластичность определенной части мозга.

Вполне вероятно, что аналогичным образом разыгрываются начальные этапы развития мозга и у человека. Возможно, такие молекулярные процессы формируют многие свойства мозга, определяющие сущность человеческого сознания. Переводя особенности раннего опыта в особенности организации мозга, эти процессы могут обуславливать также некоторые индивидуальные различия сознания.

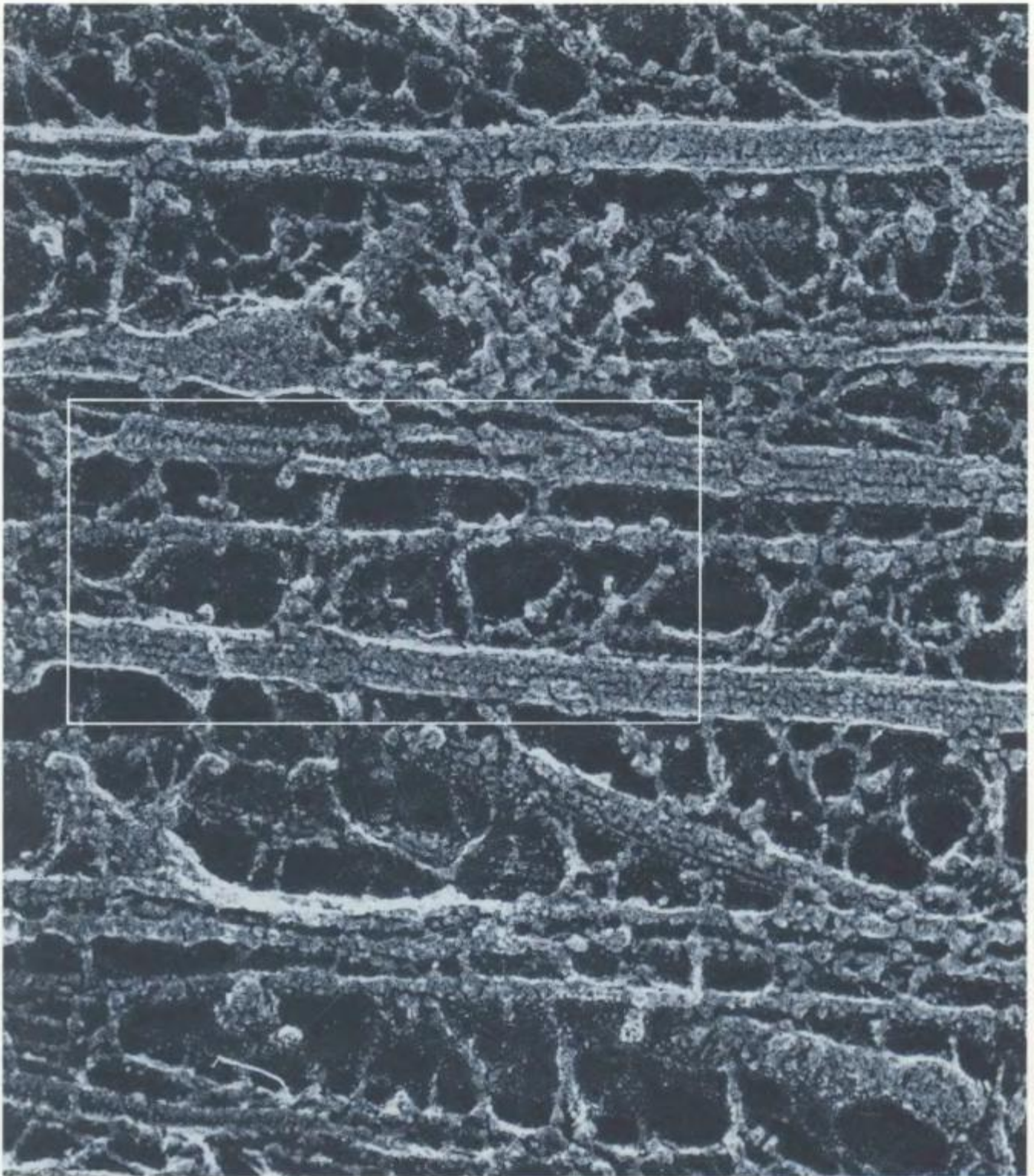
**ЗРИТЕЛЬНЫМ** опытом легко манипулировать, и поэтому многие исследования пластичности мозга, в том числе наши, сосредоточились на зрительной системе. Переработка зрительных сигналов начинается в сетчатке — тонком слое плотно упакованных сотен миллионов нервных клеток, расположенных на задней стороне глаза. Миллионная армия так называемых ганглиозных клеток сетчатки образует путь, по которому информация передается из сетчатки в мозг. Длинные отростки (аксоны) этих клеток формируют зрительный нерв. Часть входящих в его состав аксонов связывают сетчатку с мозговыми структурами, называемыми латеральными колленчатными телами (ЛКТ), имеющимися по одному в каждом полушарии мозга. Сетчатка глаза связана с латеральным колленчатым телом как на противоположной (контралатеральной), так и на той же (ипсилатеральной) стороне мозга. Часть нейронов ЛКТ в свою очередь посылают аксоны к задней части мозга, в зону, называемую слоем IV — четвертый из шести главных слоев первичной зрительной коры. Нейроны слоя IV имеют контакты с другими слоями зрительной коры.

Световые стимулы, попадающие на сетчатку, преобразуются в электрохимические сигналы, достигающие ганглиозных клеток сетчатки, которые преобразуют эти сигналы в нервные импульсы, называемые потенциалами действия. Эти импульсы распространяются вдоль аксона и до-

стигают его окончания, которое образует контакт с нейроном ЛКТ. В участках контакта, называемых синапсами, нервный импульс вызывает выделение из окончания аксона химических веществ — нейромедиаторов, которые пересекают синаптическую щель (пространство между контактирующими нейронами) и связываются со специфическими рецепторами на клеточном теле или дендритах (ветвящихся отростках) принимающей сигнал клетки. При определенных условиях связывание нейромедиатора приводит к генерации нейронами ЛКТ потенциалов действия, которые в свою очередь распространяются по аксонам и достигают нейронов первичной зрительной коры. Зрительные стимулы анализируются здесь, а также в других областях коры, куда подходят нервные пути от первичной зрительной коры.

Какое количество этих связей определяется генетически, а какое — под воздействием раннего опыта? Крупный шаг в решении проблемы был сделан в 1960-х годах в основополагающих экспериментах Д. Хьюбела и Т. Визела из Медицинской школы Гарвардского университета, получивших впоследствии за свою работу Нобелевскую премию (см. статью: D. Hubel, T. Wiesel. Brain Mechanisms of Vision, "Scientific American", September, 1979). В качестве объекта для исследования развития зрительной системы Хьюбел и Визел выбрали кошку, поскольку у этого животного, как и у человека, глаза расположены так, что зрительные поля разных глаз сильно перекрываются. Благодаря этому зрение у кошки бинокулярное (в пределах 90° в центральной части 180°-ного поля зрения). Хьюбел и Визел изучали бинокулярные клетки, расположенные в части зрительной коры, называемой полем 17. Эти клетки, отвечающие на стимуляцию обоих глаз, важны для восприятия глубины; у кошки они составляют около 40% нейронов поля 17, у прима-





МОЛЕКУЛЫ БЕЛКА MAP2 образуют мостики между микрофиламентами и микротрубочками в дендрите (принимающем сигналы отростке) нервной клетки из спинного мозга крысы. Нейрофиламенты и микротрубочки являются частью внутреннего скелета клетки, от которого зависят рост и форма дендритов. Определяя взаимодействие между белками этих структур, MAP2 обеспечивает формирование новых связей между нейронами. (Электронная микрофотография Н. Хирокавы.)



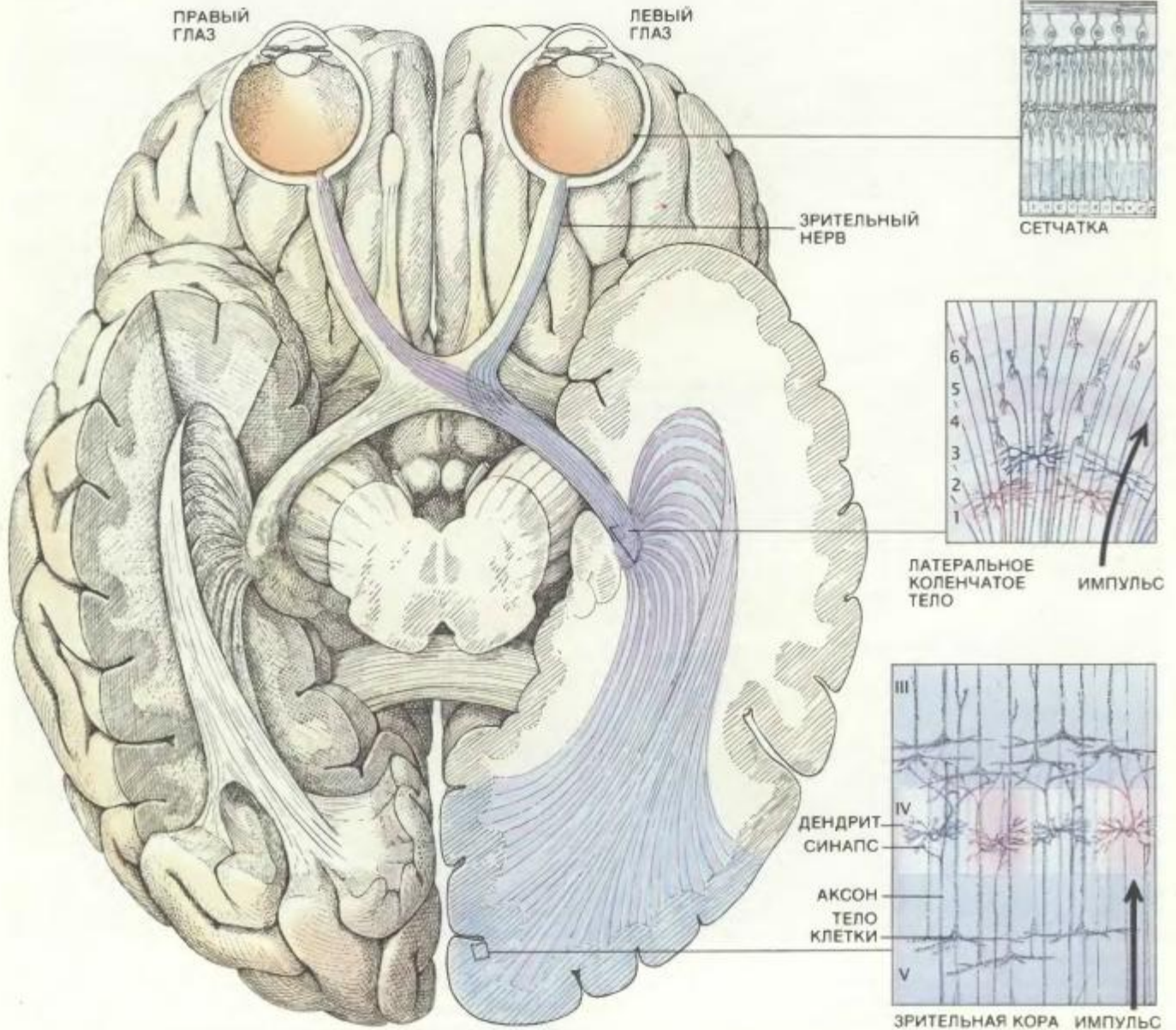
тов — 60%. Другие нейроны монокулярны, т. е. отвечают на стимуляцию только одного глаза.

С помощью электрофизиологических методов, позволяющих регистрировать сигналы, генерируемые отдельными нейронами, Хьюбел и Визел систематически определяли количество нейронов в поле 17, отвечающих на стимуляцию только одного глаза (ипсилатерального либо контралатерального) или же обоих глаз вместе, а также отмечали, имеется ли у бинокулярных клеток предпочтительность к стимуляции какого-либо

одного из глаз. Они обнаружили, что если у котенка в первые несколько месяцев после рождения один глаз был зашит, доля нейронов в поле 17, реагирующих на стимуляцию закрытого глаза, значительно снижается. В результате почти все реагирующие на свет нейроны поля 17 оказывались монокулярными и оставались таковыми даже после того, как животному предоставляли возможность видеть обоими глазами. Этот глубокий сдвиг доминантности в пользу того глаза, который функционировал с самого начала, стойко сохранялся: жи-

вотное оставалось слепым на другой глаз до конца жизни.

Какую часть мозга затрагивает депривация (т. е. выключение зрения)? Хьюбел и Визел показали, что после монокулярной депривации нейроны сетчатки и ЛКТ продолжают нормально отвечать на свет. Другими словами, нервный путь от сетчатки к ЛКТ не изменяется под действием опыта и поэтому его, по-видимому, следует считать генетически предопределенным. Такой результат означает, что изменения, сопровождающие монокулярную депривацию, дол-



ЗРИТЕЛЬНЫЕ НЕРВНЫЕ ПУТИ в человеческом мозге (вид снизу). Для простоты показан путь сигналов, возникающих только с одной стороны поля зрения. В глазу свет, попадающий на сетчатку, преобразуется в нервные импульсы, которые направляются в латеральные колленчатые тела. Сигналы от каждого глаза подразделяются по 6 слоям ЛКТ. Оттуда сигналы передаются в слой IV первичной зрительной коры, где они остаются разделенными на полосы, соответствующие одному или другому глазу. Затем сигналы по-

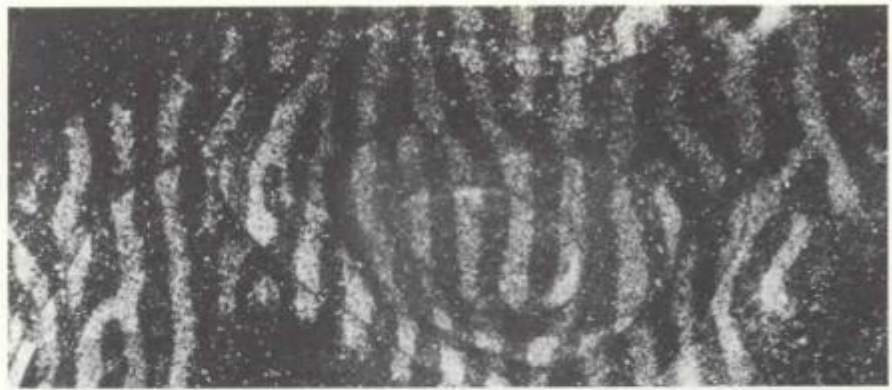
ступают в другие слои зрительной коры, где информация от обоих глаз интегрируется. Внизу справа показаны части нейрона. Аксоном называют длинный отросток, передающий импульсы от тела клетки к синапсу — специальному участку контакта между нейронами. Достигнув окончания аксона, сигнал вызывает высвобождение нейромедиатора, который пересекает синаптическую щель и связывается с рецепторами на дендрите постсинаптического нейрона.

жны затрагивать организацию нейронов коры.

Выраженность обнаруженного эффекта зависит от времени депривации. Позже Хьюбел и Визел обнаружили, что у взрослых особей монокулярная депривация не изменяет нейронной организации поля 17. К. Олсон и Р. Фриман из Калифорнийского университета в Беркли исследовали влияние возраста животного на сдвиг глазной доминантности в результате 10-дневной монокулярной депривации. Они обнаружили, что, если глаз закрывают через месяц после рождения, развивается значительный сдвиг доминантности, но по мере увеличения возраста, в котором начинается депривация, эффект снижается. В возрасте 4—5 мес не наблюдалось никакого влияния депривации на поле 17. Период от 2 до 4 мес после рождения Хьюбел и Визел назвали критическим, поскольку только в это время зрительная кора достаточно пластична, чтобы ее организация изменялась в ответ на сигналы, поступающие от сетчатки.

Для того чтобы обнаружить изменения структуры коры, сопровождающие сдвиг глазной доминантности, Хьюбел, Визел и С. Ле Вэй применили метод выявления нейронных путей с помощью радиоактивной метки. Обезьянам под анестезией в один глаз инъецировали аминокислоты, меченные радиоактивным изотопом. Аминокислоты включались в белки клеток сетчатки; эти белки транспортировались по аксонам и попадали в нейроны ЛКТ, которые в свою очередь переправляли их к нейронам слоя IV зрительной коры. Срезы мозга подопытных животных помещали на фотопленку, на которой радиоактивность, распределившаяся вдоль зрительного нервного пути, оставляла силуэт областей, связанных с глазом, в который вводилась метка.

Радиоактивные зоны в слое IV имели вид хорошо различимых полос, перемежающихся с нерадиоактивными зонами. Оказалось, что в каждую меченую зону подходят аксоны от нейронов ЛКТ, имеющих вход от одного глаза; примыкающие зоны получают сигналы от другого глаза. У нормальных обезьян такие колонки глазной доминантности имеют одинаковую ширину примерно 0,5 мм, а у монокулярно депривированных животных колонки, представляющие активный глаз, значительно увеличены, в то время как колонки, представляющие нефункционирующий глаз, редуцированы. Сходные данные были получены Ле Вэй совместно с М. Стрикером и К. Шацем в экспериментах на кошках.



КОЛОНКИ ГЛАЗНОЙ ДОМИНАНТНОСТИ выглядят на радиоавтографе слоя IV зрительной коры обезьяны как светлые и темные полосы. Каждая колонка образована окончаниями аксонов, которые принадлежат нейронам латеральных колленчатых тел, получающих сигналы только от одного глаза. Светлые полосы возникают, когда радиоактивный краситель, введенный в один глаз, переносится по зрительному нервному пути; колонки, соответствующие другому глазу, остаются темными. У животных, выросших в нормальных условиях (*вверху*), колонки, получающие сигналы из разных глаз, одинаковы по ширине. А у животных, один глаз которых был лишен возможности видеть (*внизу*), полосы, соответствующие активному глазу (в него вводили метку), гораздо шире, чем те, которые представляют депривированный глаз.

Такие анатомические данные, взятые вместе с результатами электрофизиологических экспериментов, свидетельствуют о том, что при монокулярной депривации у кошек синаптические контакты между аксонами из ЛКТ и нейронами в слое IV развиваются преимущественно на функционально активных нервных путях. Этот феномен напоминает развитие упражняемых мышц и атрофию бездействующих. Отличие мозга в том, что зависимость его развития от активности наблюдается в узком временном интервале — в критический период.

**З**А 20 ЛЕТ, прошедших со времени первых экспериментов Хьюбела и Визела, пластичность зрительной коры интенсивно исследовалась и электрофизиологическими методами, и в

анатомическом аспекте. В 1979 г. нас заинтересовал новый вопрос: каковы молекулярные механизмы, переводящие во время критического периода зрительный опыт в нейронную организацию?

Мы начали с поисков биохимических изменений, отмечающих начало и окончание критического периода. Для этого требовался прежде всего способ отличать биохимические процессы, играющие специфическую роль в пластичности коры, от общих процессов, сопровождающих рост и жизнедеятельность. Здесь обнаружилось еще одно преимущество кошек в качестве объекта изучения зрительной системы: можно задержать начало критического периода, выращивая котят в полной темноте и позволяя, таким образом, совершиться всем другим изменениям, связанным с раз-

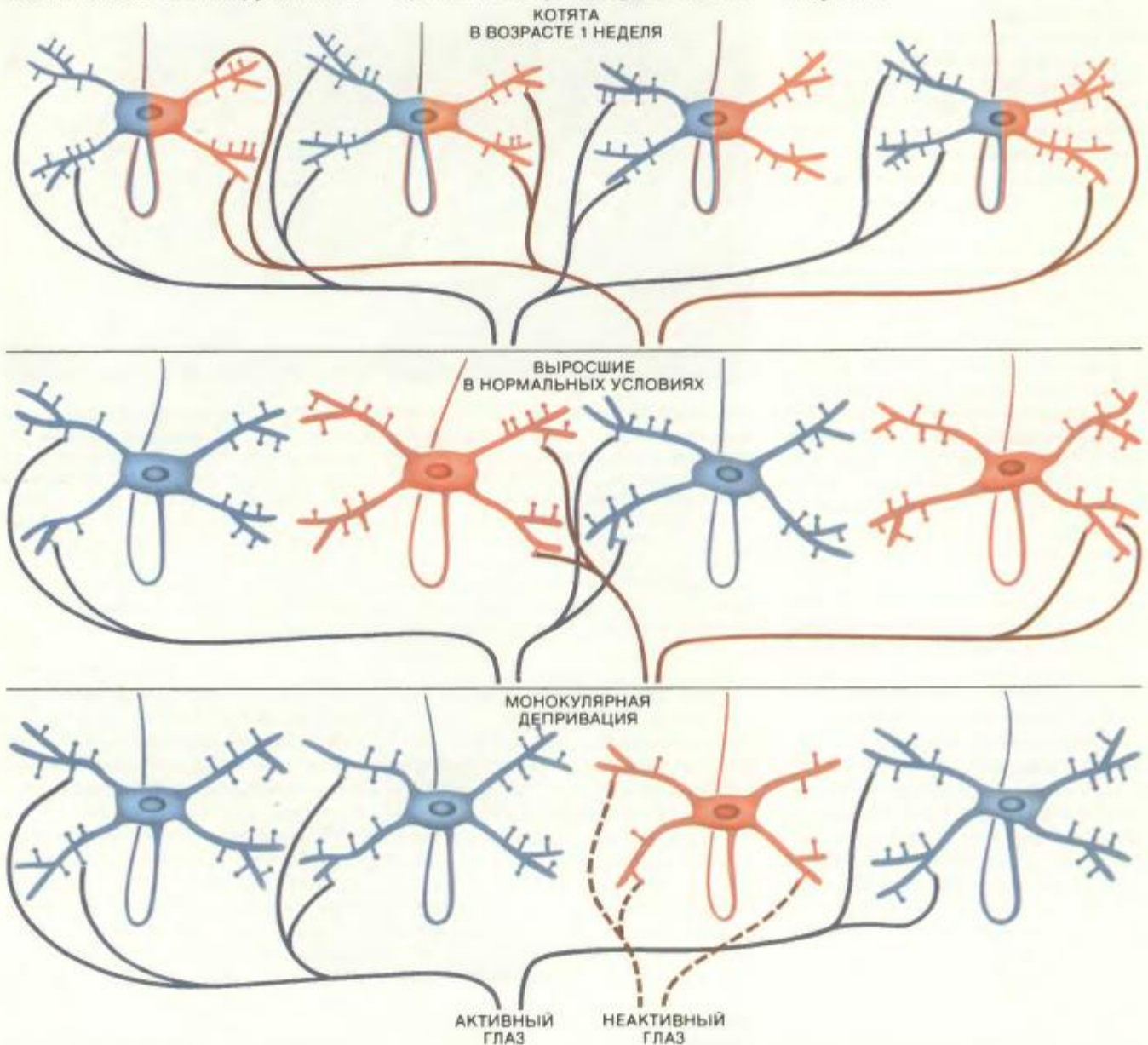
витием, после чего можно отдельно исследовать критический период зрительной системы. Эта стратегия — «темновое» воспитание — впервые была использована М. Синадером из Университета Далхузи в Галифаксе (Канада). Таким путем ему удавалось вызывать сдвиг глазной доминантности у кошек в возрасте 2 лет, несмотря на то что в норме критический период заканчивается в возрасте 4—5 мес.

Синадер обнаружил, что, как только воспитанных в темноте котят переносят на свет, сразу же начинаются зависящие от опыта изменения кортикальных связей. Более того, по данным Дж. Моузера и его коллег из Детской больницы в Бостоне, у воспитан-

ных в темноте котят через несколько часов, проведенных на свету, изменения в коре, активированные светом, продолжают даже в том случае, если животных снова поместить в темноту. Это свидетельствует о том, что биохимический механизм, лежащий в основе пластичности, находится в покое до тех пор, пока свет не приведет его в действие.

Поиск биохимического механизма, приводимого в действие светом, мы начали с изучения эффектов циклического аденозинмонофосфата (сАМР). Это соединение служит в клетках универсальным «вторичным посредником»: при его участии сигналы, воспринимаемые рецепторами на кле-

точной поверхности, передаются к соответствующим структурам внутри клетки. В пользу нашего выбора было несколько соображений. Показано, что аналоги сАМР *in vitro* стимулируют развитие нейронов из клеток-предшественников. Кроме того, Т. Касамацу и его коллеги из Калифорнийского технологического института на основании полученных ими данных высказали предположение, что распространенный нейромедиатор норадреналин играет важную роль в пластичности коры благодаря способности активировать синтез сАМР. Гипотеза Касамацу побудила нас выяснить роль сАМР более подробно.



ПЕРЕСТРОЙКА связей между нейронами во время развития приводит к сдвигу глазной доминантности. Здесь изображены клетки слоя IV первичной зрительной коры, контактирующие с аксонами нейронов латеральных колленчатых тел (ЛКТ). Разными цветами обозначены пути, по которым следуют сигналы, возникающие в разных глазах. Нейроны 1-недельных котят (вверху) получают сигналы от

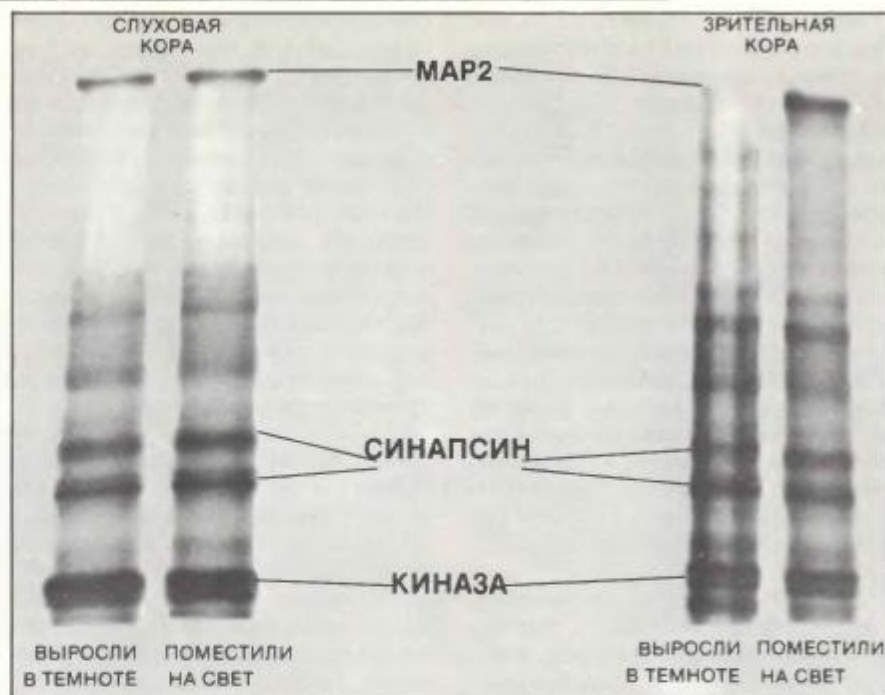
обоих глаз. При нормальном развитии (в середине) аксоны ЛКТ разделяются в колонки, каждая из которых обслуживает только один из двух глаз. Однако, если один глаз лишен стимуляции (внизу), большая часть клеток образует контакты с аксонами ЛКТ, несущими сигналы от активного глаза, и отвечает на стимуляцию только этого глаза.

Эффект сАМР может быть результатом последовательности хорошо изученных биохимических реакций. Норадреналин, связываясь с поверхностью клетки, действует как «первичный посредник», активируя фермент, называемый аденилатциклазой, который участвует в синтезе сАМР. Затем сАМР действует как внутриклеточный вторичный посредник, активируя другой фермент — сАМР-зависимую протеинкиназу, которая фосфорилирует (присоединяет фосфатную группу) определенные белки в клетке. Для многих из этих белков неизвестно, к чему приводит фосфорилирование, однако считается, что добавление отрицательно заряженной фосфатной группы к специфическим местам молекулы белка может изменить пространственную структуру белка и таким образом повлиять на его биологическую активность.

Мы решили проверить гипотезу Касамацу и стали искать в зрительной системе кошки белки, которые фосфорилируются сАМР-зависимой протеинкиназой. Чтобы идентифицировать такие белки, клетки зрительной коры кошек гомогенизировали и полученный препарат инкубировали с радиоактивным аденозинтрифосфатом (АТФ), который служил источником фосфатных групп. Любые белки, фосфорилировавшиеся за время инкубации, должны были нести радиоактивную фосфатную группу. Белки разделяли с помощью метода гелеэлектрофореза и благодаря радиоактивной метке фосфорилированные белки выявлялись на рентгеновской пленке.

Мы искали белки, которые оказываются более фосфорилированными в присутствии сАМР. Действительно, некоторые белки, по всей видимости, фосфорилировались протеинкиназами, активируемыми сАМР. Один из них — синапсин, который обнаруживается в высоких концентрациях в синапсах. Однако на роль посредника в процессах, обеспечивающих пластичность коры, этот белок не годился, так как обнаружилось, что фосфорилирование синапсина у кошек, росших в темноте, не отличалось от нормального. Вторым кандидатом была сама сАМР-зависимая протеинкиназа. Но и этот фермент, как выяснилось, в равных количествах имеется и у новорожденных, и у взрослых кошек независимо от световых условий, и его фосфорилирование также не изменяется в ходе развития животного.

Наши исследования сосредоточились на третьем фосфорилируемом белке с необычно большой молекулярной массой — около 300 тыс. дальтон. Мы идентифицировали его как



БИОХИМИЧЕСКИЕ РАЗЛИЧИЯ МАР2 из зрительной коры двух кошек одного помета (одна из них находилась первые 52 дня жизни в темноте, а другую сначала содержали в темноте, а затем поместили на свет) выявлены при помощи гелеэлектрофореза с последующей радиоавтографией. Клетки коры инкубировали с радиоактивным фосфатом в присутствии сАМР и сАМР-зависимой протеинкиназы. Темные полосы соответствуют белкам, в которые включился фосфат. Два белка — синапсин и киназа — у обоих животных фосфорилированы в равной степени, а МАР2 — явно различно. У кошки, содержавшейся только в темноте, МАР2 в зрительной коре, возможно, уже полностью фосфорилирован и поэтому в него не включилась радиоактивная метка, в то время как у кошки, которую помещали на свет, МАР2 дефосфорилирован и поэтому пометился. На фосфорилирование МАР2 в слуховой коре содержание в темноте не влияет.

связанный с микротрубочками белок 2 (МАР2, от англ. microtubule-associated protein 2) с помощью специфических к этому белку антител, которые нам предоставили А. Биндер из Виргинского университета и А. Матус из Лаборатории Фридриха Мишера в Базеле (Швейцария). Концентрация этого белка в коре одинакова и при темновом, и при световом режиме содержания котят, но фосфорилирование до и после критического периода неодинаково. В препаратах, выделенных из зрительной коры кошек, росших в нормальных световых условиях, после завершения критического периода, МАР2 легко фосфорилировался *in vitro*. Это указывало на то, что при жизни животного многие места на молекуле белка остались нефосфорилированными. Напротив, МАР2 из зрительной коры кошек, выращенных в темноте (с задержанным критическим периодом), почти не фосфорилировался, что указывало на его полное фосфорилирование *in vivo*.

Связаны ли эти очевидные различия в фосфорилировании с различиями в пластичности мозга до и после критического периода? Для выяснения этого мы исследовали препараты

зрительной коры, взятые у котят, критический период которых задержали, вырастив их в темноте и затем инициировали, поместив на несколько часов на свет. Было обнаружено, что МАР2 в таких препаратах легко фосфорилируется *in vitro*, как и МАР2 нормальных кошек. Таким образом, этот белок, по-видимому, остается полностью фосфорилированным, пока животное остается в темноте, но, как только свет начинает стимулировать зрительные пути, он дефосфорилируется.

Однако, для того чтобы доказать роль фосфорилирования МАР2 в пластичности коры, следовало исключить возможность того, что мы наблюдали всего лишь некоторые проявления адаптации к темноте, не связанные с пластичностью. Для этого мы исследовали взрослых кошек, выросших в нормальных условиях, которых затем помещали в темноту. Такая процедура не влияла на пластичность коры, поскольку критический период у животных давно закончился. По фосфорилированию МАР2 эти особи не отличались существенно от взрослых кошек, живущих при нормальном освещении.

Нужно было исключить также, что фосфорилирование MAP2 обусловлено общим влиянием внешних условий на развитие, например запаздыванием роста мозга в целом. Поэтому мы исследовали у кошек, росших в темноте, фосфорилирование белка из слуховой коры (в этой части мозга перерабатывается акустическая информация). Поскольку животных в данном случае не лишали звуковых стимулов, сроки критического периода для слуховой коры оставались неизменными, и таким образом, должно было проявиться общее влияние развития в темноте на фосфорилирование MAP2. Мы установили, что фосфорилирование MAP2 в слуховой коре никак не изменялось, если кошки росли в темноте или потом содержались на свету.

Но, быть может, фосфорилирование связано с изменениями зрительной стимуляции самой по себе, а не с пластичностью? Чтобы исключить и это, мы исследовали MAP2 в лате-

ральных колоччатых телах. Хьюбел и Визел показали, что клетки ЛКТ не проявляют пластичности после рождения и продолжают нормально отвечать на свет после монокулярной депривации. В наших опытах не было обнаружено изменений в фосфорилировании MAP2 в ЛКТ до и после критического периода. Эти последние данные подтверждали предположение о том, что фосфорилирование MAP2 в зрительной коре обусловлено не просто стимуляцией нервных путей, а имеет прямое отношение к пластичности зрительной коры.

**Б**ЕЛОК MAP2 относится к цитоскелетным белкам, называемым так потому, что они служат структурными элементами клетки, определяя ее форму, подобно тому как скелет определяет форму тела. Многие из этих белков участвуют также во внутриклеточном транспорте молекул и органелл. Белки, связанные с микротрубочками, (MAP) обнаруживаются

вместе с главным компонентом цитоскелета — микротрубочками, которые образованы белком тубулином.

MAP2 сам по себе обнаруживается лишь в нейронах, где он связан не только с микротрубочками, но также с актином, который образует другой компонент цитоскелета — микрофиламенты, и с белком нейрофиламентов, образующим цитоскелетные структуры, свойственные только нейронам. Действительно, MAP2 был найден во всех нервных клетках, подвергавшихся такой проверке; это позволяет предположить, что он играет роль в пластичности не только в зрительной коре во время критического периода, но и в нейронных путях всего мозга и в течение всей жизни. (Интересно отметить, что при болезни Альцгеймера в мозге наблюдаются аномальные скопления цитоскелетных белков, в том числе MAP2, причем выраженность этих нарушений, по всей видимости, коррелирует со степенью слабоумия.)

Какова может быть роль MAP2 в пластичности коры? Прежде всего, будучи цитоскелетным белком, он способен участвовать в определении формы нейрона, которая находится под особо строгим контролем. Большинству нейронов свойственна характерная картина ветвления аксонов и дендритов. Имеются основания предполагать, что MAP2 участвует в определении морфологии дендритов. Так, по данным электронной микроскопии, микротрубочки (с которыми связан MAP2) ориентированы вдоль дендритов и дендритных ветвей. Матус с помощью антител показал, что MAP2 сконцентрирован в дендритах.

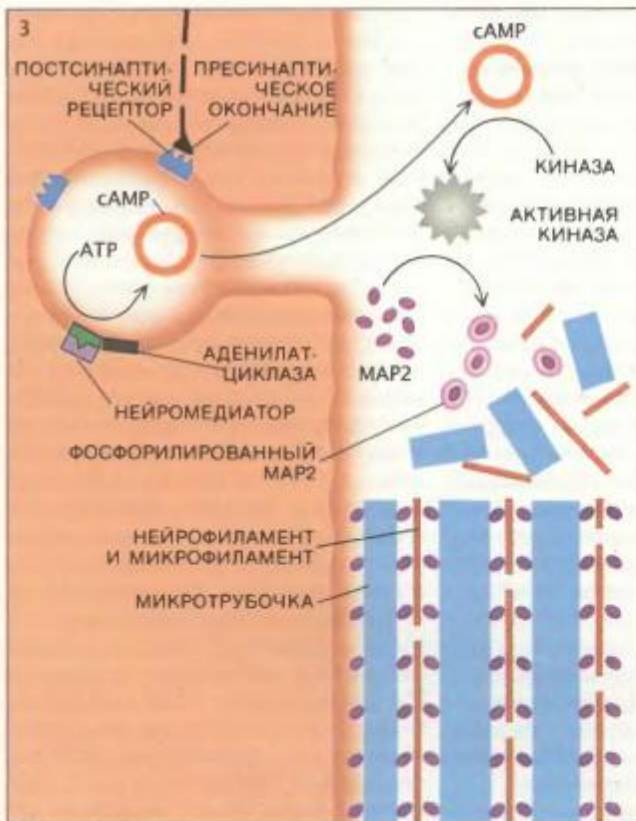
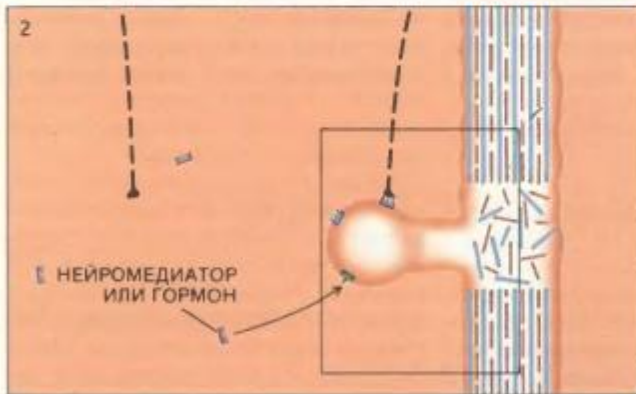
Более того, Р. Бернхардт совместно с Матусом обнаружил, что MAP2 накапливается во вновь формирующихся дендритах, прежде чем там появляется тубулин — основной компонент микротрубочек. Эти исследователи предположили, что MAP2 в дендритах инициирует и регулирует сборку структур, содержащих тубулин, белок нейрофиламентов, актин и белки, связанные с микротрубочками. Таким образом, MAP2, возможно, задает детали формы дендритов и внутриклеточный перенос веществ между дендритами и телом клетки.

Форма дендритов может сказываться на функциях нейрона несколькими путями. Например, чем более ветвисты и протяженны дендриты у данного нейрона, тем больше сигналов от других нейронов он может принять и суммировать. Кроме того, от ветвления дендритов может зависеть эффективность передачи сигналов. Когда дендриты нейрона получают возбуждающие или тормозные

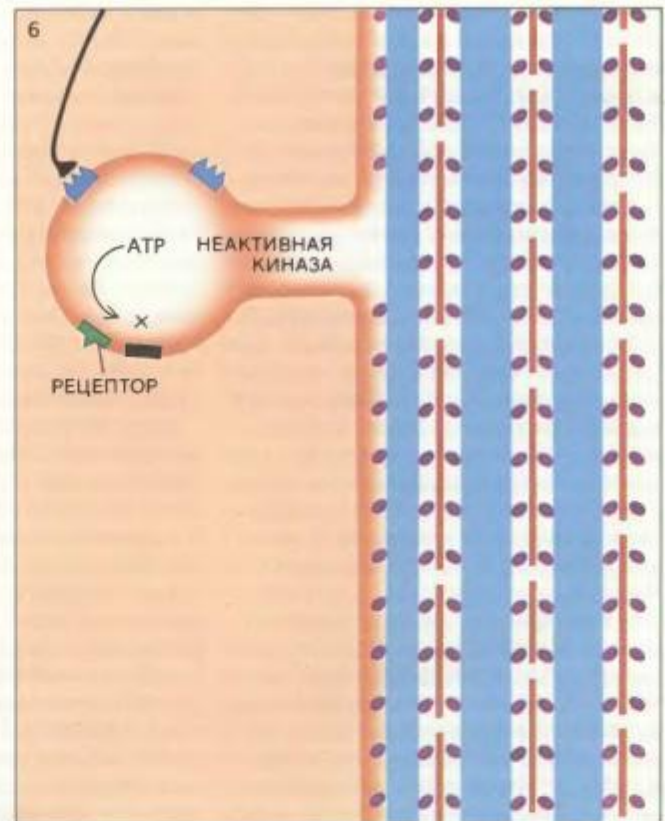
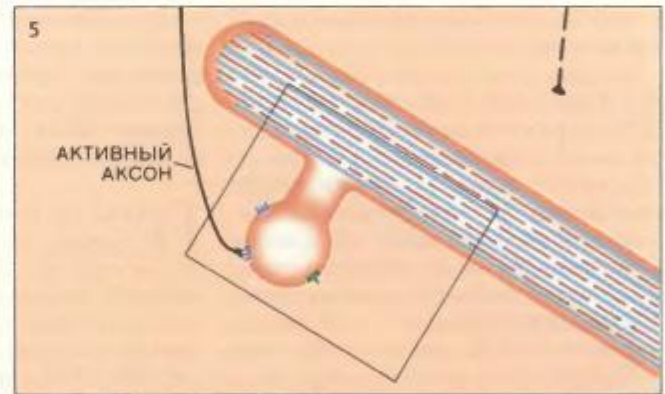


РАСПРЕДЕЛЕНИЕ MAP2 в пирамидных нейронах зрительной коры крысы выявлено при помощи моноклональных антител к MAP2, меченных красителем. Сильное окрашивание (темные участки), указывающее на высокую концентрацию MAP2, заметно в дендритах; этот белок содержится также в телах клеток (кроме ядер). Присутствие MAP2 в дендритах позволяет предположить, что он обеспечивает пластичность мозга, регулируя формирование дендритов.

ВЫРАСТИЛИ В ТЕМНОТЕ



ПОМЕСТИЛИ НА СВЕТ



МАР2 может играть роль в перераспределении дендритов и таким образом участвовать в пластичности зрительной коры. Нейрон коры (1) котенка, выращенного в темноте, контактирует с неактивным аксоном. Нейромедиатор или гормон, имеющийся при содержании животного в темноте, связывается с шипиками дендритов, что вызывает дестабилизацию белков цитоскелета в них (2). В результате связывания нейромедиатора или гормона рецептором активируется фермент аденилатциклаза, который превращает аденозинтрифосфат (АТФ) в циклический аденозинмоно-

фосфат (сАМР). сАМР активирует другой фермент — киназу, фосфорилирующую МАР2. Фосфорилированный МАР2 предотвращает образование микротрубочек, а также подавляет их взаимодействие с микрофиламентами и нейрофиламентами. Когда котенка помещают на свет, дендрит благодаря своей пластичности сдвигается к активному аксону (4). Дендриты могут стабилизироваться (возможно, обратимо), когда стимуляция зрительного нервного пути вызывает дефосфорилирование МАР2 и он образует мостики между белками цитоскелета (5, 6).

сигналы от других нейронов, в них возникает их собственный сигнал, который распространяется к телу клетки. Если до тела нейрона доходит достаточно сильный сигнал, клетка генерирует потенциал действия. Форма и размеры дендрита определяют, насколько быстро и далеко может распространяться сигнал и поэтому влияют на способность нейрона генерировать потенциал действия. Скажем, сигнал, возникший в крупном дендрите, расположенном близко к телу клетки, с большей вероятностью приведет к генерации потенциала действия, чем сигнал от маленького удаленного дендрита.

**КАКИМ ОБРАЗОМ MAP2** может влиять на структуру цитоскелета, как это предположили Матус и Бернхардт? Одна из возможностей проистекает из того факта, что для полимеризации тубулина и сборки его в микротрубочки необходимо присутствие дефосфорилированного MAP2. Действительно, дефосфорилирование MAP2, как правило, способствует образованию стабильных связей между цитоскелетными белками тубулином, актином и белком нейрофиламентов, в то время как фосфорилирование MAP2 ослабляет их. Таким образом, когда в нейроне MAP2 фосфорилирован, дендриты неизменны, а когда он дефосфорилирован, их форма и даже длина могут меняться.

В своих ранних исследованиях мы предположили, что у котят, росших в темноте, MAP2 фосфорилирован, а когда свет инициирует зависящие от опыта изменения в синапсах, MAP2 дефосфорилируется. Можно было думать, что, пока MAP2 полностью фосфорилирован (а таково его состояние при содержании животных в темноте), организация цитоскелета нейронов остается недетерминированной и поэтому кора находится в готовности к изменениям в ответ на нейронную активность под действием света. Последующее снижение пластичности во время критического периода может быть частично обусловлено нарастающим дефосфорилированием MAP2. В результате этого процесса цитоскелет нейрона делается все более жестким, что стабилизирует форму клетки. Тем самым ограничиваются возможности реорганизации взаимосвязей между нейронами зрительной коры.

Идея о том, что детали нервной клетки остаются неопределенными вплоть до критического периода, получила подтверждение в исследованиях зрительной коры у выращенных в темноте обезьян и грызунов. Нейроны у этих животных имеют существенно меньше, чем в норме, дендрит-

ных шипиков — коротких выступающих отростков, обычно наблюдаемых на поверхности дендритов. Эти шипики представляют собой основные места синаптических контактов, и их отсутствие должно сильно влиять на межнейронные связи. Может быть, действие MAP2 на микротрубочки регулирует образование и перестройку шипиков, точно так же, как дендритов.

Влияя на цитоскелет, MAP2 может также участвовать в пластичности коры, регулируя транспорт и локализацию веществ, необходимых для синаптической передачи сигналов. К таким веществам относятся, вероятно, рецепторы гормонов, нейромедиаторы, стимуляторы роста, а также мембранные белки, модулирующие возбудимость нейронов.

**ИТАК**, мы идентифицировали одно вещество — MAP2, биохимические свойства которого в зрительной коре изменяются с началом критического периода. Это первый подобный белок, но, несомненно, не последний. Могут существовать и другие, которые просто не удастся обнаружить нашими методами. Например, биологическая активность многих белков может изменяться с началом критического периода иным способом, нежели фосфорилирование. И хотя доказательств роли MAP2 убедительны, пока нельзя быть уверенным в том, что фосфорилирование MAP2 действительно вызывает изменение пластичности, а не является, наоборот, только результатом этого изменения. Однако мы считаем, что обнаруженные молекулярные изменения должны предшествовать структурным изменениям в дендритах.

Хотя конкретные функции фосфорилирования MAP2 остаются неясными, сам факт этого фосфорилирования поставил ряд новых вопросов. В частности, каким образом стимуляция нервных путей светом изменяет степень фосфорилирования MAP2 в зрительной коре? Вызывается ли это изменением внутриклеточной концентрации cAMP (который активирует протеинкиназу, фосфорилирующую MAP2)? Мы полагали, что действие света на уровень cAMP может состоять в изменении плотности рецепторов для норадреналина — нейромедиатора, которому Касамацу отводил роль в пластичности коры. (В результате связывания норадреналина рецептором активируется аденилатциклаза, катализирующая образование cAMP.)

Для проверки этой гипотезы мы определяли локализацию рецепторов, инкубируя срезы зрительной коры в среде с радиоактивным «зондом» —

веществом, специфически связывающимся с рецепторами норадреналина. Было обнаружено, что отчетливо наблюдаемое распределение норадреналиновых рецепторов по слоям заметно не различается у кошек, содержавшихся в разных условиях освещенности — нормальных животных, выросших в темноте, и у росших в темноте, но помещенных затем на свет. Эти данные свидетельствуют, что изменения фосфорилирования MAP2 не коррелируют с какими-либо существенными изменениями локализации и плотности рецепторов норадреналина. Наша методика, однако, не позволяет заметить какое-либо перераспределение рецепторов между клетками различных типов в пределах слоя: для этого требуется детальное микроскопическое исследование.

Можно было также предполагать, что при действии света на зрительную систему изменяется какая-то другая система рецепции медиаторов или гормонов. Недавно М. Бир из Университета Брауна и В. Сингер из Института по изучению мозга им. Макса Планка во Франкфурте получили интересные данные, указывающие на то, что пластичность коры поддерживается не только норадреналином, как считал Касамацу, но синергичным действием норадреналина и другого нейромедиатора — ацетилхолина, широко представленного в зрительных нервных путях. Высказывались также предположения о возможной роли еще одного нейромедиатора — глутаминовой кислоты.

Сейчас мы проверяем возможность того, что зрительные сигналы инициируют выделение веществ, активирующих аденилатциклазу, и таким образом стимулируют синтез cAMP. Мы пытаемся также определить, не влияет ли стимуляция зрительных нервных путей на уровень cAMP через активность другого фермента — cAMP-фосфодиэстеразы, расщепляющего cAMP. Третья гипотеза заключается в том, что деятельность зрительной системы влияет прямо на MAP2. Например, если во время содержания животного в темноте MAP2 расположен вблизи cAMP-зависимой протеинкиназы, он, таким образом, поддерживается в фосфорилированном состоянии, а когда свет впервые стимулирует зрительную систему, MAP2 как-то переносится в другое место, удаленное от киназы. Четвертая возможность — активация фермента протеинфосфатазы, который дефосфорилирует белки.

**ДЛЯ ПОЛНОГО** понимания роли MAP2 в критический период необходимы более детальные знания о самом этом белке. По сообщению



Р. Валли и У. Теркауфа из Вучестерского фонда экспериментальной биологии в Шрусбери, шт. Массачусетс, в молекуле MAP2 имеется 22 места, в которых может присоединяться фосфатная группа, фосфорилирование 13 из них зависит от cAMP. Возможно, биологические функции MAP2 тонко регулируются в зависимости от того, сколько в нем мест или в какой комбинации фосфорилировано. Действительно, внутриклеточные cAMP-зависимые протеинкиназы продолжают фосфорилировать MAP2 с заметной скоростью и во взрослом организме; это позволяет предположить, что фосфорилирование и дефосфорилирование MAP2 играют важную

роль и в других процессах, помимо обеспечения пластичности коры при ее развитии.

Мы только начинаем разбираться, каким образом молекулярные события влияют на структуру нейронов и как эти структурные изменения сказываются на функциях мозга. Поиск ответов на такие вопросы приближает нас к представлению о механизмах запечатления внешнего мира в микроскопической структуре мозга. В конечном счете ответ приведет к глубокому пониманию того, как индивидуум, формируясь по фиксированной генетической программе, в то же время является уникальным продуктом опыта.

задержать эту процедуру специально, чтобы дать возможность плоду развиваться. Консультанты также пришли к согласию, что использование тканей плода должно санкционироваться только при том условии, если беременная женщина идет на это сознательно. Главной для большинства членов совета была проблема разработки правил, которые исключат взаимозависимость решения женщины об использовании ее плода и самого намерения сделать аборт.

В этой связи совет разработал несколько пробных рекомендаций. В частности, получение согласия женщины на взятие тканей ее плода и даже предварительное информирование об использовании эмбриональных тканей не должны совершаться до тех пор, пока у нее не созреет решение сделать аборт.

Внушало тревогу то, что, если потребность в эмбриональных тканях будет расти, некоторых женщин, возможно, привлечет финансовая сторона дела. Поэтому рекомендовано считать оплату незаконной. Для того чтобы исключить случаи, когда женщина забеременеет с расчетом предоставить эмбриональную ткань друзьям или членам семьи, совет полагает необходимым установить, чтобы государство не поддерживало трансплантацию тканей от доноров, известных реципиенту. Бопп считает, что и такие предосторожности недостаточны: по его мнению, разрешение использовать ткани плода означает «благородный» предлог для аборта.

Говоря от имени большинства совета, Д. Робинсон, глава кафедры физиологии Джорджтаунского университета заявил, что разрешение использовать ткани плода в исследованиях не подразумевает этического одобрения аборта. Здесь несогласные отмежевываются от большинства: Бопп и Берчелл не считают возможной этическую «стерилизацию» проблемы.

Окончательное заключение совета в конечном счете отправится в распоряжение директора НИЗ, а затем Уиндома. Между тем около 500 врачей и специалистов в области этики, выступающих против абортов, уже подписали петицию, требующую от президента безотлагательного принятия предписания Бозра.

Ситуация может еще более обостриться: совет признал, что эксперименты на животных свидетельствуют о потенциальной эффективности трансплантации эмбриональных тканей для лечения не только паркинсонизма, но и ювенильного диабета. Может быть, речь скоро пойдет и о других болезнях.

## Наука и общество

### Эмбриональные проблемы

**ЭКСПЕРИМЕНТЫ**, в которых ткань мозга абортированных эмбрионов пересаживали больным паркинсонизмом, в нескольких случаях дали благоприятные результаты. Каков бы ни был исход этих операций, они сделали использование эмбриональных тканей предметом острейших дискуссий. Подобные эксперименты с целью лечения болезни Паркинсона проводились до сих пор в Швеции, Англии и других странах, но не в Соединенных Штатах. Когда в этом году исследователи из Национальных институтов здоровья (НИЗ) решили просить санкции на такие эксперименты, они вызвали в правительстве интерес, который мог бы иметь самые далеко идущие последствия.

В ответ на требования ученых помощник секретаря по проблемам здравоохранения Р. Уиндом наметил десять вопросов, касающихся того, как и при каких обстоятельствах могут использоваться человеческие эмбриональные ткани в исследовательской работе, и обратился в НИЗ с предложением создать совет консультантов для рассмотрения этих вопросов. В сентябре и октябре 1988 г. такой совет, руководимый А. Адамсом, несколько дней обсуждал поставленные вопросы и принял порядок работы.

Уиндом приостановил большинство исследований по трансплантации эмбриональных тканей в ожидании исхода обсуждения. Поэтому члены консультативного совета были удивлены, когда буквально перед их первым заседанием в обзоре новостей

появилось сообщение о том, что помощник президента Г. Бозр составил проект предписания, утверждающего в качестве государственной политики следующее: «неродившиеся или новорожденные дети, умершие в результате изъятия из тела матери, не должны использоваться в исследовательских целях или в целях трансплантации». Явно исключая какую бы то ни было федеральную поддержку подобных исследований, это предписание, казалось, сводит на нет роль консультативного совета. Белый дом спешно потребовал от секретаря по проблемам здравоохранения и социального обеспечения незамедлительно пересмотреть предложенный Бозром проект.

После того, как этот инцидент был исчерпан, совет пришел к предварительным заключениям, которые должны быть приняты голосованием. Их центральный пункт гласит, что при существующем положении вещей использование тканей абортированных эмбрионов социально приемлемо. Однако два члена совета — юрист Дж. Бопп, уже имеющий опыт судебных процессов по поводу абортов, и теолог из Университета Нотр-Дам Дж. Берчелл — заявили протест, в котором утверждают, что, если правительство санкционирует подобные исследования, оно будет нести моральную ответственность за аборт.

В противоположность этому большинство членов совета согласны с тем, что использование эмбриональных тканей для исследований или лечения можно регулировать введением жестких правил. Это застраховало бы от того, что у женщины возникнет соблазн сделать аборт или, наоборот,

# Структурный грунт

*Необычные геометрически правильные структуры на поверхности земли — это побочный продукт самого обычного физического процесса*

УИЛЬЯМ Б. КРАНЦ, КЕВИН ДЖ. ГЛИСОН,  
НЕЛСЕН КЕЙН

**П**ОРЯДОК в природе кажется не правилом, а исключением. Солнечная система, сложные живые организмы, кристаллическая решетка — все это редкие примеры упорядоченности среди всеобщего распада и хаоса. Особенность процессов во Вселенной состоит в том, что они происходят преимущественно с увеличением энтропии. Тем более чарующее впечатление производят на нас проявления порядка в природе. Один из ярких примеров — любопытное геофизическое явление, называемое структурным грунтом.

Термин «структурный грунт» употребляют по отношению к таким природным образованиям, которые обладают геометрически правильной формой и выделяются благодаря тому, что «очерчиваются» камнями, растительным покровом или рельефом, приобретающими конфигурацию колец, полос или многоугольников. В этой статье мы ограничимся рассмотрением фигур, возникающих в насыщенной влагой почве, когда она многократно промерзает и оттаивает. Подобные образования встречаются по всему земному шару — на уровне моря в полярных и субполярных районах, а также на больших высотах в зонах умеренного климата.

Одни фигуры занимают площадь в несколько квадратных километров, площадь других — менее квадратного метра. Бывает, что они содержат валуны величиной с человека, а иногда их можно заметить лишь благодаря изменившейся местами растительности. Среди них есть активные образования, формирование которых еще продолжается, и неактивные реликтовые формы, которые приобрели свои очертания в минувшую ледниковую эпоху.

Изучением структурного грунта занимаются уже более ста лет: одни из первых записей наблюдений, проведенных шведским геологом Ф. Свенониусом, были опубликованы в 1880 г. В 1907 г. другой швед — О. Норденшёльд — предложил механизм, объясняющий образование структурного грунта; спустя примерно 80 лет на основе этого механизма мы разработали научно обоснованную модель, которую можно использовать для теоретического прогноза подобных структур.

По идее Норденшёльда структурный грунт обусловлен знакомым всем явлением — свободной конвекцией. Это она заставляет расти грозное облако и дрожать воздух над раскаленным асфальтом. Конвекция может возникать, когда жидкость подогревается снизу. Более теплая жидкость вблизи источника тепла расширяется и становится менее плотной; тогда под действием силы тяжести более плотная и холодная жидкость опускается вниз, а ее место занимает менее плотная. Если тепло подводится непрерывно, то в некотором объеме жидкости может установиться режим конвективного перемешивания.

В процессе циркуляции жидкость разделяется на «ячейки», способные образовывать высокоупорядоченные структуры. Размышляя над геометрически правильной формой таких структур, Норденшёльд предположил, что причиной возникновения некоторых видов структурного грунта может быть свободная конвекция воды через пористую почву.

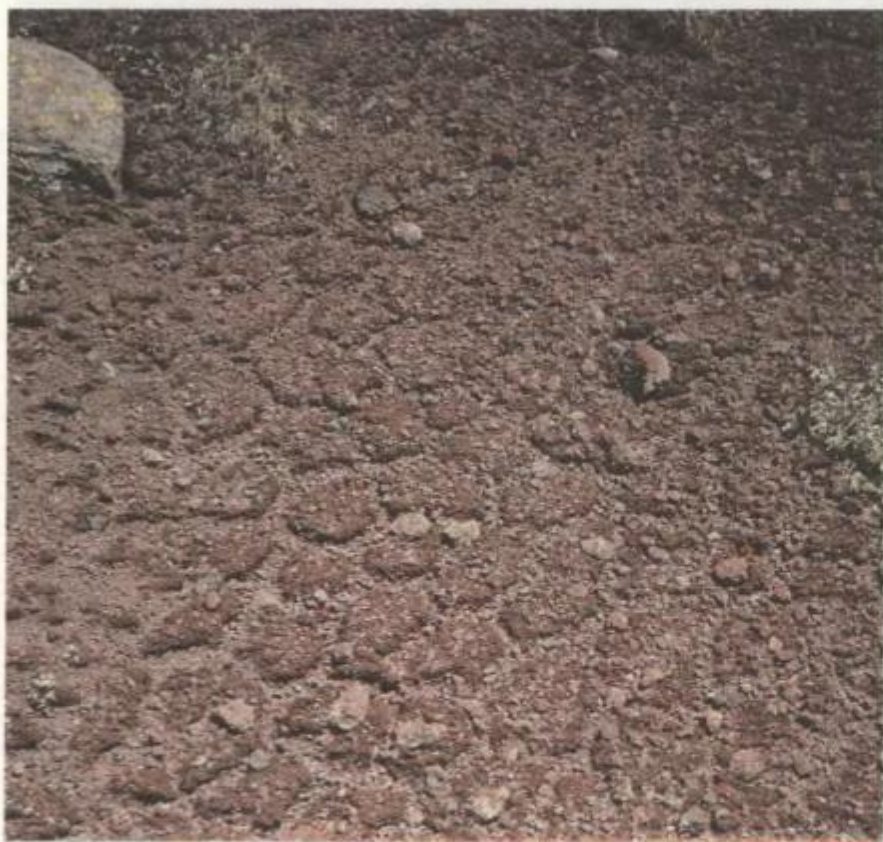
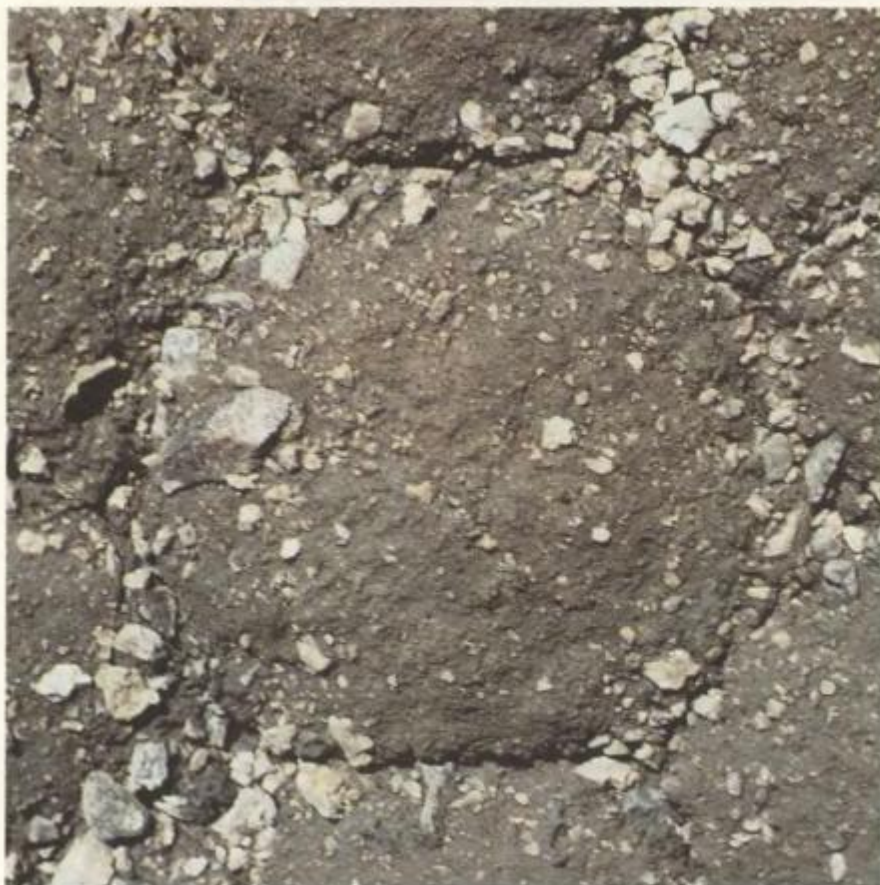
Однако Норденшёльд не сумел объяснить, каким образом конвективные ячейки помогают геометрически правильным формам «воспроизводить» на земной поверхности. И в наши



КАМЕННЫЕ КОЛЬЦА диаметром около трех метров на Западном Шпицберге



гене (Норвегия). Поверхностный слой почвы, насыщенной водой, зимой промерзает, а весной оттаивает. По мнению авторов, размеры и расположение таких колец определяются свободной конвекцией в оттаивающем грунте.



**КАМЕННЫЕ МНОГУГОЛЬНИКИ** иногда имеют почти идеальную шестиугольную форму (вверху). На ровной местности многоугольники образуют непрерывную сеть (внизу). Эти узоры возникают в результате суточных, а не сезонных циклов заморозания-оттаивания; диаметр структур — от 5 до 20 см. Верхний шестиугольник авторы сфотографировали в районе Бэртут-Бьютт (шт. Монтана); нижний снимок получен в горах Сан-Хуан на юго-западе шт. Колорадо.

дни теории все еще бьются над решением этого вопроса. Разработанная нами в последние десять лет модель позволяет дать приемлемое объяснение упорядоченности некоторых форм структурного грунта. Чтобы вы могли наглядно предоставить себе действие предложенного нами механизма, напомним, как происходит свободная конвекция в грунте.

Свободная конвекция может возникать, когда мерзлый грунт оттаивает. Во время таяния вода вблизи поверхности земли нагревается, а та вода, которая находится около фронта таяния (т. е. границы между оттаявшим и мерзлым грунтом), остается холодной. Для большинства жидкостей это означало бы, что более плотная жидкость находится на дне и свободная конвекция невозможна. Но вода имеет наибольшую плотность не при температуре заморозания, а при температуре  $+4\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

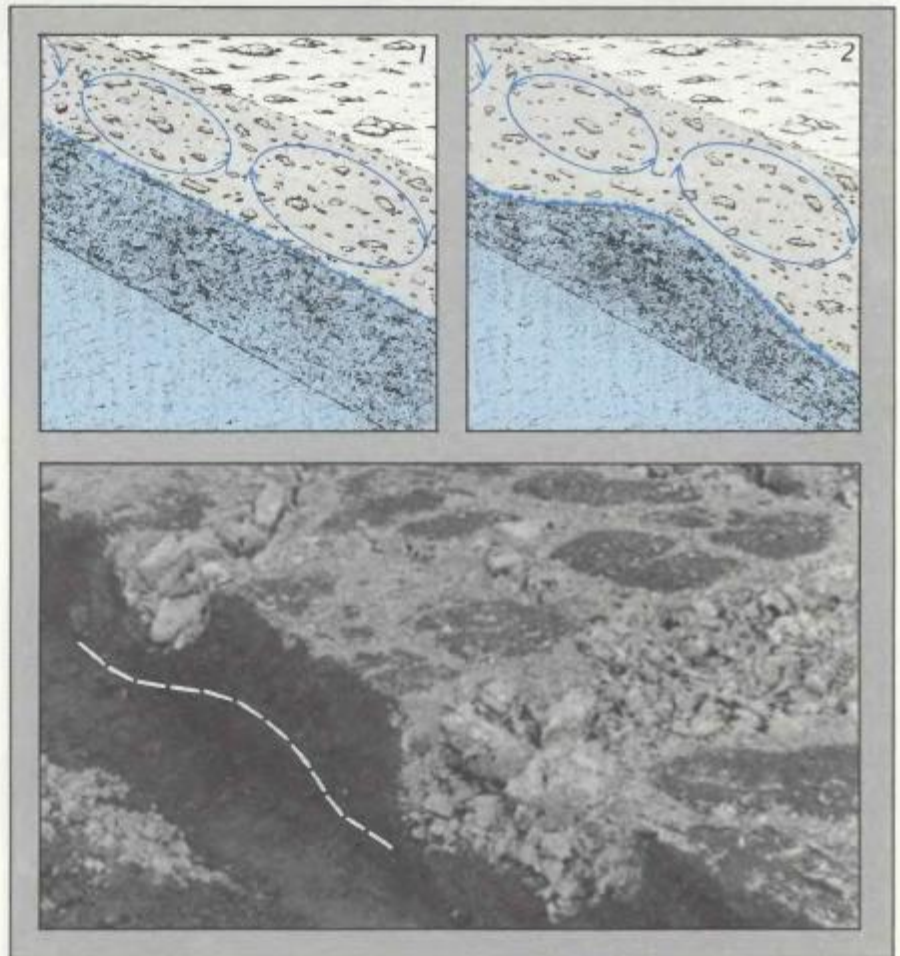
Следовательно, как только лед покрывается водой, температура которой близка к точке заморозания, конвекция становится возможной. Именно такова ситуация в протаивающем грунте. Более плотная вода опускается до фронта таяния, охлаждается до  $0^{\circ}$  и вновь поднимается, в результате чего формируются конвективные ячейки с непрерывной циркуляцией.

С картиной свободной конвекции и связан предлагаемый нами механизм, согласно которому циркуляция происходит в толще, расположенной над фронтом таяния. Есть основания полагать, что конвекция может, подобно скульптору, лепить фигуры из мерзлого грунта, находящегося под оттаявшим слоем. Во время таяния нисходящий поток теплой воды плавит нижележащий лед, а поднимающаяся холодная вода задерживает плавление. Поэтому фронт таяния будет сморщиваться и приобретет конфигурацию, отражающую форму конвективной ячейки. Как мы теперь знаем, заметная «гофрировка» фронта может возникнуть даже в продолжении одного оттаивания.

После того как структура конвективной ячейки «отпечаталась» на фронте таяния, в воспроизведении образовавшейся конфигурации на земной поверхности могут принять участие другие геофизические процессы. Например, камни могут выталкиваться в ложбинки гофрированного фронта таяния в результате «вымораживания» — миграции фронта таяния вверх во время заморозания. После этого камни вытягиваются на земную поверхность под действием одного явления, хорошо знакомого многим земледельцам, а именно морозного «вспучивания», которое приводит к



**РЕЛИКТОВЫЕ ПОЛОСЫ** в Скалистых горах (шт. Колорадо) сохраняются, вероятно, уже в течение тысяч лет. Возраст этих реликтовых образований можно установить по росту лишайников, углеродному датированию и анализу пыльцы. Как показали авторы, встречающиеся на склонах каменные полосы могут возникать, когда сила тяжести заставляет удлиняться ячейки конвекции, происходящей в ниже лежащей почве.



**СВОБОДНАЯ КОНВЕКЦИЯ** определяет геометрию структурного грунта. Циркуляция воды в конвективных ячейках (стрелки) может возникать, когда замерзший грунт начинает оттаивать (1); форма ячеек зависит от геологического строения местности. Поток воды заставляет замерзший «фронт таяния» (синяя пунктирная линия) сморщиваться в соответствии с формой ячейки (2). Благодаря другим процессам, например морозному «вспучиванию», возникшая таким образом гофрировка «воспроизводится» на поверхности земли. В траншее, пересекающей каменный многоугольник (внизу), видно, что эта структура охватывает довольно толстый слой грунта.



**ПОДВОДНЫЕ ФОРМЫ** структурного грунта встречаются только там, где глубина воды невелика и промерзание распространяется в толщу дна. Оба изображенных здесь озера находятся в Амфитеатровых горах на Аляске. На верхнем снимке видны каменные ямки вблизи береговой линии; фотография каменных многоугольников, сделанная с самолета, позволяет установить, что эти образования окаймляют озеро, располагаясь на мелководье.

тому, что поле буквально «зарастает» камнями. Во время мороза камни перемещаются вверх, а почва заполняет пространство под ними, поэтому после оттаивания почвы они уже не могут осесть на прежние места.

«Воспроизведение» структуры фронта таяния может осуществляться и с участием криостатического давления. Это давление возникает в процессе промерзания, когда опускающийся «фронт замерзания» приближается к гофрированной поверхности фронта таяния, захватывая воду, находящуюся в ложбинках последнего. Давление может вызвать растрескивание земной поверхности или вспучивание почвы, в результате чего возникнет узор, отражающий нижележащую гофрировку. Камни, попадающие в трещины или собирающиеся вокруг вспученной почвы, делают образовавшийся узор более четким. Изменяя степень дренажа и экспозиции, трещины и поднятия могут также вызвать изменения поверхностного покрова (например, растительности).

Вопрос о том, в какой степени эти и другие механизмы действительно осуществляют воспроизведение картины гофрированного фронта таяния на поверхности земли, служит сейчас предметом активных геоморфологических исследований. К настоящему времени, основываясь на модели свободной конвекции, мы провели математические расчеты, которые предсказывают существование нескольких форм структурного грунта: полосы, кольца и различные полигональные формы.

Наиболее пригодным наш анализ оказался для описания таких образований структурного грунта, которые имеют форму многоугольников и полос. Нам удалось количественно объяснить, почему шестиугольные формы преимущественно образуются в горизонтально однородном грунте с почти плоской поверхностью, где ячейки могут возникать в виде непрерывной сетки. Там, где в грунте имеются какие-либо неоднородности (скажем, изменяются свойства почвы) или барьеры (типа выступающих коренных пород), шестиугольники встречаются попеременно с другими полигональными формами.

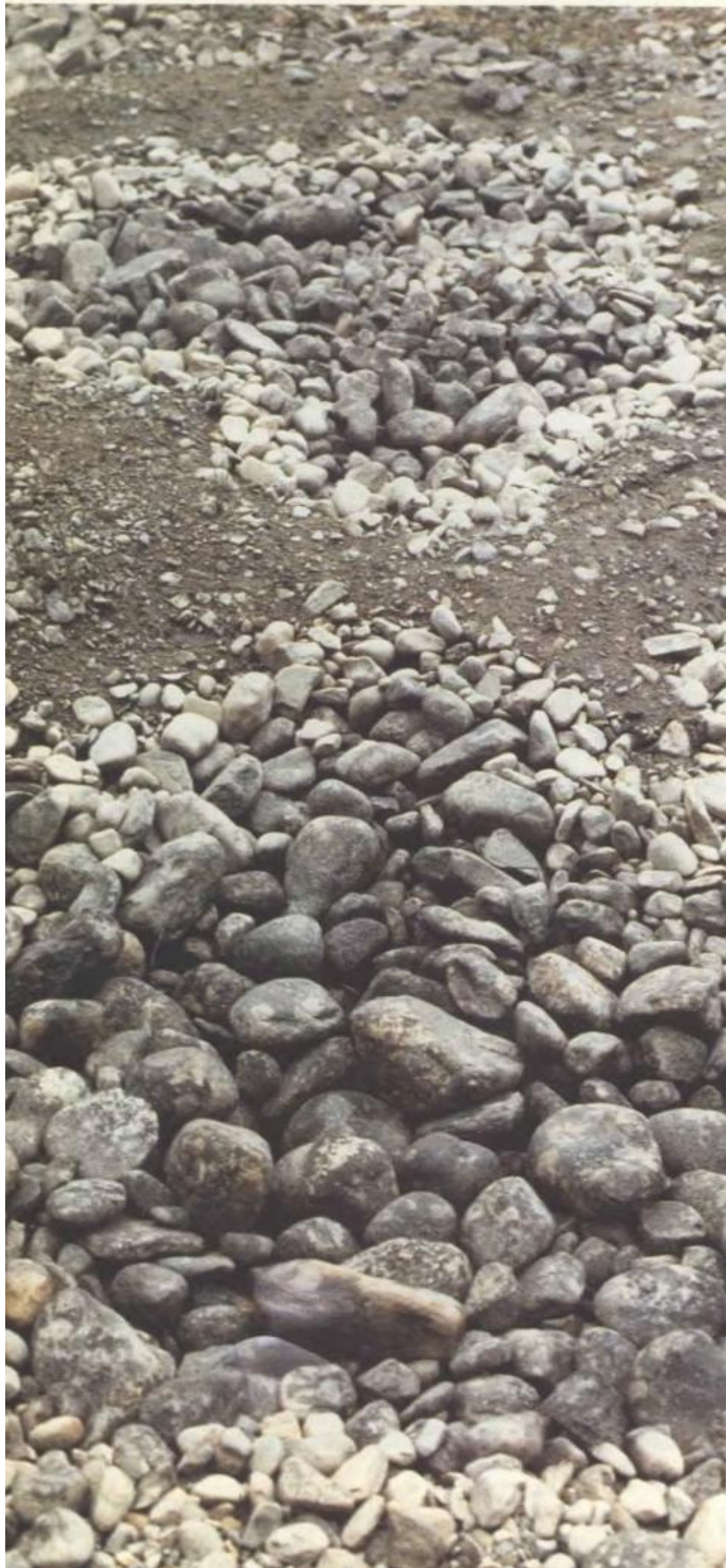
Конвекционная модель объясняет также причину образования не столь часто встречающихся каменных ямок, которые в каком-то смысле «обратны» каменным многоугольникам. Если каменные многоугольники соответствуют соединенным друг с другом полигональными ложбинам фронта таяния, то каменные ямки отражают существование сетки полигональных гребней. В процессе конвек-



*ТОПОГРАФИЧЕСКИЕ ФОРМЫ, такие как поле земляных бугров в Исландии (вверху), — по-видимому, наиболее распространенные примеры структурного грунта в арктических и субарктических районах. Происхождение топографических форм не до конца понятно, но упорядоченный характер бугров и тот факт, что на склонах они вытягиваются в полосы (внизу), позволяют предполагать, что в их образовании может играть роль конвекция.*



*ЗАТОПЛЕННЫЕ МНОГОУГОЛЬНИКИ вблизи Крейзи-Нотч на юге центральной части Аляски имеют в диаметре 1,5 м. Такие структуры возникают, когда вода течет вверх в центре полигональной ячейки свободной конвекции. Конвективные потоки, приводящие к образованию затопленных форм структурного грунта, циркулируют в ложе озера и проникают в толщу воды.*



тивной циркуляции потоки, приводящие к появлению каменных многоугольников, поднимаются в центре ячейки, а опускаются по ее границам; каменные же ямки отражают существование такой циркуляции, при которой в центре имеется нисходящий поток, а вдоль границ — восходящий. Исходя из свойств почвы, мы можем предсказать направление циркуляции.

Далее, прогнозы, даваемые нашей моделью, совместимы с тем известным из наблюдений фактом, что полосчатые формы структурного грунта появляются на наклонных поверхностях. В таких местах подземный дренаж будет способствовать формированию конвективных ячеек в виде продольных валов и спиралей, приводящих к возникновению полос грунта. Наблюдаемые на дне озер структуры также согласуются с нашей моделью. Они образуются только в неглубоких водосемах, где промерзание захватывает дно.

С помощью нашей модели мы определили, каким должно быть отношение ширины структуры к толщине протаявшего слоя, и проверили полученные результаты в полевых условиях. В зависимости от геометрии системы ширина может превышать толщину в три-пять раз. В процессе циркуляции конвективные потоки, приводящие к образованию подводных многоугольников, проникают и в само озеро, и в результате, в согласии с теорией, отношение ширины образовавшейся структуры к толщине протаявшего слоя оказывается большим, чем у незатопленных многоугольников. Точно так же сезонные циклы замерзания-оттаивания формируют структуры более крупных размеров, чем те, которые возникают под действием суточных циклов.

Нам предстоит проверить нашу модель еще в нескольких областях. Например, сейчас мы выясняем, можно ли применить ее к структурам грунта, которые появляются благодаря упорядоченной топографии и в какой-то степени игнорировались теоретиками. Исследуем мы и то, в какой степени модель объясняет образование каменных колец, изображение которых помещено в начале статьи. Б. Халле из Вашингтонского университета использовал для анализа колец другую конвекционную модель, согласно ко-

*КАМЕННЫЕ ЯМКИ, встречающиеся реже, чем многоугольники, образуются в тех случаях, когда в центре полигональной ячейки свободной конвекции имеется нисходящий поток воды. Показанные здесь ямки обнаружены в Норвегии, они имеют в поперечнике около метра.*



торой в циркуляции участвует не только почвенная вода, но и сама почва. Сделанные на ее основе выводы не отличаются от выводов нашей модели.

Существующие модели не позволяют описать шаг за шагом процесс формирования структурного грунта. Однако нас подстегивает мысль о том, сколь многообразную пользу обещают результаты таких исследований. Изучая реликтовые структуры, мы сможем узнать многое о климате в далеком прошлом. Динамичные формы могли бы служить индикаторами антропогенного воздействия в полярных регионах нашей планеты. Изучение мерзлого грунта на Земле уже помогло пролить свет на эволюцию климатических условий на

Марсе, где на изображениях, полученных с космических аппаратов, обнаружены такие структуры, как кольцевые борозды, полигональные трещины и мерзлотные образования.

Но даже если законченная теория формирования структурного грунта и будет построена, предмет изучения, по всей вероятности, не потеряет своей привлекательности. Изумляет не столько то, каким именно путем возникает структурный грунт, сколько сам факт его существования. То же самое можно сказать и о хорошо знакомых нам снежинках, имеющих правильную геометрическую форму. Элемент таинственности всегда будет сопровождать любое явление, которое соединяет в себе геометрическую точность с капризами случая.

вие представляют собой два проявления одного фундаментального эффекта, называемого теперь электрослабым взаимодействием.

Будущим нобелевским лауреатам предстоит дать ответ еще на один важнейший вопрос: имеют ли нейтрино массу и если да, то способно ли гравитационное притяжение мириадов нейтрино остановить бесконечное расширение нашей Вселенной.

### *Нобелевская премия за 1988 г. по химии*

**С**НАЧАЛА был свет, точнее — солнечный свет. Он проливается на Землю и растет трава, скот поедает траву, а человек поедает скот. Вся жизнь в конечном счете зависит от фотосинтеза. Но до недавнего времени механизм этого процесса оставался неясным.

За определение пространственной структуры комплекса белков, служащих аппаратом фотосинтеза у некоторых бактерий, Йохан Дайзенхофер из Медицинского института им. Говарда Хьюза, Роберт Хубер из Института биохимии им. Макса Планка и Хармут Михель из Института биофизики им. Макса Планка (ФРГ) получили Нобелевскую премию за 1988 г. по химии.

В бактериальной клетке белковый комплекс, осуществляющий фотосинтез, располагается в наружной клеточной мембране так, что выступает и наружу, и во внутриклеточное пространство. Такие, как их называют, интегральные мембранные белки играют роль во многих биологических процессах, включающих перенос энергии через оболочку клетки. Структуру этих белков установить до сих пор не удавалось, так как их очень трудно получить в кристаллическом виде, что необходимо для исследования методом рентгеновской кристаллографии.

В 1982 г. Михель добился того, что многие считали невозможным: он вырастил кристаллы интегрального мембранного белка, осуществляющего фотосинтез у бактерий, называемых родопсевдомонадами. В течение последующих трех лет Хубер и Дайзенхофер (который в то время тоже работал в Институте биохимии им. Макса Планка) исследовали эти кристаллы рентгенографически. В результате было определено положение всех примерно 10 тыс. атомов белкового комплекса. Эти данные проясняют также механизм фотосинтеза у растений и могут быть использованы для исследований роли интегральных белков в развитии диабета, рака и других заболеваний.

## *Наука и общество*

### *Нобелевская премия за 1988 г. по физике*

**В** 1960 г. Джон Апдайк писал в своем стихотворении «Космическое нахальство»: «...они падают на Землю/ как «безболезненные» гильотины/ сквозь наши головы в траву./ Средь ночи падают в Непале,/ пронзая влюбленных — вы называете/ их чудесными, а я считаю — они проходимцы».

Речь идет о нейтрино — призрачных частицах, играющих огромную роль в современной физике. Их существование было предсказано теоретически Вольфгангом Паули в 1931 г. Он предположил, что именно присутствие этих невидимых частиц обуславливает нарушение закона сохранения энергии при бета-распаде радиоактивных элементов. Вскоре Энрико Ферми предложил для них название «нейтрино». И наконец, в 1956 г. Ф. Райнс и К. Коуэн экспериментально подтвердили существование по крайней мере одного типа нейтрино, связанного с электроном.

Однако ко времени публикации этого стихотворения теоретики начали все сильнее ощущать неудовлетворенность в понимании так называемого слабого ядерного взаимодействия, ответственного за бета-распад. Некоторые ученые высказывали предположение об участии в нем нейтрино нескольких типов. Это можно было выяснить только с помощью эксперимента с пучками нейтрино высоких энергий, однако никто не знал, как его осуществить. Именно за решение этой задачи Леон Ледерман из Нацио-

нальной ускорительной лаборатории им. Ферми, Мервин Шварц из Digital Pathways, Inc. и Джек Штейнбергер из Европейской организации ядерных исследований (ЦЕРН) получили Нобелевскую премию по физике за 1988 г.

В начале 60-х годов они работали в Колумбийском университете и использовали для эксперимента ускоритель Брукхейвенской национальной лаборатории. В ходе эксперимента пучок ускоренных протонов направлялся на мишень из бериллия; при столкновении протонов с мишенью рождался мощный пучок частиц; некоторые из них почти мгновенно распадалась, превращаясь в нейтрино. На пути пучка была установлена стена толщиной примерно 13,5 м (сделанная из стальных пластин, снятых с американских военных кораблей), которая задерживала все частицы, кроме нейтрино; последние беспрепятственно проходили сквозь стену и попадали на детектор.

В течение восьми месяцев в 1961—1962 гг. на этом ускорителе было запущено примерно 100 млрд. нейтрино, детектор же зарегистрировал только 51 частицу. Однако этого оказалось достаточно, чтобы подтвердить существование двух типов нейтрино — электронного и мюонного; последнее связано с более тяжелой отрицательно заряженной частицей — мюоном (см. статью: L. Lederman. Two-Neutrino Experiment, «Scientific American», March, 1963). Это и другие открытия, сделанные в более поздних экспериментах с нейтринными пучками, навели теоретиков на мысль о том, что слабое ядерное взаимодействие и электромагнитное взаимодей-

# Оплодотворение у млекопитающих

*Непосредственно перед слиянием сперматозоида с яйцеклеткой и сразу после него происходит определенная цепь событий. Оказалось, что на многих этапах этого процесса важнейшую роль играет одно и то же вещество*

ПОЛ М. ВАСАРМАН

ПРОШЛО уже более ста лет с тех пор как швейцарский зоолог Герман Фоль впервые увидел в микроскоп, как сперматозоид проникает в яйцеклетку, оплодотворяет ее и возникает исходная клетка нового организма. Еще в прошлом веке стали известны многие из этапов процесса оплодотворения, представляющего собой определенный ряд событий, с неизбежностью следующих одно за другим, — от первоначального контакта сперматозоида с яйцеклеткой до их слияния. Интенсивно изучались и те процессы, которые происходят сразу после оплодотворения. Как и в работах Фоля, наблюдавшего оплодотворение яйцеклетки морской звезды, объектом исследований служили в основном морские беспозвоночные. Обусловлено это было прежде всего тем, что яйцеклетки таких животных (в отличие от яйцеклеток млекопитающих) оплодотворяются вне тела самки, в морской воде, т. е. в условиях, которые легко можно воспроизвести в лаборатории (см. статью: D. Epel. The Program of Fertilization, «Scientific American», November, 1977).

В конце 1950-х годов были разработаны такие условия культивирования яйцеклеток млекопитающих, в которых могут происходить их оплодотворение и самые ранние этапы развития, что позволило приступить к детальному изучению взаимодействия сперматозоидов и яйцеклеток у этих животных. Удалось прояснить не только основные события оплодотворения у млекопитающих, но и молекулярные механизмы, лежащие в их основе.

Недавно мои коллеги и я выявили и охарактеризовали молекулярные компоненты внешней оболочки яйцеклетки мыши, служащие рецепторами для сперматозоидов. Мы обнаружили, что эти рецепторные молекулы играют важную роль во многих процессах, происходящих в ходе оплодотворения и тотчас после него. Ис-

следования рецепторов и других молекул, участвующих в оплодотворении у мышей и прочих млекопитающих, послужат основой для биохимического изучения размножения человека. Эти исследования могут привести к созданию новых противозачаточных средств и методов лечения бесплодия.

**Я**ЙЦЕКЛЕТКИ человека недоступны в таких количествах, которые необходимы для исследований на молекулярном уровне, и поэтому объектом для изучения мы выбрали мышей. Процесс оплодотворения у мышей во многом такой же, как у людей и других млекопитающих. Он начинается с того, что множество сперматозоидов прикрепляется вначале слабо, а затем прочно к рецепторам на поверхности оболочки яйцеклетки. Эта довольно толстая оболочка называется «блестящей» или *zona pellucida*. Каждый сперматозоид имеет на своей поверхности множество белков, узнающих соответствующие рецепторы яйцеклетки. Как ключ подходит к замку, так и определенные участки этих белков взаимодействуют с комплементарными участками рецепторных молекул.

Как правило, связывание сперматозоида с яйцеклеткой видоспецифично, т. е. ее рецепторы узнают сперматозоиды особой только того же вида. Способность мужских и женских половых клеток одного вида узнавать друг друга — это общее свойство процесса оплодотворения у всех организмов как животных, так и растительных. Тому есть веские основания. Лабораторные исследования показали, что за редким исключением (таким, как эмбрионы мула, возникающие при спаривании осла с лошадью) зародыши, возникающие в результате межвидового оплодотворения, не могут развиваться нормально.

Вслед за прикреплением сперматозоидов к *zona pellucida* у них развивается так называемая акросомная реак-

ция. Акросома представляет собой органеллу, богатую различными ферментами и расположенную на переднем конце головки сперматозоида непосредственно под плазматической мембраной, окружающей головку. В ходе акросомной реакции передние две трети плазматической мембраны сливаются с передней частью мембраны акросомы. При этом образуются маленькие пузырьки, состоящие из плазматической мембраны сперматозоида и мембраны акросомы. Эти гибридные пузырьки в конце концов исчезают и *zona pellucida* оказывается в контакте с акросомными ферментами, отгороженными от сперматозоида задней частью акросомной мембраны. Ферменты разрушают оболочку яйцеклетки и сперматозоид проходит через нее.

Один из множества продвигающихся к яйцеклетке сперматозоидов достигает так называемого перивителлинового пространства — тонкого слоя, расположенного между *zona pellucida* и плазматической мембраной яйцеклетки. Затем происходит оплодотворение: сперматозоид сливается с мембраной яйцеклетки, отцовский генетический материал объединяется с материнским и начинается развитие образовавшегося зародыша. Слияние вызывает также серию реакций, в результате которых в течение нескольких секунд изменяются свойства плазматической мембраны, а за несколько минут в ходе реакции, называемой зонной, изменяются свойства и *zona pellucida*. Плазматическая мембрана и наружная оболочка яйцеклетки становятся невосприимчивыми к другим сперматозоидам. Изменения эти крайне важны для предотвращения полиспермии, т. е. слияния с яйцеклеткой более чем одного сперматозоида; такая ситуация летальна.

Интересно, что было время, когда *zona pellucida* рассматривалась исследователями всего лишь как помеха, препятствие для сперматозоидов, за-

трудняющее оплодотворение. Поэтому часто для проведения экспериментов с яйцеклетками млекопитающих ее предварительно удаляли. Сейчас ясно, что эта оболочка представляет собой сложную систему биологической защиты, которая из многих поступающих сперматозоидов выбирает те, которые способны к оплодотворению и последующему развитию, подготавливает сперматозоид к слиянию с яйцеклеткой, а затем предохраняет образовавшийся эмбрион от полиспермии.

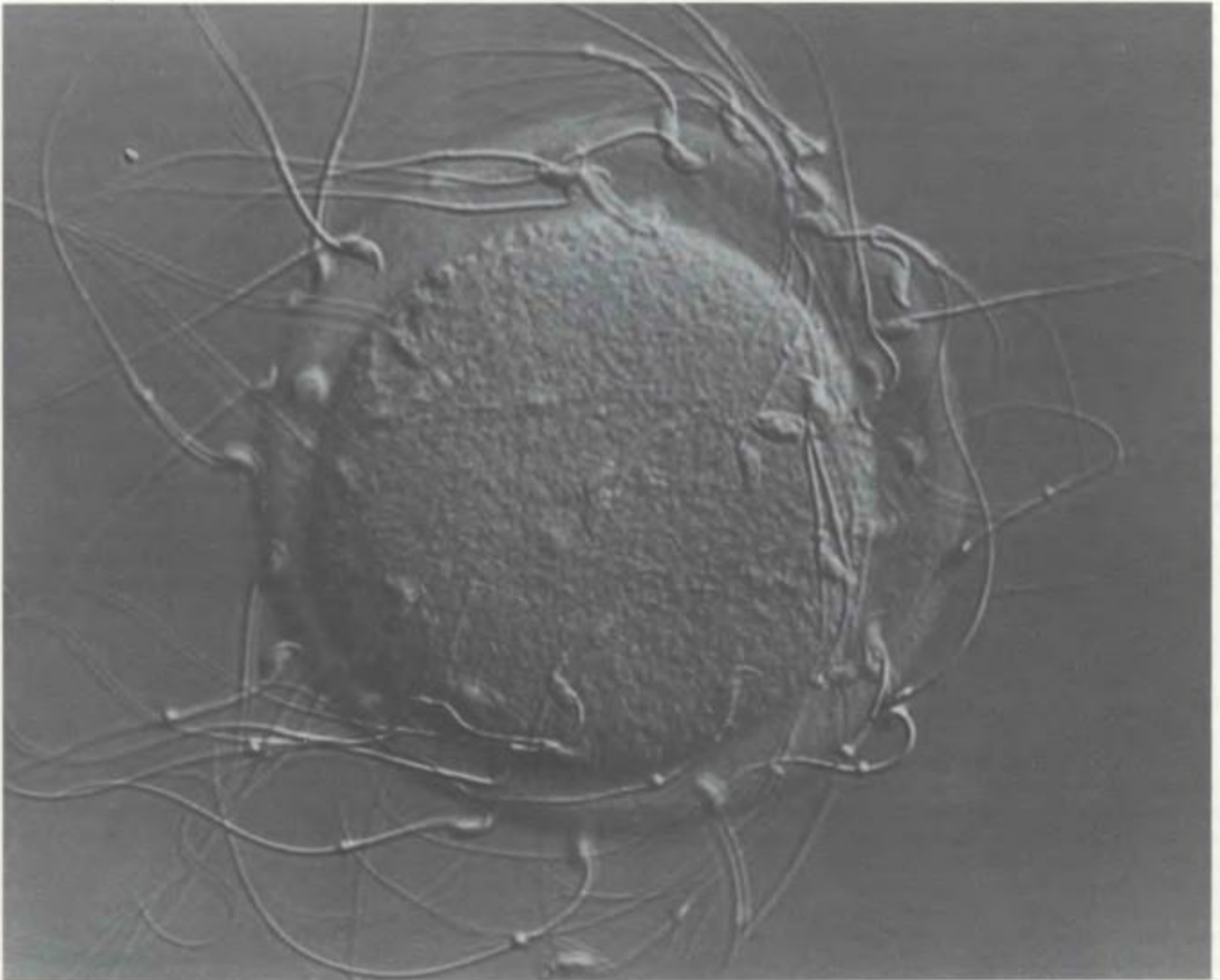
**КОГДА** около десяти лет назад мои коллеги и я начали изучать оплодотворение у млекопитающих, оставался без ответа ряд важных вопросов. Какова природа предполагаемого рецептора сперматозоидов в zona pellucida? Что индуцирует акросомную реакцию у прикрепившегося к яйцеклетке сперматозоида? В чем состоят те биохимические изменения,

которые происходят после оплодотворения и делают zona pellucida невосприимчивой к новым сперматозоидам? Оказалось, что ответы на все три вопроса связаны с одним-единственным гликопротеином — полипептидом (т. е. цепочкой из аминокислот), к которому присоединены сахарные группы.

К изучению zona pellucida мы подошли не сразу. Вначале мы пытались идентифицировать у мышей гены, которые включаются и выключаются при росте ооцитов (предшественников яйцеклеток). Представлялось вероятным, что к таким генам принадлежат гены, управляющие образованием белков, из которых построена zona pellucida. Но необходимо было вначале выделить эти белки, прежде чем можно было надеяться идентифицировать соответствующие гены.

Дж. Блейл, работавший тогда в моей лаборатории в Медицинской

школе Гарвардского университета, и я обнаружили, что у мыши zona pellucida образована тремя различными гликопротеинами, которые мы обозначили ZP1, ZP2 и ZP3. Мы мало что знали об их химической структуре, но легко могли отличать их друг от друга с помощью электрофореза в геле — стандартного метода для разделения молекул по молекулярной массе. Молекулярные массы ZP1, ZP2 и ZP3 составляли 200 000, 120 000 и 83 000 дальтон соответственно. По мере того как эти гликопротеины синтезируются и секретируются растущим ооцитом, они собираются вместе и образуют пористую оболочку, достигающую примерно 7 мкм в толщину. Оболочка яйцеклетки человека толще примерно вдвое, а у некоторых других млекопитающих даже в 4—5 раз. Мы были несколько удивлены простотой состава zona pellucida. Ведь большинство клеток млекопитающих окружены внеклеточным мат-



**МНОЖЕСТВО СПЕРМАТОЗОИДОВ** могут прикрепиться к zona pellucida — наружной оболочке неоплодотворенной яйцеклетки и проникнуть сквозь нее. Но только один из них сольется в конце концов с тонкой плазматической мем-

браной, окружающей собственно яйцеклетку (*внутренний шар*) и оплодотворит ее, в результате чего возникнет зародыш. Эта микрофотография сперматозоидов и яйцеклетки мыши получена автором статьи. Увеличение  $\times 1000$  раз.

риком, который устроен гораздо сложнее и включает в себя много различных белков. Впоследствии наши данные подтвердились во многих работах: *zona pellucida* у всех исследованных на этот предмет млекопитающих, в том числе у человека, состоит из небольшого числа гликопротеинов.

Эта простота состава побудила нас изменить направление исследований. Можно было предполагать, что один из трех гликопротеинов *zona pellucida* представляет собой рецептор сперматозоидов. Сначала, однако, надо было показать, что наружная оболочка яйцеклетки действительно содержит рецепторы сперматозоидов. С этой целью мы предприняли эксперименты по так называемому конкурентному ингибированию. Из неоплодотворенных яйцеклеток выделяли оболочку и растворяли ее в слабокислой среде, так чтобы все гликопротеины, — не только поверхностные, но и расположенные во внутренних слоях *zona pellucida* могли бы взаимодействовать со сперматозоидами. Раствор гликопротеинов нейтрализовали и добавляли его к сперме мыши. Затем сперматозоиды отделяли и инкубировали с неоплодотворенными мышинными яйцеклетками в условиях, способствующих оплодотворению и развитию.

Мы исходили из предположения, что если полученный раствор *zona pellucida* содержит рецепторы сперматозоидов, то они свяжутся с узнающими яйцеклетку белками на самих сперматозоидах, образуя комплексы. Образование комплексов приведет к тому, что эти белки уже не смогут взаимодействовать с *zona pellucida* неоплодотворенных яйцеклеток на последней стадии эксперимента и их оплодотворение не произойдет. Иными словами, растворенные свободные рецепторы должны успешно конкурировать с такими же рецепторами на яйцеклетках. Если же раствор *zona pellucida* не содержит рецепторов, то он никак не повлияет на способность сперматозоидов к нормальному связыванию и оплодотворению яйцеклеток.

Оказалось, что обработанные таким образом сперматозоиды не могут связываться с яйцеклетками и оплодотворять их, а значит, *zona pellucida* яйцеклетки мыши действительно содержит рецепторы сперматозоидов. Напротив, растворы *zona pellucida*, выделенные не из неоплодотворенных яйцеклеток, а из одноклеточных эмбрионов, не препятствовали ни связыванию сперматозоидов с яйцеклетками, ни оплодотворению; по всей видимости, оболочки эмбриона не содержат рецепторов для спер-

матозоидов. Этот результат хорошо согласовывался с тем, что сперматозоиды не могут связываться с оплодотворенной яйцеклеткой (т. е. одноклеточным эмбрионом) и проникать через ее оболочку. Отсюда можно было сделать также вывод, что невосприимчивость оболочки яйцеклетки к сперматозоидам после оплодотворения по крайней мере отчасти обусловлена изменением рецепторов, мешающим их способности к связыванию со сперматозоидами.

**УБЕДИВШИСЬ**, что *zona pellucida* действительно содержит рецепторы сперматозоидов, мы стали выяснять, какой из трех гликопротеинов служит рецептором и какие изменения делают его неспособным узнавать сперматозоиды. На первый вопрос удалось ответить довольно быстро. Мы получили в чистом виде ZP1, ZP2 и ZP3 из неоплодотворенных яйцеклеток и из одноклеточных эмбрионов и проверили каждый из них на способность к конкурентному ингибированию. Эти эксперименты показали, что связывание сперматозоидов с яйцеклетками подавляется только в том случае, если сперму обрабатывали ZP3, выделенным из неоплодотворенных яйцеклеток, ZP1 и ZP2 не оказывали никакого влияния. Неактивен был и ZP3, выделенный из одноклеточных эмбрионов. Более того, очищенный ZP3 был так же эффективен в подавлении связывания, как и раствор всех гликопротеинов *zona pellucida*; значит, именно ZP3 был ответствен за подавление связывания в первоначальных опытах по конкурентному ингибированию. Таким образом, рецептором сперматозоидов оказался ZP3.

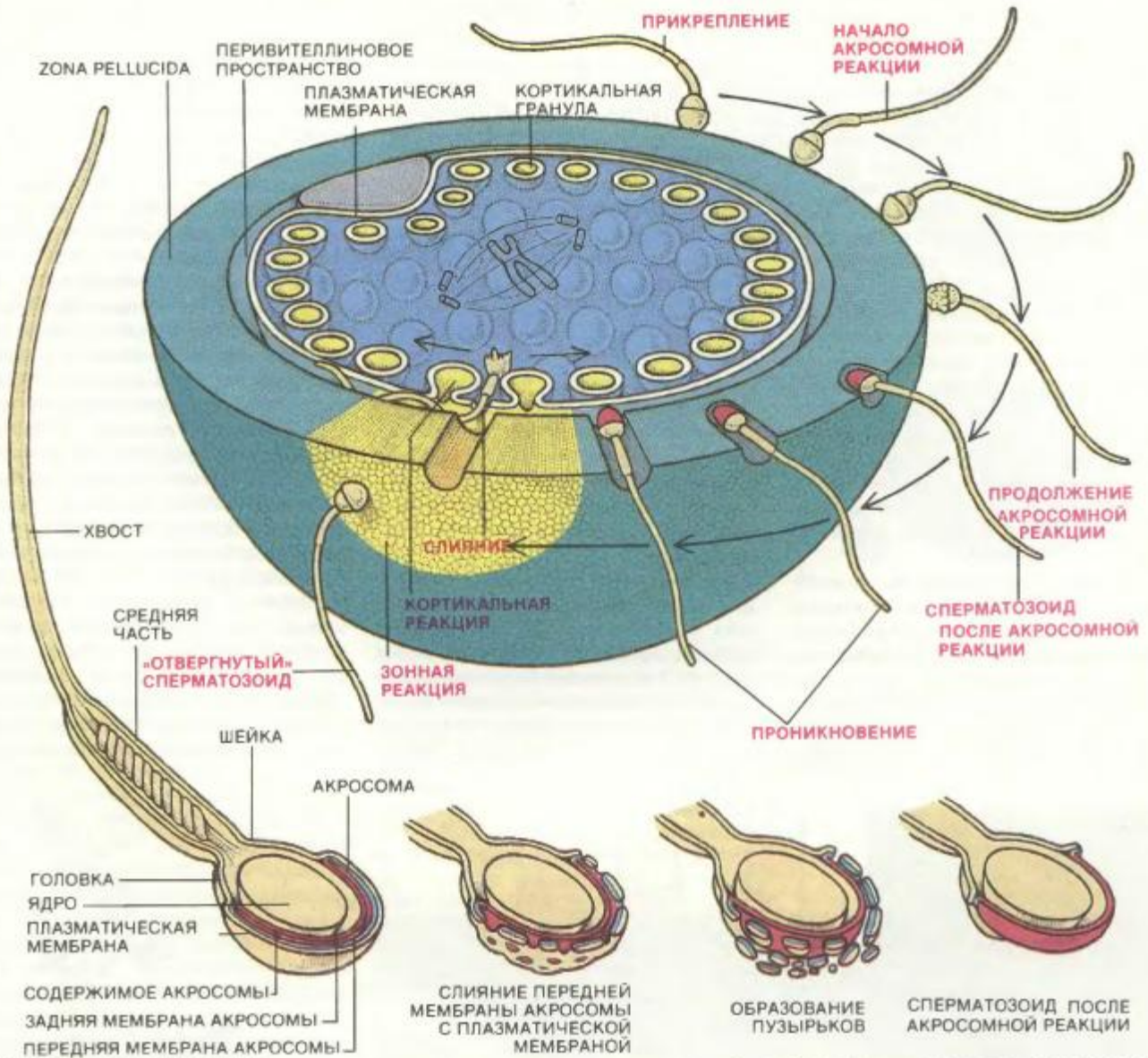
Мы сравнили ZP3 из неоплодотворенных яйцеклеток и ZP3 из эмбрионов методом электрофореза в геле, но таким способом различий между ними обнаружить не удалось, хотя один белок активен как рецептор, а другой — нет. Оставалось предположить, что инактивация рецептора после оплодотворения вызвана очень небольшим химическим изменением. Стало быть, для того чтобы понять, как происходит инактивация, следовало подробно изучить строение рецепторной молекулы, а на это нужно много времени. Пока же велась работа в других направлениях. Так, мы продолжали собирать свидетельства того, что ZP3 яйцеклетки является рецептором сперматозоидов. Кроме того, хотелось выяснить, играет ли какую-нибудь роль ZP3 в акросомной реакции.

В одной из работ, посвященных детализации роли ZP3 в качестве рецептора, использовались наблюде-

ния, сделанные сотрудниками нашей лаборатории в Гарварде и Б. Стори с коллегами в Пенсильванском университете. Они обнаружили, что с внешней оболочкой яйцеклетки могут связываться только сперматозоиды с интактной акросомой, а к следующему шагу — проникновению внутрь оболочки — способны только те из них, у которых произошла акросомная реакция. Это позволило нам предположить, что, коль скоро ZP3 является рецептором сперматозоидов, он узнает лишь те, которые имеют интактную акросому, и не взаимодействует с ними после акросомной реакции. Притом ZP3 должен узнавать только головку сперматозоида, которая как раз и связывается с *zona pellucida*, и не реагировать с хвостом или средней частью клетки.

Способность ZP3 различать сперматозоиды с интактной и с прореагировавшей акросомой и узнавать определенные участки сперматозоида мы изучали с помощью метода радиоавтографии, пометив очищенный ZP3 радиоактивным изотопом и регистрируя радиоактивность этих молекул на фотопленке. Полученные данные показали, что ZP3, как и ожидалось, связывается только со сперматозоидами, имеющими интактную акросому, причем только с их головками. В этих экспериментах было также установлено, что каждый сперматозоид с интактной акросомой может связывать 10 000—50 000 молекул ZP3. Если принять во внимание, что у млекопитающих сперматозоиды обладают высокой подвижностью, то, вероятно, десятки тысяч рецепторов требуются для того, чтобы прочно прикрепить сперматозоид к поверхности яйцеклетки.

Блейл и я пытались также выяснить механизм индукции акросомной реакции. Представлялось вполне возможным, что после прикрепления сперматозоида к ZP3 акросомная реакция индуцируется другими гликопротеинами *zona pellucida*, например ZP1 или ZP2. Чтобы проверить это, к сперматозоидам с интактной акросомой добавляли по отдельности каждый из гликопротеинов *zona pellucida* мышинной яйцеклетки и наблюдали, что происходит при этом со сперматозоидами. Оказалось, что акросомную реакцию *in vitro* вызывает только ZP3, т. е. именно он является природным индуктором. Ни ZP1, ни ZP2 не оказывали такого действия. Индуцирующей активностью не обладал и ZP3, выделенный из эмбрионов. Очевидно, после оплодотворения ZP3 теряет свою способность индуцировать акросомную реакцию, так же как и способность связываться со сперматозоидами. Каков механизм индук-



ПРОЦЕСС ОПЛОДОТВОРЕНИЯ состоит из ряда этапов, совершающихся в определенной последовательности. После прикрепления сперматозоида к zona pellucida (зеленая) яйцеклетки начинается акросомная реакция (внизу). Передняя мембрана (голубая) акросомы — богатой ферментами органеллы, расположенной в передней части головки сперматозоида, — сливается с плазматической мембраной сперматозоида. Слившиеся мембраны образуют пузырьки, которые через какое-то время исчезают и акросомные ферменты выходят наружу. Они локально разрушают zona pellucida, что позволяет сперматозоиду продвигаться к яйцеклетке. В конце концов сперматозоид сливается с ее

плазматической мембраной и происходит оплодотворение. Это вызывает кортикальную и зонную реакции. Вначале кортикальные гранулы, расположенные в цитоплазме яйцеклетки, выделяют свое содержимое (желтое), в том числе ферменты, в zona pellucida. Эта реакция начинается в месте слияния сперматозоида с яйцеклеткой и продолжается во все стороны по ее поверхности. Затем в ходе зонной реакции ферменты кортикальных гранул модифицируют zona pellucida, в результате чего она становится непроницаемой для сперматозоидов; это защищает яйцеклетку от полиспермии, т. е. оплодотворения многими сперматозоидами сразу, что губительно для нее.

шии акросомной реакции при связывании сперматозоидов с ZP3 яйцеклетки, пока не ясно. По некоторым данным, связывание приводит к повышению проницаемости плазматической мембраны сперматозоида для ионов кальция, что способствует слиянию плазматической мембраны с мембраной акросомы.

Обнаружение того факта, что ZP3 выполняет две важные функции — связывание сперматозоидов и индукцию акросомной реакции — было приятным сюрпризом. У морских

ежей и других морских беспозвоночных ситуация совершенно иная: у них эти функции разделены между двумя различными молекулами. Яйцеклетки этих животных имеют две оболочки: толстый студнеобразный внешний слой и гораздо более тонкий внутренний слой, называемый желточной оболочкой. Акросомную реакцию индуцирует углеводная молекула в студенистой оболочке, а за видоспецифичное связывание сперматозоидов ответствен гликопротеин желточной оболочки.

ИТАК, мы установили, что ZP3 может связываться со сперматозоидами и индуцировать акросомную реакцию, но осталось неизвестным, как конкретно это происходит. Выяснение механизма стало следующей целью нашей работы. Казалось также важным распределение ZP3 в оболочке яйцеклетки, в частности, достаточное ли их количество находится на ее поверхности для обеспечения тех десятков тысяч связей, которые, как мы считали, необходимы для удержания сперматозоида.

Дж. Грив, работавший в то время в моей лаборатории в Гарварде, и я обнаружили, что zona pellucida состоит из длинных, соединенных друг с другом нитей толщиной около 7 нм. Позже, работая в Институте молекулярной биологии Роша в Натли (шт. Нью-Джерси), мы установили, что основной строительный блок этих нитей представляет собой комплекс двух молекул — ZP2 и ZP3, который в каждой нити повторен сотни раз. Соединены нити между собой посредством ZP1, молекула которого образована двумя идентичными полипептидными цепями, скрепленными дисульфидными связями. Благодаря такому строению нитей на поверхности zona pellucida расположены десятки миллионов молекул ZP3, что более чем достаточно для прочного связывания множества сперматозоидов.

Изучение молекулярных взаимодействий, обеспечивающих связывание ZP3 со сперматозоидами и инициацию акросомной реакции, началось с выяснения химической структуры этой молекулы. Эти исследования вели в моей лаборатории в Гарварде Дж. Грив, Р. Роллер и Дж. Зальц-

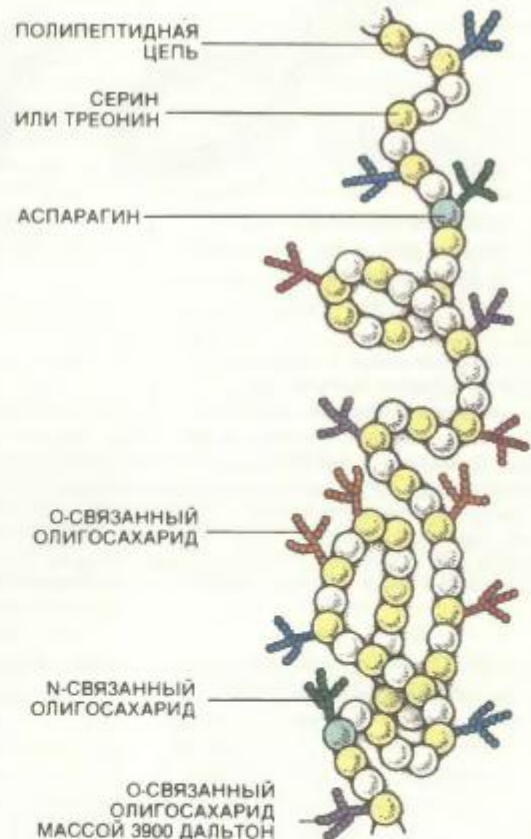
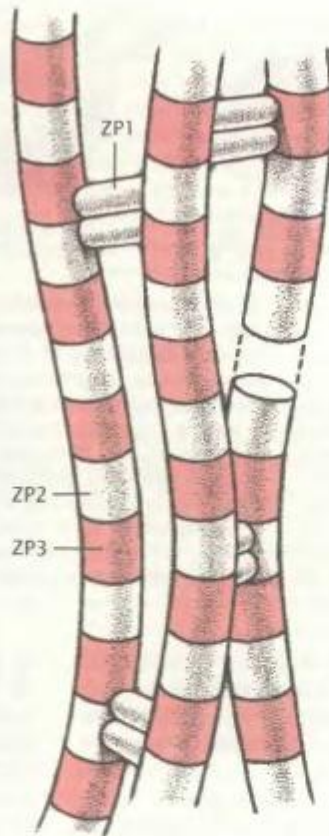
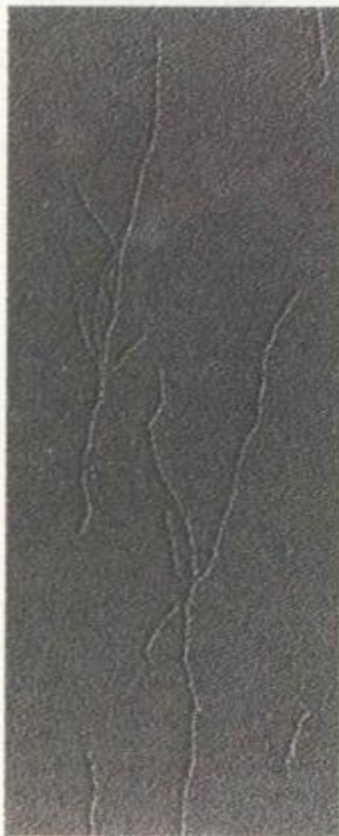
ман. Их работа не могла сразу выявить те особенности строения ZP3, которые существенны для его рецепторной функции, но создала хорошую основу для дальнейших исследований.

Было установлено, что полипептидная цепь ZP3 состоит примерно из 400 аминокислотных остатков. К полипептиду присоединено множество олигосахаридных «ветвей», каждая из которых представляет собой короткую цепь из остатков простых сахаров. Три или четыре из этих ветвей являются N-связанными: они присоединены к атому азота в аминокислоте аспарагине. Гораздо большее число олигосахаридов являются O-связанными: они соединены с атомом кислорода серина или треонина. Олигосахаридный состав ZP3 варьирует, и разные молекулы ZP3 могут иметь различную последовательность олигосахаридов.

Вскоре, после того как сотрудником моей лаборатории в Гарварде стал Г. Флормен, мы предприняли попытку выяснить, какая часть молекулы ZP3 ответственна за его рецепторную активность — полипептидная цепь или олигосахариды. У многих рецепторов, роль которых часто

играют белковые молекулы, способность связывать комплементарный белок определяется трехмерной структурой рецептора. Пространственная организация ZP3 была неизвестна, но мы знали, как изменить ее. Тем самым открывалась возможность выяснить, важна ли форма ZP3 для его способности взаимодействовать с узнающими яйцеклетку белками сперматозоидов.

Мы с удивлением обнаружили, что инкубация ZP3 с агентами, разворачивающими полипептидный остов молекулы, не сказывается на его взаимодействии со сперматозоидами. Такой результат свидетельствовал, что пространственная структура ZP3 несущественна для рецепторной функции. Чтобы проверить это, мы разрезали молекулы ZP3 на маленькие гликопептиды с помощью фермента, называемого проназой, который разрезает полипептидную цепь более или менее случайно. С полученными гликопептидами провели опыты по конкурентному ингибированию. Сперматозоиды обрабатывали смесью гликопептидов и затем инкубировали с неоплодотворенными яйцеклетками. Оказалось, что гликопептиды, несмотря на



МОЛЕКУЛЫ ZP3 — основной компонент нитей (слева), из которых построена zona pellucida яйцеклетки. ZP3 представляет собой гликопротеин, т. е. полипептид с присоединенными к нему цепочками из остатков сахаров. Нити (в центре) образованы множеством комплексов ZP3 с другим гликопротеином, ZP2. Третий гликопротеин, ZP1, соединяет нити друг с другом. Молекула ZP3 (справа) служит

рецептором сперматозоидов, а также индуцирует акросомную реакцию. Основную роль в прикреплении сперматозоидов к яйцеклетке играют O-связанные олигосахариды с молекулярной массой 3900 дальтон, присоединенные к серину или треонину полипептидной цепи ZP3. Вместе с полипептидом ZP3 эти олигосахариды требуются для индукции акросомной реакции.

свои небольшие размеры, подавляли связывание сперматозоидов с яйцеклетками столь же эффективно, сколь и исходный ZP3. Этот результат полностью исключает возможность того, что для рецепторной активности ZP3 существенна его пространственная структура.

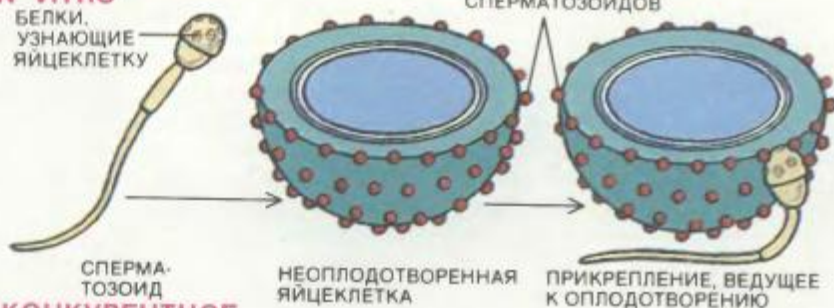
Следовало предположить, что участок связывания ZP3 со сперматозоидами расположен вне его полипептидной цепи. Чтобы убедиться в этом, мы обрабатывали ZP3 трифторметансульфоновой кислотой, которая удаляет и N- и O-связанные олигосахариды, а затем в эксперименте по конкурентному ингибированию определяли способность «оголенной» полипептидной цепи быть рецептором сперматозоидов. Как и ожидалось, инкубация сперматозоидов с белковой частью молекулы не сказывалась на их прикреплении к яйцеклеткам: сам по себе полипептид не обладал рецепторной активностью. Если же обработать гликопротеин ферментом эндогликозидазой F, удаляются N-связанные олигосахариды, а O-связанные остаются на своем месте. Оказалось, что такая модифицированная форма ZP3 полностью сохраняет рецепторную активность.

На основании всех этих результатов можно было сделать вывод, что для связывания сперматозоидов с зона pellucida яйцеклетки наиболее существенны O-связанные олигосахариды ZP3. Когда эти олигосахариды удаляли с помощью слабой щелочи, ZP3 утрачивал способность связывать сперматозоиды. Более того, инкубация сперматозоидов с ничтожной концентрацией O-связанных олигосахаридов, отщепленных от ZP3, предотвращала их связывание с яйцеклетками и оплодотворение. Итак, элементами, связывающимися со сперматозоидами, в молекуле ZP3 являются O-связанные олигосахариды.

Однако рецепторной активностью обладают, как выяснилось, не все O-связанные олигосахариды ZP3. Мы разделяли олигосахариды ZP3 по размеру, смешивали их со сперматозоидами либо по отдельности, либо все вместе и определяли, какие из них связались. Результаты этих опытов показали, что связываться со сперматозоидами может не более 10% O-связанных олигосахаридов ZP3. Молекулярная масса этих олигосахаридов около 3900 дальтон.

Тот факт, что O-связанные олигосахариды участвуют во взаимодействии сперматозоидов с яйцеклеткой, дополняет ряд данных, указывающих на важность сахаров во взаимном распознавании половых клеток, и других межклеточных взаимодействиях не только у позвоночных животных, но

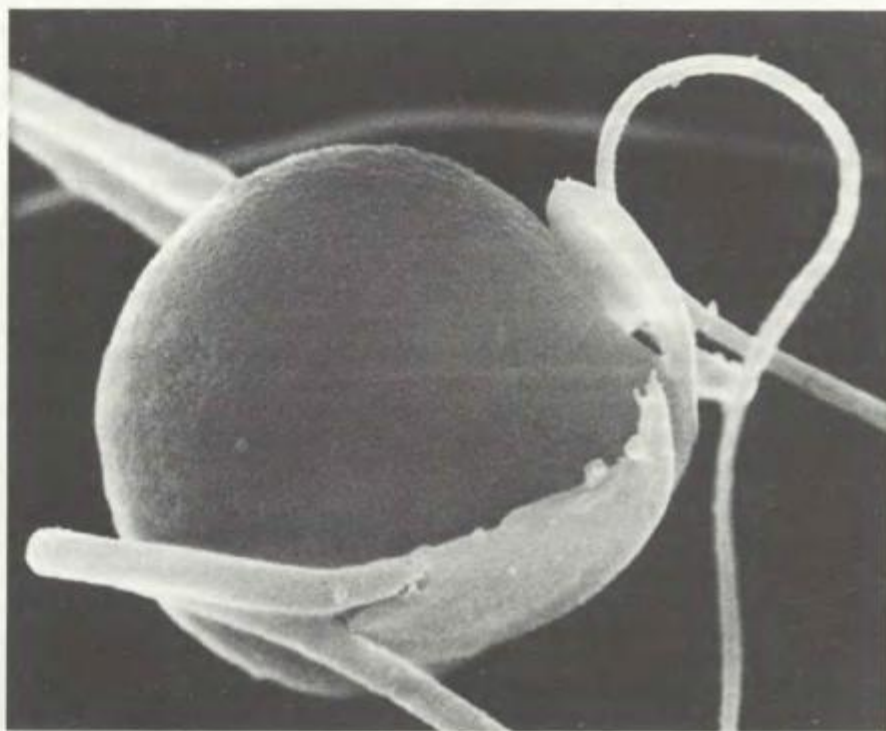
## ОПЛОДОТВОРЕНИЕ IN VITRO



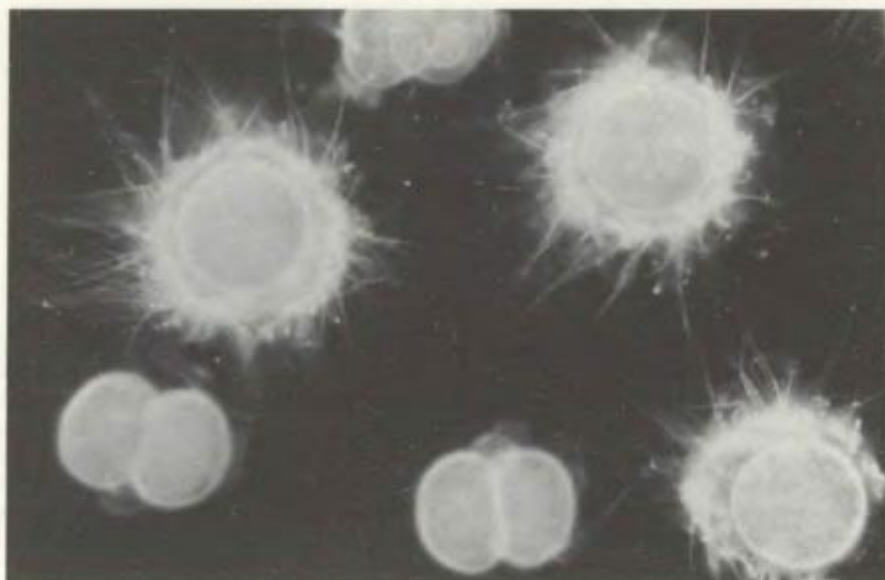
## КОНКУРЕНТНОЕ ИНГИБИРОВАНИЕ



ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО КОНКУРЕНТНОМУ ИНГИБИРОВАНИЮ показали, что у мыши гликопротеин зона pellucida ZP3 является рецептором сперматозоидов. Когда сперматозоиды смешивают с неоплодотворенными яйцеклетками (вверху), то узнающие яйцеклетку белки сперматозоидов взаимодействуют с рецепторами сперматозоидов на яйцеклетках и происходит оплодотворение. Если сперматозоиды сначала инкубируют с рецепторами (внизу), то они уже не могут прикрепляться к яйцеклеткам и оплодотворять их, поскольку белки, узнающие яйцеклетку, заняты. ZP3, выделенный из неоплодотворенных яйцеклеток мыши, подавлял способность сперматозоидов взаимодействовать с яйцеклетками, а ZP1 и ZP2 такой активностью не обладали.



СПЕРМАТОЗОИДЫ прочно связываются со стеклянным шариком, покрытым ZP3 из мышиных яйцеклеток. ZP1, ZP2 и другие гликопротеины не обеспечивают такого связывания. Этот результат подтверждает, что ZP3 является рецептором сперматозоидов. Микрофотография получена с помощью сканирующего электронного микроскопа Д. Филлипсом из Совета по проблемам народонаселения; препарат подготовлен М. Вазкез из лаборатории автора.



**РЕЗУЛЬТАТ ЗОННОЙ РЕАКЦИИ** — изменение свойств zona pellucida яйцеклетки. Сперматозоиды прикрепляются к неоплодотворенным яйцеклеткам (выглядят, как лучистые звезды), но не к двухклеточным эмбрионам. Возможно, ZP3 участвует в зонной реакции. Ферменты кортикальных гранул, выделившиеся в zona pellucida, по-видимому, так изменяют ZP3, что он перестает связывать сперматозоиды. Микрофотография получена автором статьи при помощи метода темного поля.

также у беспозвоночных и растений. Например, у морских беспозвоночных (в частности, *Ciona intestinalis*) в видоспецифическом распознавании сперматозоидов и яйцеклеток и в индукции акросомной реакции определяющую роль тоже играют сахара. Значение сахаров во взаимодействии половых клеток продемонстрировано и для бурой водоросли *Fucus serratus*.

**ПОСКОЛЬКУ**, по нашим данным, связывание ZP3 с головкой сперматозоида индуцирует акросомную реакцию, мы попытались выяснить роль полипептидной цепи и олигосахаридов ZP3 в этом процессе. Флормен и я с помощью ферментов расщепляли ZP3 на гликопептиды с различной молекулярной массой от 1500 до 70 000 дальтон и обрабатывали ими по отдельности сперматозоиды. Оказалось, что гликопептиды крупнее 40 000 дальтон индуцировали акросомную реакцию, а более мелкие — нет, хотя ранее мы показали, что такие гликопептиды связываются со сперматозоидами. Кроме того, O-связанные олигосахариды, полученные из очищенного ZP3, также не индуцировали акросомную реакцию.

Из этих и других данных следует, что, хотя для прикрепления сперматозоидов к яйцеклеткам необходимы O-связанные олигосахариды ZP3, для индукции акросомной реакции требуются довольно длинные участки полипептидной цепи. Пока неясно, сама ли полипептидная цепь взаимодействует с прикрепившимся сперматозои-

дом, или же она служит только каркасом, обеспечивающим взаимодействие сперматозоида с достаточным количеством правильно ориентированных O-связанных олигосахаридов.

Несколько продвинувшись в понимании связывания ZP3 со сперматозоидами и индукции акросомной реакции, мы вернулись к вопросу о том, почему ZP3 теряет свою активность после оплодотворения. Далеко не все изменения, происходящие в zona pellucida, сейчас ясны. Известно, однако, что они являются следствием так называемый кортикальной реакции, которая начинается сразу после слияния сперматозоида с яйцеклеткой и непосредственно предшествует зонной реакции. У мыши кортикальная реакция заключается в слиянии плазматической мембраны яйцеклетки с мембранами кортикальных гранул — богатых ферментами органелл, которые в количестве около 4000 расположены под плазматической мембраной. В результате этой реакции содержащиеся в гранулах ферменты выделяются в перивителлиновое пространство, откуда они постепенно просачиваются в zona pellucida.

Быть может, эти ферменты изменяют гликопротеины, из которых построена zona pellucida? Согласно данным, полученным при исследовании половых клеток хомяков, наиболее интересные нас молекулы, ZP3, действительно модифицируются ферментами кортикальных гранул. Р. Янагимачи и его коллеги из Гавайского университета в Маное обнару-

жили, что после обработки яйцеклеток ферментами кортикальных гранул сперматозоиды хомяка не могут прикрепляться к zona pellucida. Вполне вероятно, что то же самое имеет место у мыши, т. е. ZP3 утрачивает свою активность как рецептор сперматозоидов под действием ферментов кортикальных гранул. Так как важнейшую роль в прикреплении ZP3 к сперматозоидам играют O-связанные олигосахариды, то, скорее всего, ферменты кортикальных гранул специфически действуют на эти олигосахариды, так что те не могут более узнаваться сперматозоидами. В подтверждение этой гипотезы мы с коллегами недавно показали, что удаление или модификация определенных остатков сахаров на концах O-связанных олигосахаридов с молекулярной массой 3900 дальтон нарушает их рецепторную активность. Ферменты кортикальных гранул в принципе могли бы действовать так же.

**ХОТЯ** в последние годы удалось получить ответы на ряд важных вопросов о молекулярных основах оплодотворения у млекопитающих, в этой области еще много неизвестного. Все время появляются новые подходы для пока нерешенных проблем. Так, например, в этом году Р. Кинлох из моей лаборатории в Институте Роша, а также Дж. Дин и его коллеги из Национальных институтов здоровья клонировали ген, кодирующий ZP3. С помощью этих клонов можно идентифицировать последовательности ДНК и клеточные факторы, регулирующие образование рецепторов сперматозоидов в ходе оогенеза. В моей лаборатории и в лаборатории Дина определена полная аминокислотная последовательность ZP3. Эта информация поможет выявить участки молекулы ZP3, существенные для его рецепторной активности, индукции акросомной реакции и сборке нитей zona pellucida.

Мы и другие исследователи пытаемся выделить ферменты кортикальных гранул, катализирующие зонную реакцию, и узнающие яйцеклетку белки сперматозоидов, распознающие O-связанные олигосахариды ZP3, а также определить последовательность сахаров в олигосахариде с молекулярной массой 3900 дальтон, которая узнается сперматозоидами. Наконец, мы надеемся распространить наши исследования на процесс оплодотворения у человека и проанализировать его молекулярный механизм так же подробно, как это сделано для мыши. Молекулярные исследования оплодотворения у человека могут привести к новым методам предупреждения беременности, основанным на на-



рушении связывания рецепторов сперматозоидов с белками, узнающими яйцеклетку. Они бы также способствовали разработке новых методов терапии тех форм бесплодия, в которых причиной являются молекулярные аномалии сперматозоидов или яйцеклеток.

Исследования оплодотворения у мыши и других животных обогатят наши знания и в более общем смысле. Взаимодействие между сперматозои-

дом и яйцеклеткой — это лишь одно из проявлений межклеточных взаимодействий, происходящих в процессе развития живого организма. Исследование этих ранних взаимодействий, несомненно, приведет когда-нибудь к новым представлениям о межклеточных взаимодействиях вообще, а эти представления, в свою очередь, — к многообещающим практическим приложениям в медицине и других областях.

ема. Другой вопрос того же уровня звучал так: почему водоросли обычно встречаются лишь в верхнем 100-метровом слое океана? (Ответ: водоросли могут жить только там, куда проникает свет.)

Чтобы продемонстрировать способность «обобщать специфическую научную информацию» и, таким образом, выйти на уровень «углубленного понимания», учащийся должен был, например, предсказать направление тени от вертикального шеста в утренние часы в центральной части США, либо определить, какой из четырех предметов обладает наибольшей плотностью, если известны их массы и объемы.

Тесты обнаруживают и утешительные тенденции: в сравнении с 1982 г. во всех возрастных группах (9, 13 и 17 лет) наблюдалось некоторое улучшение результатов, хотя до уровня 1970 г. поднялись лишь 9-летние школьники. У чернокожих и испаноязычных учащихся, а также у учащихся, проживающих на юго-востоке страны, улучшение результатов было заметнее. Тем не менее 13- и 17-летние негры и латиноамериканцы по-прежнему в среднем на 4 года отстают от белых. У девочек результаты были хуже, чем у мальчиков, особенно по физике.

В группе наиболее способных учащихся результаты 1982 г. не были улучшены, а количество таких учащихся не увеличилось. Одной из причин всех этих неутешительных результатов является то, что школы уделяют недостаточно внимания преподаванию научных дисциплин. Исследователи отмечают, что половина учителей седьмого класса и 45% учителей одиннадцатого класса отводят менее 3-х часов в неделю естественным и точным наукам.

В данном отчете не проводится сравнение с положением дел в других странах. В опубликованном ранее в 1988 г. обзоре Международной ассоциации по контролю за уровнем образования утверждается, что среди учащихся старших классов средних школ 13 стран американские школьники находятся на последнем месте по биологии и плетутся в задних рядах по химии и физике. Некоторые специалисты, однако, считают эти данные неправильными из-за того, что при оценках не были учтены различия в методах обучения. ETS обсудит проблему сравнения результатов исследований в январе, когда оно опубликует результаты сравнительного тестирования 13-летних американских школьников и их сверстников из пяти других стран. Специалисты считают, однако, что это исследование вряд ли исправит печальную картину.

## Наука и общество

### Нобелевские премии за 1988 г.

#### Физиология и медицина

СУЩЕСТВУЮТ два основных направления поиска новых эффективных способов лечения болезней: метод проб и ошибок и метод сбора фундаментальных знаний о биохимии человеческого организма. Первый метод главенствовал на протяжении большей части истории человечества. Второй стал возможен лишь недавно. Именно за работу такого рода Гертруда Б. Элион и Джордж Г. Хитчингс из фирмы Burroughs Wellcome Company, а также Джеймс У. Блэк из Института Рейна Лондонского университета удостоены Нобелевской премии 1988 г. по физиологии и медицине.

Работая вместе в Burroughs с 1945 г., Элион и Хитчингс стремились выявить структурные и функциональные различия между нормальными клетками, с одной стороны, и раковыми клетками, а также бактериями, вирусами и иными патогенными агентами — с другой. Детальные исследования позволили им найти лекарства против целого ряда заболеваний (в частности, против лейкоза, малярии и пневмонии), нарушающие деятельность биохимического аппарата патогена, но не влияющие на нормальные клетки. Это привело к разработке препарата ацикловира — средства против герпесвирусных инфекций, а также многообещающего препарата против СПИДа — азидотимидина.

Блэк сосредоточил свое внимание на взаимодействии различных химических веществ с поверхностными рецепторами нервных и мышечных клеток. В результате этих исследований созданы лекарства, названные  $\beta$ -блокаторами, которые применяются при высоком кровяном давлении и других нарушениях сердечно-сосудистой си-

стемы, а также препараты, являющиеся антагонистами так называемых H<sub>2</sub>-рецепторов, широко используемые при язвенной болезни.

Нобелевский комитет высоко оценил работы Элион, Хитчингса и Блэка не только за их практический результат — создание специфических лекарственных препаратов, но и за научную стратегию. «Если ранее разработка лекарственных препаратов базировалась в основном на химической модификации природных соединений, — говорится в заявлении комитета, — то эти исследователи ввели в практику более рациональный подход».

#### Неутешительные результаты

В НОВОМ ОТЧЕТЕ, опубликованном Службой проверки образования (ETS), дается невысокая оценка способностей американских школьников понимать научные проблемы. В исследовании, проведенном в рамках утвержденной конгрессом программы — Национальной аттестации образования, сделан вывод о том, что лишь 41% 17-летних подростков имеют «некоторое представление о сути научных опытов или минимальные знания по научным дисциплинам». Только один из тринадцати 17-летних подростков достигает «какого-то уровня углубленного понимания» — слишком мало, чтобы обеспечить в будущем приток новых специалистов.

Исследование основывалось на результатах тестирования 13 тыс. учащихся начальных и средних школ. Иметь «некоторое представление» означало, что учащийся мог «анализировать научные методы и факты», например он был в состоянии понять, что количество воды, вытесненной телом, может служить мерой его объ-

# Лазеры мягкого рентгеновского излучения

*Через четверть века после изобретения оптических лазеров удалось создать экспериментальные рентгеновские лазеры, способные генерировать излучение с длинами волн в 100 раз короче, чем волны видимого света*

ДЕННИС Л. МЭТЬЮЗ, МОРДЕКАЙ Д. РОЗЕН

**Н**Е ПРОШЛО и 30 лет с момента изобретения лазеров, а они уже стали обычными в нашей жизни. Эти приборы, генерирующие узкий пучок света на определенной длине волны, являются основным компонентом разнообразных систем, таких как лазерные гироскопические платформы для автоматического пилотирования реактивных лайнеров, считывающие устройства кассовых аппаратов и проигрывателей для компакт-дисков, а также лазерные печатающие устройства.

Совершенствование лазеров шло по пути последовательного продвижения в сторону все более коротких длин волн. Первые квантовые генераторы, построенные в 50-е годы, были не лазерами, а мазерами (от англ. microwave amplification by stimulated emission of radiation — усиление микроволн с помощью вынужденного испускания излучения. — *Перев.*) и генерировали не видимый свет, а микроволновое электромагнитное излучение с гораздо большими длинами волн. Типичный мазер генерирует излучение с длиной волны 5 см, что лишь несколько меньше длины волны телевизионного УВЧ-сигнала. Собственно лазер, способный излучать видимый свет с длиной волны около 500 нм, т. е. в 100 000 раз меньшей, чем длина волны мазерного излучения, появился в 1960 г.

Многие годы создание рентгеновских лазеров было лишь мечтой специалистов. Как микроволны, так и рентгеновские лучи отличаются от фотонов видимого диапазона только длиной волны. В спектре электромагнитного излучения рентгеновские лучи занимают диапазон примерно от 10 до 0,01 нм. Длинноволновую часть этого диапазона называют мягким рентгеновским излучением, так как фотоны с такими длинами волн не проникают ни через воздух, ни через мягкие ткани живых организмов. Излучение с более короткими длинами

волн, например около 0,03 нм, используемое рентгенологами, в силу его большой проникающей способности называют жестким.

25 лет потребовалось на то, чтобы рентгеновский лазер наконец-то появился в научных лабораториях, но пока, правда, только в виде экспериментальных образцов. Эти лазеры генерируют мягкое рентгеновское излучение на длине волны примерно до 5 нм, или в 100 раз более коротковолновое, чем оптическое; возможно, исследователям удастся «выжать» из этих устройств излучение с длиной волны 2 нм.

Такие коротковолновые лазеры найдут множество приложений. Главным из них могло бы стать создание голограмм микроскопических биологических структур, которые слишком малы для исследования в видимом свете. Подобные голограммы позволили бы биологам впервые сделать видимой пространственную структуру важнейших белков и иерархической укладки двойной спирали ДНК в компактные хромосомы.

**Р**ЕНТГЕНОВСКИЕ лазеры сохраняют обычные характеристики оптических лазеров: имеют узкий пучок, пространственную и временную когерентность (означающие, что все рентгеновские фотоны движутся в фазе), а также исключительно высокую яркость, или интенсивность излучения. Современные рентгеновские лазеры уже почти в 100 млн. раз ярче, чем самый мощный из других рентгеновских источников — электронный синхротрон.

Принципиальное и единственное различие между оптическим и рентгеновским лазерами заключается в том, что последний генерирует фотоны со значительно меньшей длиной волны. Это различие, однако, чрезвычайно затрудняет создание таких устройств и первый успешно работающий рентгеновский лазер был построен

только в 1984 г. в Ливерморской национальной лаборатории им. Лоуренса. Эти трудности являются прямым следствием законов, сформулированных квантовой механикой, которая, в частности, утверждает, что длина волны фотона обратно пропорциональна его энергии — чем короче длина волны, тем больше его энергия. При более высокой энергии гораздо труднее выполнить основное условие, необходимое для работы любого лазера — достичь инверсии населенностей в лазерной среде.

Для того чтобы понять, как создается инверсия населенностей, рассмотрим принципы действия обычного гелий-неонового лазера в читающем устройстве кассового аппарата. В этих лазерах электрический ток высокого напряжения возбуждает (или накачивает) электроны в атомах гелий-неоновой смеси и переводит их из основного состояния на более высокие уровни энергии. Через некоторое характерное время электрон спонтанно (самопроизвольно) переходит на более низкую орбиту. В процессе перехода испускается фотон, энергия которого равна разности энергий между двумя орбитами (см. рисунок на с. 50).

Некоторые испущенные таким образом фотоны сталкиваются с другими возбужденными атомами и вызывают переходы их возбужденных электронов на более низкий уровень энергии. В процессе этого вынужденного перехода атом испускает фотон. Если все переходы происходят между одной и той же парой уровней энергии, то все фотоны будут иметь одну и ту же энергию и, следовательно, одну и ту же длину волны. Квантовая механика утверждает также, что все эти фотоны будут испускаться в том же направлении и с той же фазой, что и падающие фотоны. В обычном лазере этот процесс повторяется за счет многократных отражений между зеркалами. В результате нарастает лави-

на фотонов, причем все они имеют одну длину волны, движутся в одном направлении и имеют одинаковую фазу. На английском языке этот процесс описывается словами: *light amplification by stimulated emission of radiation* (усиление света с помощью вынужденного испускания излучения), а сокращенно *laser*, откуда и произошло слово лазер.

Лазерной генерации, однако, не возникает, если количество атомов с возбужденными электронами не будет больше, чем количество атомов с электронами на более низком уровне энергии. Такая ситуация известна как инверсия населенностей. Создать инверсию населенностей трудно, пото-

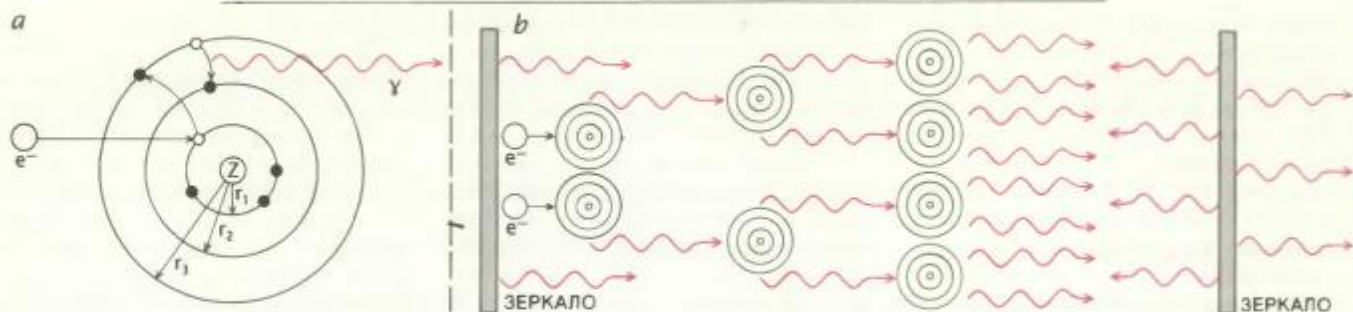
му что в соответствии с основными законами статистической механики в обычном состоянии термодинамического равновесия более низкие уровни энергии заняты большим числом электронов, чем верхние. С высоких уровней электроны стремятся быстро перейти на нижние и тем самым установить это равновесие. Если атомов с электронами на нижнем уровне больше, чем атомов с электронами на верхнем уровне, то фотоны чаще поглощаются, чем излучаются, и лазерной генерации не происходит. Для создания «хорошей» инверсии населенностей электроны на возбужденные состояния необходимо накачивать быстрее, чем они переходят вниз.

**Э**НЕРГИЯ испущенного фотона равна энергии, отданной электроном при переходе с верхнего уровня на нижний. Поэтому если энергия мягкого рентгеновского фотона в 100 раз больше энергии оптического фотона, то для возбуждения электронов, чтобы они смогли перейти на нужные уровни, в рентгеновском лазере требуется приложить по крайней мере в 100 раз большую энергию, чем в оптическом лазере. Разности энергий между уровнями в гелий-неоновой смеси и других веществах, применяемых в оптических лазерах, слишком малы для того, чтобы при электронных переходах испускались фотоны с высокой энергией. Для решения этой задачи



ЛАЗЕР «НОВА», построенный в Ливерморской национальной лаборатории им. Лоуренса, является самым мощным в мире оптическим лазером. Он может генерировать энергию 100 000 Дж менее чем за одну миллиардную долю секунды, т. е. импульс мощностью  $10^{14}$  Вт. Два из 10 пучков

«Новы» служат источником энергии накачки для рентгеновских лазеров, в которых она должна быть в 1000 раз больше, а скорость ее вложения в среду примерно в 10 000 раз больше, чем в случае оптических лазеров.



ВСЕ ЛАЗЕРЫ работают на вынужденном излучении. Это иллюстрирует боровская модель атома. Энергия накачки (в данном случае накачку осуществляют электроны высокой энергии) возбуждает электроны в атомах с орбиты с низкой энергией ( $r_1$ ) на орбиту с высокой энергией ( $r_3$ ). Возбужденный электрон спонтанно (самопроизвольно) переходит на промежуточную орбиту ( $r_2$ ), испуская при этом фотон (волнистые линии). Его энергия равна разности

энергий двух орбит. Фотон сталкивается с возбужденным атомом и вынуждает один из возбужденных его электронов скачком перейти в состояние с более низкой энергией, излучив при этом второй вынужденный фотон, который движется в том же направлении и в той же фазе, что и первый фотон. Этот процесс повторяется до тех пор, пока возникающая за счет вынужденного излучения лавина фотонов не пройдет сквозь зеркало в виде когерентного пучка.

мы в Ливерморской лаборатории выбрали химические элементы с большими атомными номерами, т. е. элементы, ядро которых содержит большое количество протонов. В атомах таких элементов за счет большого числа протонов в ядре ближе всего расположенные к нему электроны испытывают сильное электрическое притяжение к ядру. Для возбуждения этих электронов требуется много энергии, и потому при их переходах испускаются фотоны высокой энергии.

Но одного лишь выбора элементов с большими атомными номерами еще недостаточно. Нейтральный атом урана, например, хотя и имеет самый высокий атомный номер из всех природных химических элементов, не мог бы стать подходящим активным веществом для рентгеновского лазера. Многие из 92 электронов урана вследствие эффективной экранировки большого положительного заряда ядра отрицательным зарядом электронов на внутренних орбитах оказываются привязанными к ядру не слишком сильно. Фактически для внешних электронов урана эффективный атомный номер (или заряд ядра) близок к нулю. Следовательно, необходимо начать с ионизации активной среды, т. е. попытаться оторвать внешние (слабо связанные) электроны атома. При этом экранирование уменьшается, эффективный заряд ядра (обозначаемый  $Z$ ) увеличивается и остающиеся электроны оказываются более сильно связанными с ядром.

Для того чтобы превратить атом с эффективным зарядом, близким к нулю, в высокозаряженный ион с эффективным зарядом  $Z$ , необходимо оторвать примерно  $Z$  внешних электронов. В простейшей модели атома

энергия, необходимая для отрыва внешнего электрона, пропорциональна  $Z^2$ . Условие, чтобы испускаемые фотоны обладали в 100 раз большей энергией, чем оптические фотоны, требует поэтому создания ионов с эффективным зарядом  $Z$  в 10 раз большим, чем для оптических лазеров. Это значит, что для отрыва нужного числа электронов к активной среде рентгеновского лазера необходимо приложить в 1000 раз большую энергию, чем в случае оптического лазера, т. е. нужно оторвать порядка 10 внешних электронов и на каждый из них затратить в 100 раз больше энергии.

Более того, оказывается, что скорость, с которой электроны иона спонтанно переходят на нижние уровни энергии, пропорциональна  $Z^4$ . Поэтому, для того чтобы в лазере мягкой рентгеновской области достичь хорошей инверсии населенностей, нужно не только в 1000 раз больше энергии, чем в оптическом лазере, но, кроме того, эту энергию необходимо прикладывать примерно в 10 000 раз быстрее. Чтобы обеспечить это, для накачки используется оптический лазер высокой мощности. В Ливерморской лаборатории в качестве накачки используются два пучка самого мощного в мире 10-пучкового лазера «Нова» (см. Кракстон Р., Мак-Крори Р., Сорес Дж. Лазерный термоядерный синтез, «В мире науки», 1986, № 10.), который дает в импульсе длительностью менее одной наносекунды мощность  $10^{14}$  Вт.

Вначале эти лазеры разрабатывались в рамках реализуемой в Ливерморской лаборатории программы лазерного термоядерного синтеза, целью которой является создание фактически неограниченного источ-

ника энергии. Хотя Ливерморская лаборатория широко известна своими работами по созданию лазеров в жесткой рентгеновской области, в которых для накачки используется энергия ядерного взрыва и которые разрабатываются в рамках программы стратегической оборонной инициативы (СОИ), лазеры мягкой рентгеновской области прямых военных применений не имеют. Эти лазеры и научные инструменты, которые появятся на их основе, когда-нибудь смогут найти применение в технологии лазерного термоядерного синтеза, а также в создании лазеров жесткого рентгеновского излучения, однако здесь мы рассмотрим работу, которая совершенно несекретна.

**В РЕНТГЕНОВСКИХ** лазерах, действующих сейчас в Ливерморской лаборатории, пучок «Новый» фокусируется на тонкую фольгу, скажем, из селена, иттрия или молибдена. В обычном состоянии эти элементы (их выбор предложил П. Хагелстейн, который теперь работает в Массачусетском технологическом институте) твердые, но указанным выше способом их атомы можно ионизовать. Падающий на фольгу оптический пучок полностью ее испаряет и создает плазму, в которой у атомов селена (с 34 электронами), например, оторвано 24 электрона с внешних оболочек. Свободные электроны, созданные интенсивным лазерным пучком «Новый», имеют высокую среднюю энергию — 1000 эВ (1 кэВ) или, что то же самое — температуру около 10 млн. градусов Кельвина. Двигаясь в плазме и сталкиваясь с ионами селена, они возбуждают один из оставшихся 10 внутренних электронов на нужные уровни энергии. Такая схема возбуж-

дения, называемая столкновительным возбуждением, была предложена более двух десятилетий назад Р. Элтоном из Военно-морской исследовательской лаборатории и М. Дюгз из фирмы AT&T Bell Laboratories.

Остановимся на схеме возбуждения лазера более подробно. Оставшиеся у ионов селена электроны находятся в основном состоянии, которое обычно обозначают  $1s^2 2s^2 2p^6$  или для краткости  $2p$  (см. рисунок справа). Буквы  $s$  и  $p$  указывают атомные орбитали, для которых квантовые числа орбитального момента равны соответственно 0 и 1. Предшествующие им числа соответствуют энергетическим уровням, обозначаемым главным квантовым числом  $n$ . Верхние индексы указывают количество электронов на каждом уровне. Столкновения с энергичными свободными электронами возбуждают  $2p$ -электроны в некоторых ионах и переводят их на уровень энергии, лежащий на 1,5 кэВ выше и обозначаемый  $1s^2 2s^2 2p^5 3s$  ( $3s$ ), или на еще более высокий уровень обозначаемый  $1s^2 2s^2 2p^5 3p$  ( $3p$ ). (В плазме со средней энергией 1 кэВ есть немало электронов, обладающих энергией более 1,5 кэВ и способных осуществить такое возбуждение.)

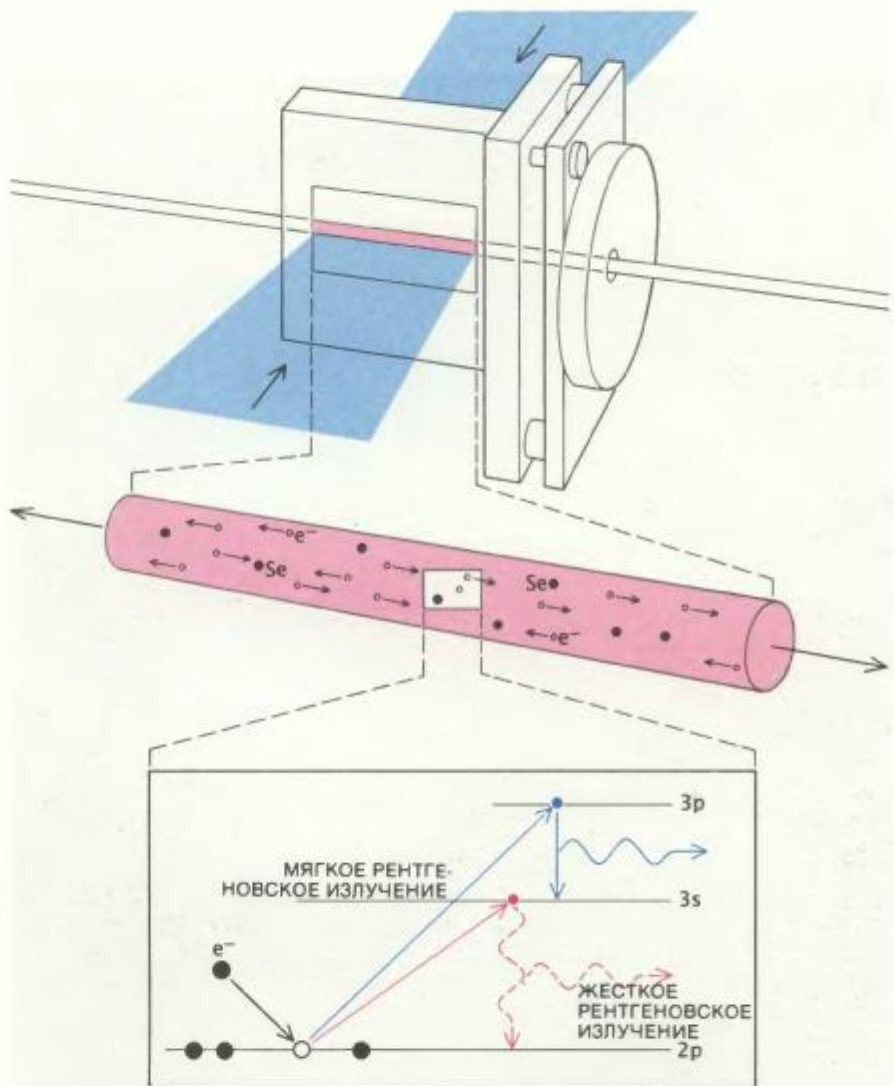
Естественно ожидать, что уровень  $3s$  благодаря его меньшей энергии будет заселяться электронами больше, чем уровень  $3p$ . Однако электроны из состояния  $3s$  быстро возвращаются (или, как говорят, распадаются) обратно в основное состояние  $2p$ . Для электронов в состоянии  $3p$  такой возврат по законам квантовой механики запрещен и они остаются на этом уровне длительное время. Обычно 96% ионов находятся в состоянии  $2p$ , 3% — в состоянии  $3p$  и 1% — в состоянии  $3s$ . Таким образом создается инверсия населенностей между состояниями  $3p$  и  $3s$ . Между этими двумя состояниями разрешены переходы, и когда электроны с уровня  $3p$  распадаются спонтанным образом на уровень  $3s$ , при этом испускаются мягкие рентгеновские фотоны с длиной волны 20 нм. Именно эти спонтанные фотоны инициируют лазерную генерацию, вынуждая другие ионы, возбужденные подобным же образом, также испускать фотоны с той же длиной волны.

**КАК ТОЛЬКО** фотоны необходимой длины волны получены, их нужно усилить. Усиление пучка в оптическом лазере облегчается многократным отражением фотонов между двумя зеркалами. Отражаются и участвуют в процессе усиления толь-

ко те фотоны, которые распространяются вдоль оси лазера. Фотоны, которые не отражаются, быстро выйдут из пучка (вот почему лазерный пучок является столь остро направленным). Однако в рентгеновской области спектра зеркал с почти 100%-ным отражением не существует. Поэтому ученым пришлось разработать другие методы усиления рентгеновских лучей.

Используемая в Ливерморской ла-

боратории селеновая пленка имеет толщину 75 нм, ширину несколько миллиметров и длину несколько сантиметров; для придания жесткости пленка нанесена на поливиниловую подложку. Специальные линзы фокусируют пучок «Новы» в линию той же длины, но шириной 0,1 мм. Когда сфокусированный таким образом световой импульс «Новы» падает на селеновую мишень, тонкая селеновая пленка прогревается, взрывается и



ОПТИЧЕСКИЙ ИМПУЛЬС лазера «Новы» инициирует процесс лазерной генерации рентгеновского излучения. Пучок «Новы» падает на прямоугольную селеновую мишень. Селен испаряется, образуя цилиндрический столб плазмы, состоящей из свободных электронов и ионов селена, лишенных части электронов. В процессе, называемом столкновительным возбуждением, свободный электрон сталкивается с ионом селена и возбуждает один из оставшихся у иона связанных электронов из основного состояния  $2p$  в состояния с более высокой энергией  $3s$  и  $3p$ . Из состояния  $3s$  электроны быстро переходят (распадаются) в основное состояние; переходы с уровня  $3p$  на основной уровень запрещены. В результате количество ионов с электроном в состоянии  $3p$  превышает количество ионов с электроном в состоянии  $3s$  и возникает ситуация, известная под названием инверсии населенностей. Распадаясь из состояния  $3p$  в состояние  $3s$ , электроны испускают рентгеновские фотоны, которые вынуждают другие ионы в состоянии  $3p$  испускать новые фотоны в той же фазе. Эти вынужденные фотоны и составляют лазерный пучок.

образует столб плазмы цилиндрической формы диаметром около 0,1 мм и в несколько сот раз большей длины. Цилиндрическая форма обеспечивает предпочтительное направление усиления рентгеновского излучения: фотоны, идущие по радиусу, выходят из плазмы, а те, что распространяются вдоль оси плазменного столба, вынуждают испускание других рентгеновских фотонов. Так как зеркала отсутствуют, усиление происходит только на одном проходе.

Доказательство того, что в таком устройстве вообще происходит лазер-

ная генерация, является нетривиальной задачей, и, как уже упоминалось, первые успешные эксперименты были выполнены в Ливерморской лаборатории только в 1984 г. То, что лазерная генерация имела место, показали три важных наблюдения. Во-первых, мы обнаружили в рентгеновском спектре определенные спектральные линии, которые оказались ярче, чем другие линии. Это указывало, что нужные атомные переходы имеют место. Во-вторых, мы обнаружили линии, излучение в которых много сильнее вдоль оси цилиндра,

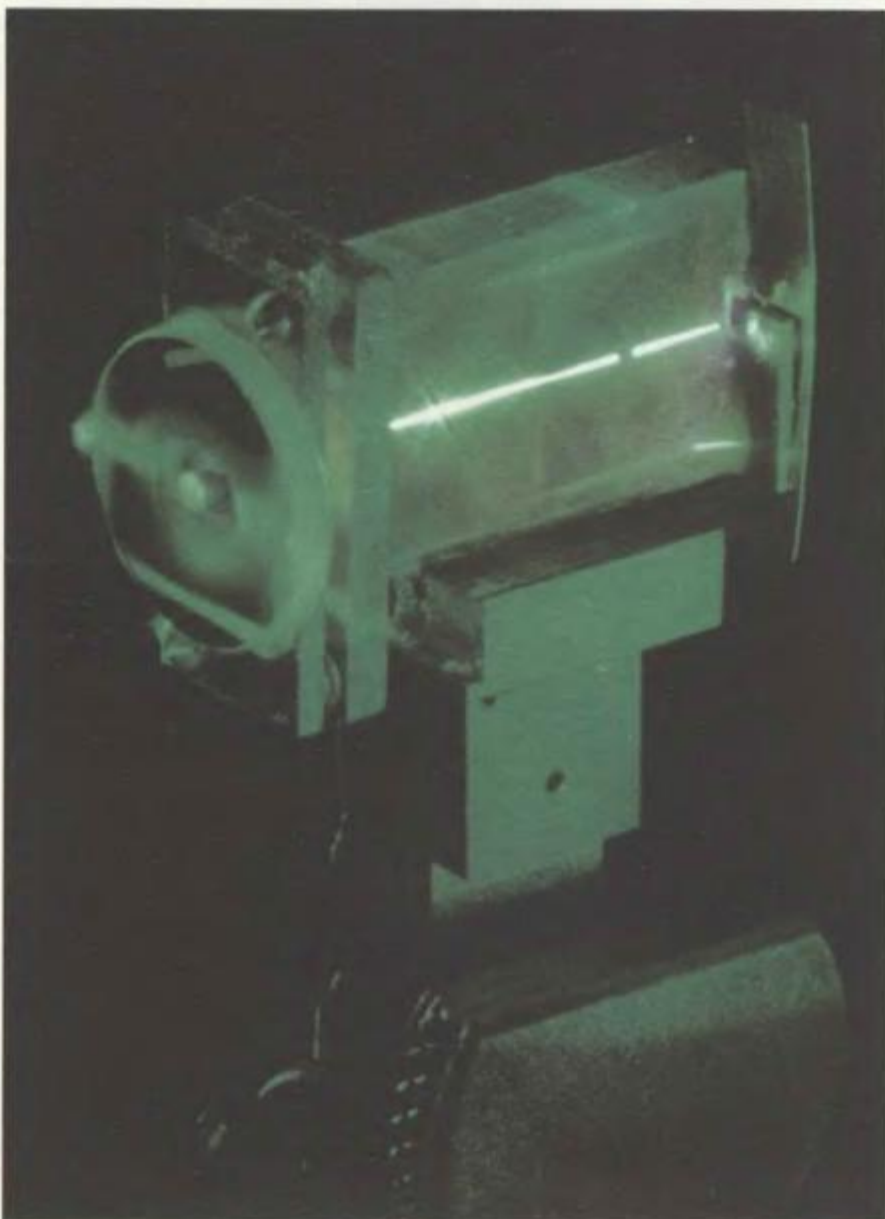
чем в других направлениях. И наконец, что наиболее важно, мы измерили зависимость интенсивности рентгеновского излучения от длины мишени. Если происходит лазерная генерация, число фотонов в лавине должно экспоненциально возрастать с увеличением длины мишени и, следовательно, также экспоненциально должна возрастать интенсивность пучка. Именно такая зависимость и наблюдалась в опыте (см. рисунок на с. 53).

После этих экспериментов было найдено множество других ионов, на которых происходит генерация рентгеновского излучения с длинами волн от 30 до 10 нм. При увеличении длины мишени от 1 до 4 см интенсивность селенового лазера, который испускает рентгеновские лучи на 20 нм, возрастает в 100 000 раз. В импульсе длительностью 0,1 нс селеновый лазер дает выходную мощность от 5 до 10 МВт.

Это впечатляющая мощность, однако схема столкновительного возбуждения, использованная в селеновом лазере, чрезвычайно неэффективна для генерации значительно более коротковолнового излучения. Например, мишень из серебра, атомный номер которого 47 (в отличие от 34 для селена), дает рентгеновский пучок в области около 10 нм. Чтобы создать пучок на волне 4 нм, потребуется перейти к еще более высоким  $Z$ . Для этого рассмотренная выше схема возбуждения потребовала бы примерно в 100 раз более мощной оптической накачки, чем может обеспечить «Нова», который является самым мощным лазером в мире.

**К**ОНСТРУИРОВАНИЕ лазеров рассмотренного типа было бы невозможно без двух программ компьютерного моделирования — программы LASNEX, которая была разработана сотрудниками Ливерморской лаборатории Дж. Зиммерманом и другими в 70—80-е годы для численного моделирования лазерного термоядерного синтеза, и программы XRASER, разработанной в то же время П. Хагелстейном. Программа LASNEX моделирует основные физические характеристики накачивающего лазерного импульса и его взаимодействие с пленочной мишенью. В качестве входных данных задаются форма, размеры и состав мишени, а также параметры лазерного пучка «Новы». Затем LASNEX рассчитывает, как мишень будет взрываться и как будут изменяться во времени плотность, температура и давление возникающей плазмы.

Эти величины используются в качестве исходных в программе

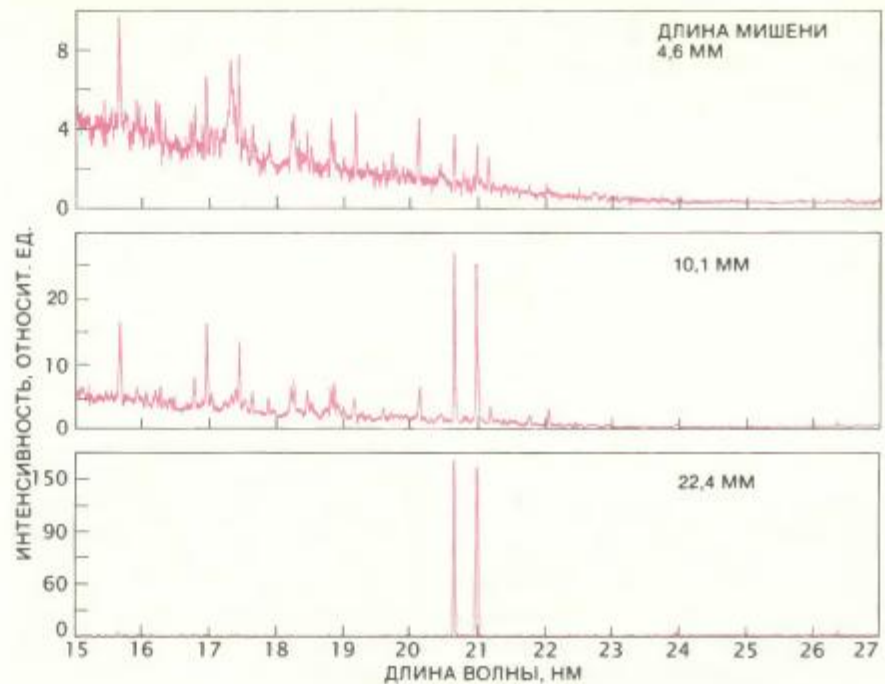


В БОЛЬШИНСТВЕ первых рентгеновских лазеров зеркала не используются, так как зеркала, способные отражать рентгеновские лучи, появились лишь недавно (круглое зеркало на одном конце служит лишь для целей юстировки). Образующийся при взрыве селеновой мишени под действием импульса «Новы» цилиндрический столб плазмы (*светлая линия*) имеет длину в несколько сот раз больше его поперечного размера. Лазерный пучок образуют лишь фотоны, распространяющиеся вдоль оси цилиндра. Селен испускает рентгеновские лучи с длиной волны около 20 нм.

XRASER, которая с учетом данных атомной физики вычисляет заселение электронами различных уровней энергии в селеновой плазме, скорости переходов и, наконец, коэффициент усиления в рентгеновском лазере. Если параметры пучка и мишени выбраны верно, XRASER рассчитает экспоненциальное возрастание усиления с длиной мишени, и это будет свидетельствовать о том, что при заданных параметрах можно получить вынужденное испускание фотонов. Если же параметры выбраны неудачно, это сразу обнаружится по результатам вычислений программы XRASER. В течение последних 10 лет путем постоянной сверки с результатами экспериментов и с учетом выводов, сделанных на основе практики, эти программы были значительно усовершенствованы и расширены их возможности. В настоящее время LASNEX и XRASER с постоянно возрастающей степенью достоверности служат средствами проектирования и диагностики. Их предсказания в деталях соответствуют многим (хотя еще не всем) наблюдаемым характеристикам селенового лазера.

Сотрудники Ливерморской лаборатории под руководством С. Максона и Р. Лондона недавно применили программы LASNEX и XRASER для проектирования лазера с усилением на длине волны 5 нм. Реалистичность этого проекта затем продемонстрировала группа сотрудников во главе с Б. Макгауэном. В качестве мишеней использовалась фольга из иттербия, у которого нужно было оторвать 42 электрона, а один из 38 оставшихся электронов возбудить из состояния  $3d$  в состояние  $4d$ . Механизм подобен тому, который использован в селеновом лазере, за исключением того, что инверсия населенностей создается между состояниями  $4d$  и  $4p$  (буква  $d$  указывает состояние с квантовым числом орбитального момента, равным 2). Программы предсказывают хороший коэффициент усиления также на длинах волн от 4,48 до 4,16 нм при использовании танталовой, вольфрамовой и рениевой мишеней. Вскоре эти прогнозы мы проверим экспериментально.

Как отмечалось, описанные выше рентгеновские лазеры являются однопроходными устройствами. Зеркала, отражающие рентгеновские лучи, позволили бы получить многоходовое усиление и, следовательно, значительно увеличить выходную мощность. Первые рентгеновские зеркала были изобретены в 70-х годах Э. Спиллером из Исследовательского центра Томаса Уотсона фирмы IBM в Йорктаун-Хейтсе (шт. Нью-Йорк). С тех пор технология изготовления



УСИЛЕНИЕ в лазере определяется длиной мишени. Количество фотонов, участвующих в лазерной генерации, экспоненциально увеличивается с увеличением длины мишени и поэтому интенсивность пучка также экспоненциально возрастает с длиной. На верхнем графике при длине мишени 4,6 мм относительная интенсивность линии селена 21 нм равна примерно трем единицам. На среднем графике при увеличении длины мишени в 2,2 раза интенсивность этой линии возросла почти в девять раз. При последующем удвоении длины мишени до 22,4 мм практически вся энергия излучения сосредоточена, как показано на нижнем графике, в лазерных линиях.

рентгеновских зеркал была усовершенствована до такой степени, что они успешно опробованы в экспериментах, проводимых в Ливерморской лаборатории, Принстонском и Парижском университетах.

Рентгеновские зеркала, создаваемые в настоящее время в Ливерморской лаборатории под руководством Н. Сельо и Т. Барби-младшего, являются многослойными. Слои вещества, прозрачного для рентгеновских лучей, перемежаются слоями материала, отражающего рентгеновские лучи с максимально возможной эффективностью (которая составляет всего 1,3% амплитуды электрического поля падающего лазерного пучка). Если расстояние между отражающими слоями составляет половину длины волны, то отраженные от двух соседних слоев лучи интерферируют конструктивно, увеличивая эффективную отражающую способность (процесс отражения в слоистой структуре известен под названием брэгговского рассеяния). Разработанные к настоящему времени рентгеновские зеркала могут иметь до нескольких сотен слоев, каждый толщиной примерно в 100 атомов. Наибольший коэффициент отражения, по интенсивности равный 60%, получен в настоящее время на

длине волны 17 нм для зеркала с 30 слоями.

Получить многопроходное усиление даже с помощью зеркал — задача не из легких. Если зеркала расположены ближе чем на расстоянии 1 см от мишени, излучение испаряющегося селена повреждает их или вовсе разрушает. Кроме того, за время лишь немногим больше времени прохождения рентгеновских лучей вдоль плазменной нити, плазма расширяется и становится разреженной. Вследствие этого после небольшого числа проходов между зеркалами плазма распадается и усиление в лазере исчезает. Тем не менее в экспериментах, выполненных в Ливерморской лаборатории, было продемонстрировано, что при двух проходах генерируемая мощность оказалась в 30 раз больше, чем при одном. Это означает, что зеркало уцелело и имело место двухпроходное усиление.

В еще более смелом опыте мы опробовали трехпроходное усиление. При этом использовалось не только рентгеновское зеркало, но и делитель рентгеновского пучка (полупрозрачное зеркало). Эксперимент удался, однако на третьем проходе плазма была уже столь разрежена, что усиление существенно упало.

Одним из возможных решений проблемы распада лазерной среды является переход к массивным мишеням, которые под воздействием пучка накачки не испарялись бы полностью. Если при этом для накачки использовать оптический лазер с длинным импульсом, то мишень будет испаряться постепенно и плазма будет восполняться. Такая схема могла бы решить проблему разрежения. В настоящее время мы исследуем этот подход.

**ДЕЙСТВУЮЩИЕ** сейчас в Ливерморской лаборатории лазеры мягкого рентгеновского диапазона обещают многое, но пока они не вышли за пределы лаборатории. Как только рентгеновские лазеры станут надежными, эффективными и экономичными, они найдут несколько важных приложений. Первое и самое главное из них заключается в возможности использования таких лазеров, обладающих короткой длиной волны, когерентностью и чрезвычайно высокой яркостью, для исследования живых структур, размеры которых много меньше тех, что можно увидеть оптическими методами.

До сих пор, например, не существует диагностических приборов высокого разрешения для получения изображений живых объектов на субмикросомном уровне. Так, для электронной микроскопии обычно требуется срезать слой обезвоженного образца и обработать его металлическим фиксатором, а это значит — убить объект исследования. Растровые туннельные или рентгеновские микроскопы требуют большого времени экспозиции. Движение живых объектов при этом размывает изображение.

Лазеры мягкого рентгеновского диапазона могли бы решить эти проблемы. Малая длина волны рентгеновских лучей (для обеспечения наибольшего контраста между водой и биологическими структурами идеальным было бы излучение на длине волны 4,4 нм) позволит получать изображения с большим разрешением. При очень высокой яркости и когерентности время экспозиции может быть чрезвычайно коротким и оно как бы «заморозит» движущийся объект. Конечно, рентгеновский пучок разрушит образец, но это произойдет уже после экспозиции. С помощью такой техники исследователи смогли бы получить голограммы живых структур с высоким разрешением.

Недавно в Ливерморской лаборатории группа исследователей под руководством Дж. Трибза применила 20-нанометровый селеновый лазер для создания первых рентгеновских голограмм пробных неживых объектов — углеродного волокна диаметром

8000 нм и золотой нити диаметром 10 000 нм. Успех этих экспериментов — первый значительный шаг на пути практической демонстрации перспектив использования мягких рентгеновских лучей для изучения живых структур. Однако, для того чтобы получить полностью когерентное излучение на желаемой длине волны 4 нм, потребуются значительные опытно-конструкторские работы.

Малые длины волн и высокие интенсивности излучения рентгеновских лазеров позволяют проводить диагностику плазмы, например той, которая возникает при испарении селеновой мишени импульсом лазера «Нова», что способствует дальнейшему совершенствованию рентгеновских лазеров. До сих пор зондирование плазмы осуществлялось с помощью оптических лазеров. Но вследствие сильной рефракции оптического пучка при высоких плотностях плазмы они дают информацию только о плотности менее  $0,001 \text{ г/см}^3$ . Мягкие рентгеновские лучи позволяют регистрировать плотности на четыре порядка величины больше, чем те, которые доступны сейчас.

Рентгеновские лазеры могут не только зондировать плазму, но и создавать ее. Как показывают расчеты, рентгеновский пучок, направленный на твердую мишень, позволяет создать плазму с гораздо большими плотностью и температурой, чем даже у плазмы, получаемой облучением селеновой мишени пучком лазера «Нова». Это позволило бы исследователям значительно больше узнать о поведении плазмы при температурах и плотностях, сопоставимых с теми, которые существуют внутри Солнца.

Хотя применение рентгеновских лазеров в рассмотренных областях дело будущего, прогресс в создании этой новой техники достигнут немалый. Даже 10 лет назад появление такого устройства считалось невозможным. Сейчас исследования в этой области находятся в той стадии, когда получены опытные устойчиво работающие

образцы импульсных рентгеновских лазеров, изготовлены рентгеновские зеркала с высоким отражением и сделаны первые рентгеновские голограммы.

В течение последних 10 лет наблюдается заметный прогресс на пути создания источников излучения на все более коротких волнах и не видно, чтобы в этом продвижении мог возникнуть какой-либо неожиданный барьер. В настоящее время проектируются новые схемы лазеров, которые будут генерировать излучение с длиной волны 2,8 нм и, может быть, даже с более короткими волнами.

**МОЖЕТ** показаться, что это развитие навсегда ограничится рамками лабораторий и что устроителя, требующие для накачки лазер типа «Нова» мощностью в миллион гигаватт, никогда не удастся сделать небольшими и практичными. Для схем с большими  $Z$ , которые использованы в Ливерморской лаборатории, это верно. Однако в ряде лабораторий разрабатываются различные новые подходы к созданию коротковолновых лазеров, в частности в той же Ливерморской лаборатории (под руководством Д. Эдера и К. Кина), в Принстонском университете (под руководством Ш. Сукевера и Ч. Скенера), в Эплтонской лаборатории Резерфорда (под руководством М. Ки и Дж. Перта), в Парижском университете (под руководством П. Жагле) и во многих других национальных, университетских и промышленных лабораториях мира.

Некоторые из новых схем, в отличие от рассмотренной в данной статье, не требуют атомов с большим  $Z$  и столь мощной накачки, как от лазера «Нова». В их основе лежат более эффективные механизмы возбуждения, которые требуют меньшей мощности. Возможно, новые методы позволят снизить требования к мощности настолько, что вполне реальным окажется настольный рентгеновский лазер.

## Наука и общество

### Тайные пружины рекламы

**«ИНТЕРЕС**, вызываемый сообщением», такой интригующий, но несколько неопределенный заголовок можно найти в справочнике для предпринимателей. «Интерес» здесь означает эмоциональную стимуляцию потребителя, поэтому далее следует список физиологических показателей, которыми специалисты по

рекламе пытались определить эту стимуляцию количественно: кровяное давление, частота пульса, температура тела и т. д. Эти методы, как отметили редакторы справочника в 1978 г., привлекли внимание благодаря окружающему их «ореолу научности». За последнее десятилетие, однако, этот ореол поблек.

Флирт рекламы с физиологией начался в 50-х годах, когда психоаналитическая теория «дошла» до специа-



листов по торговле. В 1954 г. в книге о стратегии торговли автор писал: «Как наивны мы были, основывая исследование спроса на предположении, что человек всегда может и стремится обнаружить свои истинные чувства». Так начался поиск объективных методов тестирования реакций потребителя, точнее, некоторой произвольной реакции, которую можно обнаружить лабораторным путем и которую одна из газет назвала «истинным состоянием организма».

В качестве одного из первых индикаторов этой реакции было взято расширение зрачка; Э. Хесс из Чикагского университета в начале 60-х годов использовал его как основу для определения «дифференциального интереса» (см. E. Hess. *Attitude and Pupil Size*, "Scientific American", April 1965). Коммерсанты с энтузиазмом приветствовали этот метод, хотя, как следовало из докладов на конференции Американской ассоциации торговли, методика с большей чувствительностью измеряла реакцию мужчин на полуодетых женщин, чем отношение потребителя к рекламе.

Электрические волны мозга, высота голоса, частота дыхания и кожно-гальванический рефлекс (электрическое сопротивление кожи) как индикаторы вошли в моду примерно в то же время. В 70-х годах шли разговоры о том, чтобы включить в арсенал методов исследования спроса детектор лжи.

Специалисты по торговле пробовали использовать достижения физиологии и при разработке рекламы. В 1975 г. в одной из статей журнала "Journal of Advertising Research" была высказана идея, что объявления, адресованные правому полушарию мозга — т. е. несущие в основном эмоциональную нагрузку, — должны восприниматься более эффективно на левой стороне страницы, тогда как «рекламу, подчеркивающую научные аспекты того или иного сорта продукции, лучше помещать на правой стороне», где она, предположительно, будет воздействовать на левое полушарие мозга, ответственное за аналитическое мышление.

В текущем десятилетии, после 20 лет исследований, специалистам по рекламе все еще не удалось доказать существование корреляции между физиологическими показателями и успехом в продаже товаров. Неудивительно, что доверие к психофизиологии пошатнулось. «Эти методы дают интересные результаты, — говорит Дж. Дэн, вице-президент нью-йоркской рекламной фирмы Young & Rubicam, — но никто не знает, что с ними делать».

По-настоящему рабочим остается только один метод — регистрация

движений глаз, которая, однако, фиксирует не интерес потребителя, а лишь то, как он рассматривает объявление. Однако многие сегодня критикуют «лабораторный» подход к рекламе как таковой. По словам сотрудника из другого нью-йоркского агентства Chiat/Day, «глаза человека не могут сказать больше, чем сам человек».

### *Анатомия человека и компьютер*

С ПОМОЩЬЮ разрабатываемой специалистами шт. Колорадо первой, как они называют, трехмерной базы данных по анатомии человека на экране компьютера, обрабатывающего изображение, можно будет получать очертания любой части человеческого тела. В будущем все хранящиеся в такой базе данные, по видимому, можно перевести на оптические диски. Они могут широко использоваться студентами-медиками, хирургами, рентгенологами и другими специалистами, так как позволяют рассматривать человеческое тело под всевозможными углами.

Чтобы построить эту систему, ее разработчики из медицинского научно-исследовательского центра Колорадского университета в Денвере во главе с Д. Уитлоком фотографировали последовательные плоские срезы на теле замороженного трупа; тонкие слои ткани удалялись специальной машиной. Изображение на каждой фотографии затем переводилось компьютером, обрабатывающим изображения, в цифровую форму и записывалось в память. В настоящее время исследователи завершили секционирование, фотографирование и перевод в цифровую форму изображения тазобедренного и коленного суставов.

Машина для послойного разрезания тела, изобретенная Уитлоком и его коллегами, способна удалять слои ткани толщиной в четверть миллиметра. Когда из таких послойных срезов в компьютере формируется единое трехмерное изображение, разрывы между деталями на соседних слоях становятся неразличимыми. В результате получается полная трехмерная анатомическая картина человеческого тела, настолько детальная, что можно наблюдать строение отдельных узлов мышечных волокон.

Такие детальные изображения, которые компьютер может представить в их естественной окраске, помогут хирургам составлять план операции. Они предоставят также в распоряжение врачей необходимую основу для интерпретации изображений

участков тела пациентов, получаемых при обследовании их на томографах. Поскольку компьютеризованная анатомия позволяет также детально исследовать структуру и направление мышечных волокон, появляется возможность анализа механического действия суставов. Интерес к новой разработке проявила национальная футбольная лига, поскольку специалисты считают, что она может способствовать лучшему лечению травмированных суставов. Сотрудники Национального управления по авиации и исследованию космического пространства (НАСА), работающие над созданием устройств электронной мышечной стимуляции для парализованных пациентов, могут воспользоваться новой базой данных, чтобы определить, какие мышцы играют главную роль в том или ином движении.

В настоящее время Уитлок занят маркировкой и раскрашиванием отдельных мышц с тем, чтобы пользователь базы данных мог дать компьютеру команду показать любую нужную ему мышцу. Пока эту работу приходится делать вручную, пользуясь методами мультипликации, разработанными еще на киностудиях Уолта Диснея. По словам В. Спитцера, одного из членов группы, они надеются в конечном итоге создать алгоритмы, которые позволят компьютеру находить и показывать по команде пользователя такие объекты, как отдельный нерв или артерия.



КОЛЕННЫЙ СУСТАВ ЧЕЛОВЕКА в трехмерном изображении, полученном с помощью компьютеризованной базы данных, разработанной в Колорадском университете в Денвере.

# Сила тяжести и кровообращение у змей

*Когда змея ползет вверх по дереву или принимает вертикальное положение, ее кровеносной системе приходится функционировать в условиях значительного градиента давления. Влиянием силы тяжести можно объяснить различия в системе кровообращения у древесных и морских змей*

ХАРВИ Б. ЛИЛЛИУАЙТ

**СИЛА ТЯЖЕСТИ** действует везде. И все животные и растения так или иначе приспособлены к ней. Деревья могут быть очень высокими — более 100 м — и тем не менее соки достигают верхушки кроны. А на дне океана на глубине около 6000 м живые существа каким-то загадочным образом переносят давление столба жидкости более 500 кг/см<sup>2</sup>. Неудивительно, что подобные примеры адаптации к действию силы тяжести с давних пор привлекают внимание ученых.

У наземных животных гравитация предъявляет специальные требования к сердечно-сосудистой системе. Особенно это касается крупных животных, способных принимать вертикальное положение. Поскольку устройство системы кровообращения животного обусловлено образом его жизни и степенью влияния гравитационных сил, некоторые животные оказались очень удобными объектами для изучения регуляции кровообращения. В качестве примера можно привести жирафа. Голова у него расположена намного выше сердца, и поэтому для того чтобы кровь доставлялась к мозгу, требуется очень высокое артериальное давление. Однако змеи, наверное, превосходят всех позвоночных по выраженности и разнообразию адаптационных механизмов сердечно-сосудистой системы, направленных на преодоление силы тяжести.

Вообще змеи на редкость хорошо приспособлены к условиям своего существования. В ходе своей эволюции, насчитывающей более 100 млн. лет, эти животные достигли большого разнообразия и заняли множество экологических ниш. Сегодня в мире насчитывается около 16 семейств и 2700 видов змей, размеры тела, тип местообитания и особенности поведения которых широко варьируют. Не-

которые змеи ведут исключительно водный образ жизни, другие — наземный, многие обитают на деревьях.

Такое разнообразие обусловлено отчасти тем, что у змей сложились удивительно эффективные механизмы регуляции кровообращения, позволяющие перекачивать кровь против направления силы тяжести. Так, крапчатый полоз в поисках яиц в птичьих гнездах способен лазать прямо вверх по стволу дерева, а древесный удав, преследуя на дереве добычу, может висеть вниз головой. Ни то ни другое не было бы возможно, если бы сердечно-сосудистая система не могла обеспечивать адекватное кровообращение при отклонении тела от горизонтального положения.

Для того чтобы понять, почему сила тяжести предъявляет такие требования к сердечно-сосудистой системе, удобно рассматривать кровеносные сосуды как цилиндрические трубки. Если такую трубку наполнить водой, закупорить и поставить на один из торцов, то вес столба воды в ней создаст вертикальный градиент давления, которое будет наименьшим у верхнего торца, наибольшим — у нижнего, а в области середины трубки оно при переворачивании существенно не изменится. Если же вместо жесткого цилиндра взять резиновую трубку, то под действием столба воды она внизу раздуется и, может быть, даже лопнет. Давление, обусловленное силой тяжести, называют гравитационным (применительно к жидкости — гидростатическим.) Это давление существует в любом непрерывном столбе жидкости, независимо от того, движется жидкость или нет; оно возрастает с глубиной. Если жидкость приведена в движение каким-либо насосом (как в сердечно-сосудистой системе), то ее общее давление увеличивается: давление, создаваемое этим насосом (сердцем), склады-

вается с гравитационным.

Гравитационное давление может вызывать серьезные нежелательные явления у крупных животных, не имеющих физиологических механизмов адаптации к нему. Повышенное давление в сосудах в нижних отделах туловища приводит к скоплению в них крови; при этом стенки сосудов растягиваются, и плазма может выходить из капилляров в ткани. По мере накопления крови в нижних отделах туловища снижается центральное артериальное давление (давление крови в крупных артериях) и в результате ослабляется кровоснабжение жизненно важных органов. Если бы у змей происходило выраженное скопление крови, то все они (кроме самых мелких) были бы вынуждены либо вести водный образ жизни, либо находиться исключительно в горизонтальном положении. Однако совершенно ясно, что на самом деле это не так.

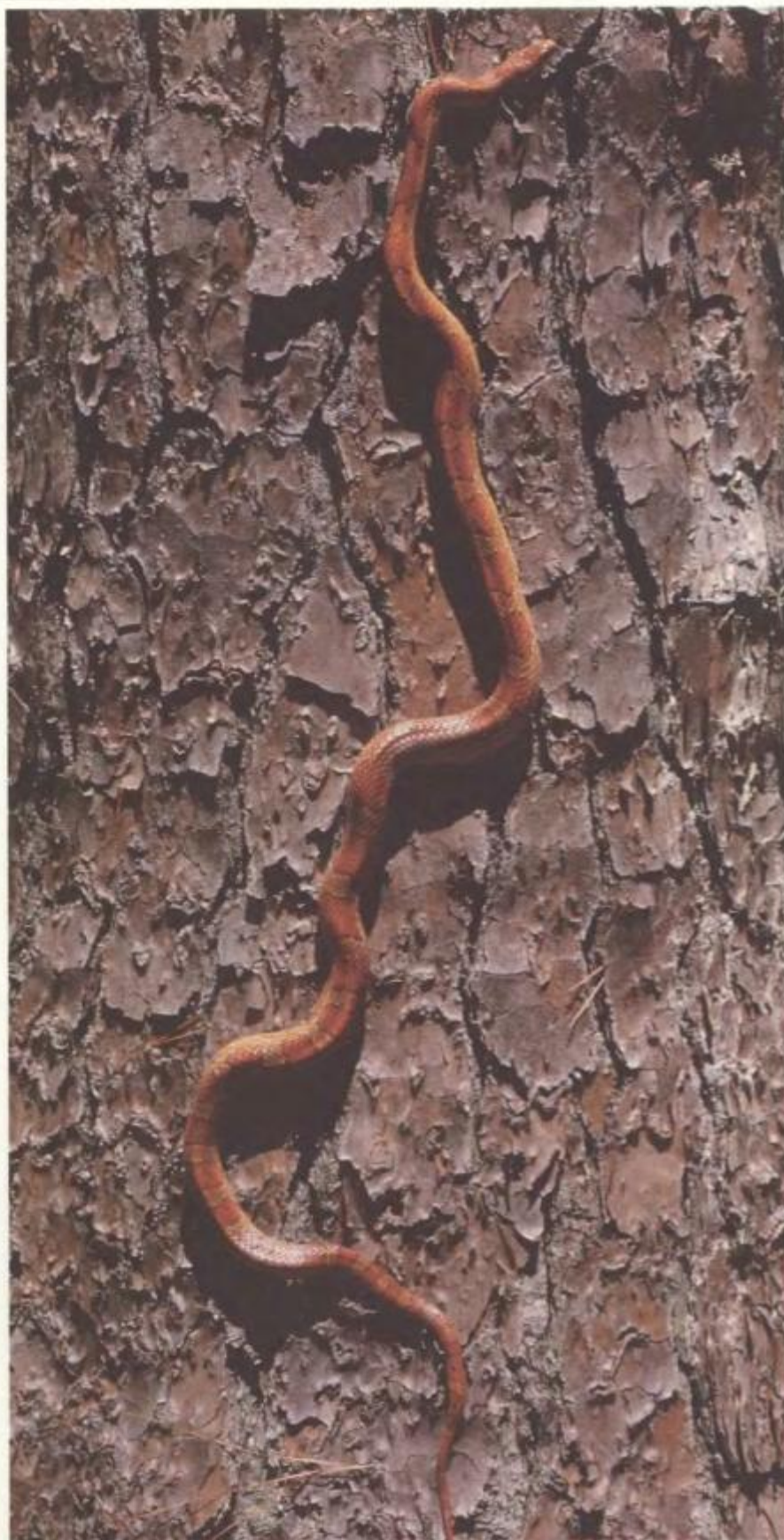
**Л**ЕТ десять с небольшим назад я заинтересовался способностью змей обеспечивать адекватное кровообращение при вертикальном положении тела. Почему у длинной змеи не наступает коллапс, когда она ползет вверх по стволу дерева? Обстоятельства счастливо сложились так, что мне удалось исследовать этот вопрос, когда я временно работал в Австралии (по приглашению читал лекции в Университете Монаш). Там мне довелось сотрудничать с Р. Сеймуром, который сейчас работает в Аделаидском университете. Мы занялись сравнительным анализом влияния силы тяжести на давление в кровеносном русле у змей. Объектами этих исследований были морские змеи, которые, когда они пребывают в воде, практически не испытывают действия силы тяжести; наземные змеи, не лазающие по деревьям, а ползающие по земле преимуществен-

но в горизонтальном положении; и, наконец, древесные змеи, которым часто приходится принимать вертикальное положение при лазании вверх или вниз по стволу дерева.

Морские змеи (близкие родственники кобр и коралловых аспидов) обитают в тропических районах Тихого океана. Особенно много этих животных в районах коралловых рифов, окружающих Австралию, где их можно ловить сачком. При плавании в океане тело поддерживается соленой водой, плотность которой примерно равна плотности крови. В таком «взвешенном» состоянии змее достаточно соответственно изменить объем легких, и она становится практически невесомой (как предметы в космосе). Теоретически у морских змей сила тяжести должна очень мало влиять на кровообращение. В самом деле, вертикальным градиентам давления в кровеносных сосудах противодействуют такие же градиенты в окружающей воде, поэтому стенки сосудов не стремятся растягиваться и распределение крови независимо от положения тела должно быть всегда примерно одинаковым.

Морские змеи произошли от наземных, и нам было интересно узнать, сохраняются ли физиологические механизмы, противодействующие силе гравитации, если извлечь такое животное из привычной для него среды, поддерживающей тело. Отловленных в естественных условиях змей доставляли в лабораторию, охлаждали колотым льдом и давали на короткое время наркоз. Под наркозом в кровеносные сосуды вводили один или несколько катетеров — тонких гибких трубок, заполненных физиологическим раствором; с помощью этих катетеров впоследствии измеряли изменения кровяного давления. Пока животное еще находилось под наркозом, его помещали в длинную пластмассовую трубку, укрепленную так, что ей можно было придавать различное положение.

Располагая трубку под разными углами от горизонтального положения (при этом голова змеи была поднята вверх), мы могли оценить влияние силы тяжести на сердечно-сосудистую систему животного. С помощью катетера, введенного в спинную аорту и соединенного с электронным датчиком давления, регистрировалось давление в области середины тела. По аналогии с замкнутой трубкой мы предполагали, что если змея не приспособлена к действию силы тяжести, то давление в центре туловища при переходе в вертикальное положение будет снижаться, и падение давления в области головы окажется



КРАПЧАТЫЙ ПОЛОЗ *Elaphe guttata*, обитающий в Северной Америке, обладает длинным и узким телом, что типично для многих змей, ведущих древесный и полудревесный образ жизни. Благодаря этим и другим анатомическим особенностям, в частности кровеносной системы, у таких змей поддерживается нормальное кровообращение при вертикальном положении тела.

нескомпенсированным. Регистрировалась также частота сердечных сокращений для того, чтобы знать, не компенсируется ли падение артери-

ального давления учащением ритма сердца.

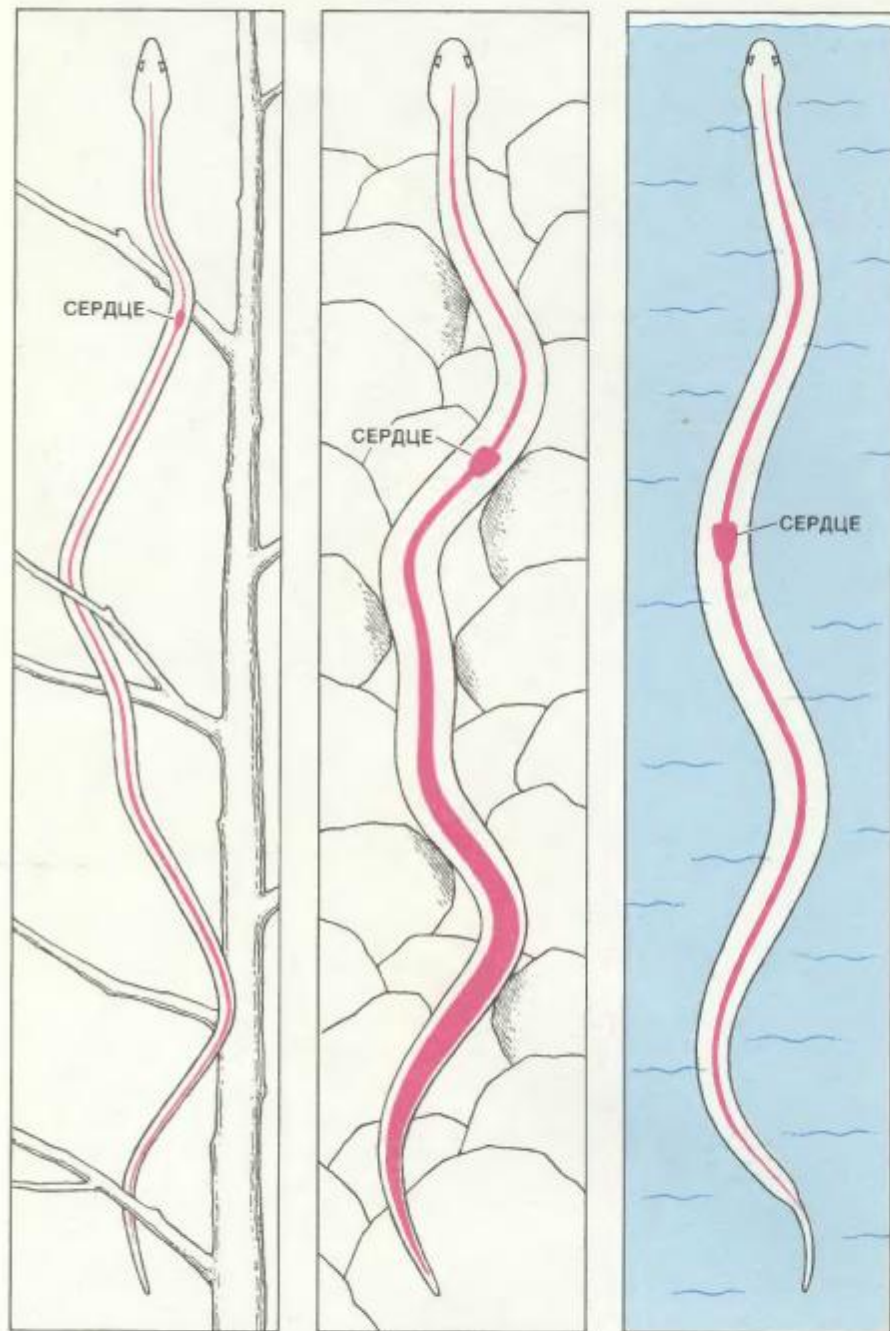
В этих опытах получились весьма интересные результаты. По мере то-

го как угол отклонения трубки со змеей от горизонтального положения увеличивался, давление в области середины ее туловища снижалось. Значит, кровь скапливалась в хвостовой части тела, оказывавшейся внизу. Частота сокращений сердца возрастала, однако это не компенсировало падение давления и в области головного мозга оно снижалось до нуля или даже становилось отрицательным. По-видимому, кровеносные сосуды в передней части тела спадались, и уже не могли обеспечить достаточный кровоток.

Когда такие опыты провели с наземными змеями, результаты оказались совершенно другими. Я изучал австралийскую тигровую змею *Notechis scutatus*, которая, по мнению ряда систематиков, относится к тому же семейству аспидовых (Elapidae), что и морские змеи. Этот вид обитает в Австралии, где населяет самые различные местообитания, включая поймы рек и дождевые леса. Когда тигровую змею помещали в вертикальное положение с поднятой вверх головой, кровяное давление в области середины тела возрастало. В результате давление в сосудах головы лишь незначительно снижалось, и признаков недостаточности кровообращения не было. Это означало, что у наземных змей выработались физиологические механизмы, позволяющие регулировать артериальное давление.

**В РАБОТАХ**, последовавших за этими первыми экспериментами, мы установили, что все наземные змеи обладают способностью регулировать кровяное давление, однако выражена эта способность у змей по-разному, в зависимости от образа жизни. Так, у древесных змей артериальное давление в вертикальном положении поддерживается лучше, чем у видов, не лазающих по деревьям. Этим различиям соответствуют и значения кровяного давления, свойственные разным видам змей.

Мы с Сеймуром измеряли артериальное давление в состоянии покоя у змей различных видов и обнаружили, что эта величина тесно связана с поведением и характером местообитания животного. У представителей изученных нами 5—6 древесных видов артериальное давление при горизонтальном положении тела составляло от 50 до 90 мм рт. ст., а у 5—6 водных видов оно было гораздо ниже — от 15 до 39 мм рт. ст. У змей, ведущих полуводный образ жизни, например, у морских змей, откладывающих яйца на суше, а также у наземных змей, не лазающих по деревьям (например, гремучей), оказались промежуточные



**ВЛИЯНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО ПОЛОЖЕНИЯ** тела на сердечно-сосудистую систему (красная) у типичной древесной змеи (слева), не лазающей по деревьям наземной змеи (в середине) и морской змеи (справа). У древесной змеи сердце расположено близко к голове, поэтому головной мозг хорошо снабжается кровью; накопление же крови в хвостовой части незначительно благодаря тому, что тело тонкое и кожа плотно прилегает. У наземной змеи (такие змеи обычно не ползают по вертикальной поверхности, но здесь она изображена на отвесной скале) сердце располагается ближе к середине тела. Накопление крови в нижней части тела довольно выражено, потому что сосуды растяжимы и при увеличении давления расширяются; в связи с этим кровообращение менее эффективно, чем у древесных змей. У морской змеи сердце расположено приблизительно в середине тела; накопление крови в нижних отделах не происходит, так как расширению сосудов под действием кровяного давления препятствует гравитационное давление окружающей среды.

между этими значениями кровяного давления.

Имелись основания предполагать, что высокое артериальное давление у древесных змей обусловлено главным образом большим тонусом мышц сосудистой стенки. При сокращении этих мышц сосуды сужаются, что приводит к повышению сопротивления кровотоку и увеличению артериального давления. Каковы бы ни были его причины, при более высоком артериальном давлении меньше вероятность того, что действие силы тяжести при вертикальном положении змеи головой вверх вызовет нарушение кровообращения. Так, если морскую змею длиной около метра извлечь из воды и поместить в вертикальное положение, то давление в сосудах головы пассивно уменьшится на 39 мм рт. ст. и эти сосуды спадутся. У древесной же змеи в таких условиях давление в сосудах головы будет все еще в пределах 11—51 мм рт. ст. (Подчеркнем, что в данном примере рассматриваются лишь пассивные изменения давления: из нормального артериального давления в покое вычитается величина гравитационного давления, возникающего при переходе в вертикальное положение; здесь не учитываются другие факторы, влияющие на давление, например насосная деятельность сердца.)

**П**ОСЛЕ того как было установлено, что кровяное давление у змей зависит от видовых экологических особенностей, мне захотелось изучить явление скопления крови под действием силы тяжести у разных видов. (Эти эксперименты я проводил в Канзасском университете.) Чтобы измерить объем хвоста змеи при переходе ее в вертикальное положение, я помещал хвост в небольшую трубку и герметизировал ее. Остальное тело животного заключалось в более крупную пластиковую трубку, соединенную с таким же осевым устройством, какое мы использовали в экспериментах, описанных выше. Маленькая трубка была соединена с плетизмографом — прибором, измеряющим изменения объема по изменениям давления воздуха. Если в результате накопления крови объем хвоста змеи увеличивается, то должно возрастать давление в этой трубке, и плетизмограф будет регистрировать изменения объема в процентах.

У змей с плохо развитыми физиологическими механизмами поддержания артериального давления при переходе тела в вертикальное положение жидкость накапливается в хвосте и соответственно изменяются его размеры. У животных же с хорошей ре-



МОРСКАЯ ЗМЕЯ в водах Тихого океана близ острова Фиджи. Плывущее животное в морской воде практически невесомо, поэтому не испытывает действия силы тяжести. Если же такую змею извлечь из воды и придать ей вертикальное положение, у нее может возникнуть недостаточность кровообращения.



ГРЕМУЧАЯ ЗМЕЯ *Crotalus viridis*, как и многие другие наземные змеи, иногда принимает частично вертикальное положение, например, когда готовится к броску. При этом кровеносная система испытывает дополнительный градиент гравитационного давления, но механизмы регуляции обеспечивают, хотя бы временное, противодействие ему.

гуляющей объем хвоста увеличивался незначительно. Оказалось, что скопление крови в нижней части туловища под действием силы тяжести у древесных змей по меньшей мере на 30% меньше, чем у водных и тех наземных, которые не лазают по деревьям. У морских змей оно было значительным; это позволяет понять, почему у таких змей при переходе в вертикальное положение давление в области середины тела падает: из-за накопления крови

снижается ее количество, возвращающееся к сердцу, и вследствие этого уменьшается центральное артериальное давление.

Я продолжил исследования в этом направлении в сотрудничестве с К. Галлахером в Калифорнийском университете в Сан-Диего. Мы вводили большеглазому полозу, ведущему полудревесный образ жизни, микросферы (бусинки диаметром 25 мкм), меченные радиоактивным изотопом.

Микросферы задерживаются в капиллярах в количестве, пропорциональном кровотоку через эти капилляры. Затем сравнивали радиоактивность различных тканей и крови, взятой из артерии, чтобы оценить объем крови, поступающей к различным органам.

Мы обнаружили, например, что если держать полоза под углом  $45^\circ$  головой вверх, то кровоснабжение многих органов и мышц задней половины тела уменьшается, а важнейших органов передней части тела — в том числе легких, сердца и головного мозга — в основном не меняется. Такое перераспределение крови обусловлено вазоконстрикцией, т. е. сокращением гладкомышечных волокон стенок кровеносных сосудов. Благодаря избирательной вазоконстрикции сужаются определенные сосуды (в данном случае преимущественно задней половины тела), и тем самым повышается давление в области середины тела змеи и усиливается кровоток в тех тканях, сосуды которых сузились в меньшей степени. То же самое происходит у человека и других крупных млекопитающих, когда тело внезапно переходит из горизонтального положения в вертикальное.

Я рассмотрел здесь физиологические сдвиги, происходящие у змей при переходе в положение головой вверх. Вспомним, однако, что некоторые змеи могут пребывать и в положении головой вниз, например сползая по отвесной поверхности или свешиваясь с ветки дерева. Какие же механизмы позволяют в этих случаях поддерживать кровоснабжение хвостовой части тела и избежать чрезмерного давления в сосудах головы?

Оказывается, в положении головой вниз происходят обратные процессы. Частота сердечных сокращений снижается, а гладкие мышцы кровеносных сосудов расслабляются, и это частично сводит на нет гравитационное увеличение давления в области головы. Поскольку же объем вен головы мал по сравнению с венами задней части тела, а мозг заключен в твердую черепную коробку, накопление крови здесь незначительно.

**СУЩЕСТВУЮТ** и другие механизмы адаптации змей к различным условиям обитания. Так, определенные анатомические особенности (в частности, расположение сердца) тесно связаны с образом жизни. Поскольку змеи в ходе эволюции утратили конечности, у них нет грудного (плечевого) пояса, и поэтому расположение сердца не ограничено так, как у большинства четвероногих. У млекопитающих, например, из-за костного каркаса плечевого пояса сердце «вы-



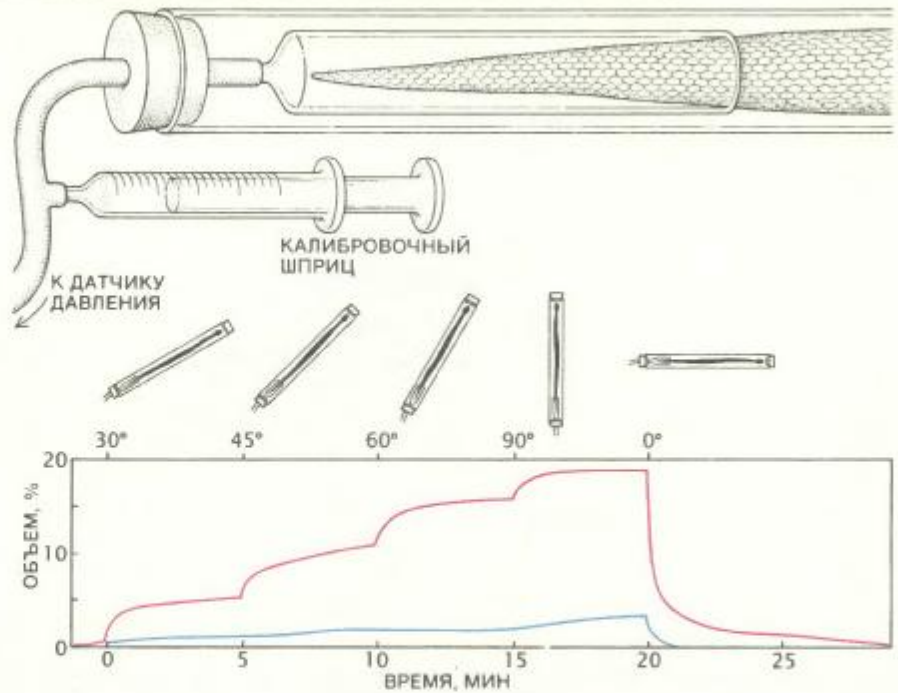
**УСТРОЙСТВО** для изучения влияния гравитационного давления на кровообращение у змей представляет собой пластмассовую трубку, которую можно устанавливать под различным углом. Животному вводят в спинную аорту катетер, соединенный с датчиком, который измеряет кровяное давление в области середины тела. Змею помещают в трубку и придают ей различное положение. Здесь изображена морская змея, наклоненная под углом в  $45^\circ$  головой вверх. Давление падает, так как кровь скапливается в нижней (задней) половине тела.

нуждено» располагаться в грудной полости. У змей же концы ребер свободны, и цилиндрическая полость тела на протяжении всей его длины не перегородена какими-либо костными образованиями. Поэтому у водных змей сердце может располагаться в области середины тела, и при таком положении уменьшается работа на передвижение крови в оба конца тела; у не лазающих по деревьям наземных видов расстояние от головы до сердца составляет примерно 25%, а у древесных — 15% общей длины тела. Уменьшение расстояния от сердца до головы обеспечивает достаточное кровоснабжение мозга независимо от положения тела.

Сотрудник моей лаборатории Дж. Дональд недавно показал, что у полозов и других древесных змей кровеносные сосуды, расположенные сзади сердца, богато иннервируются, тогда как спереди от сердца нервных окончаний в сосудах значительно меньше. И в тех и других сосудах могут быть представлены нервы различных типов. Их назначение в точности неизвестно, однако сам характер иннервации кровеносных сосудов таков, что нервы, вероятно, играют важную роль в регуляции тонуса мышц в стенках сосудов, особенно в задней части тела, где кровь может накапливаться.

Нервы, управляющие вазоконстрикцией, у большинства животных входят в состав рефлекторных дуг, начинающихся от специальных сенсорных органов, называемых барорецепторами. Локализация барорецепторов у змей пока не установлена, однако считают, что они расположены в сердце и около него, как у многих других позвоночных, у которых они обнаружены. Барорецепторы находятся в стенках кровеносных сосудов и возбуждаются, когда давление в этих сосудах повышается, и стенка растягивается. Поступление нервных импульсов от барорецепторов приводит к изменению ритма сердца и сокращению гладких мышц сосудов; эта реакция представляет собой рефлекс, центральная часть которого расположена в головном мозге. Одновременное изменение деятельности сердца и мускулатуры сосудов приводит к тому, что артериальное давление возвращается к прежнему уровню. Такой тип регуляции называется отрицательной обратной связью.

Если барорецепторы действительно локализованы в сердце или около него, то расположение сердца в передней части тела у древесных змей должно давать еще одно преимущество. Действие гравитационного давления наиболее выражено в области концов тела, и поэтому чем ближе ба-



НАКОПЛЕНИЕ КРОВИ в нижней части тела, обусловленное действием силы тяжести, измеряют плетизмографом. Хвост змеи помещают в небольшую герметично закрытую трубку, соединенную с датчиком, регистрирующим изменение давления. С помощью точного шприца изменяют давление в трубке, уменьшая или увеличивая ее объем на известную величину. Таким образом изменения давления в трубке калибруются; результаты калибровки наносят на график (внизу). У гремучей змеи (*Crotalus viridis*), не приспособленной к лазанью по деревьям, по мере увеличения угла наклона объем хвоста существенно возрастает из-за накопления крови (красная кривая). Напротив, у лазающей по деревьям змеи *Pituophis melanoleucus* объем хвоста увеличивается незначительно (голубая кривая). Когда животное возвращается в горизонтальное положение, объем хвоста резко падает; это означает, что по меньшей мере 75% жидкости скапливается в кровеносных сосудах, но не выходит в окружающие ткани.

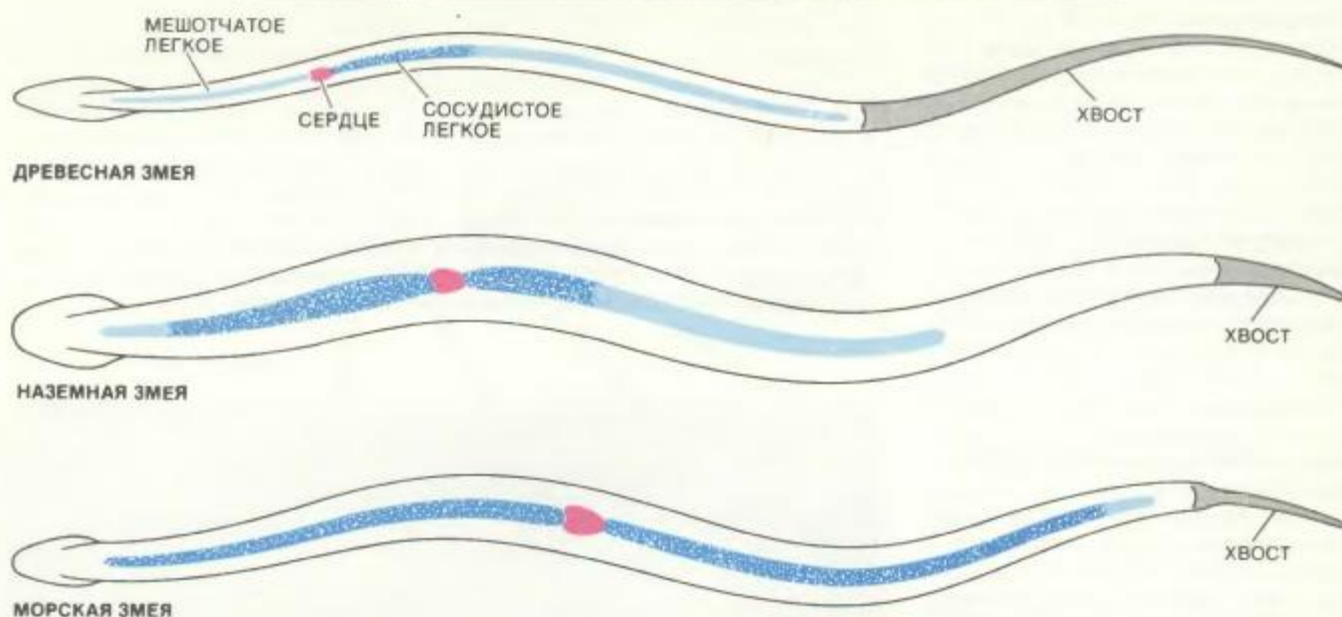
рорецепторы к голове, тем эффективнее с их помощью можно контролировать изменения, обусловленные гравитационными явлениями, и сохранять нормальные условия для работы мозга.

Однако в расположении сердца очень близко к голове есть и два небольших недостатка. Во-первых, когда древесная змея свешивается с ветки головой вниз, могут возникнуть трудности с поддержанием кровоснабжения хвостового отдела (хотя это не столь важно, как для мозга). Во-вторых, при положении головой вверх кровь от хвоста должна возвращаться к сердцу, преодолевая тяжесть почти всего столба крови в венах. Как же природа обошла эти трудности?

У змей, в отличие от млекопитающих, в венах нет клапанов, препятствующих обратному току крови. Вместо этого у них имеются три механизма, способствующих передвижению крови вверх: сокращение гладких мышц сосудов по сигналам от барорецепторов; сокращение скелетных мышц, сдавливающее вены; наконец,

плотная кожа. Когда древесная змея долго ползет вверх, она периодически останавливается и извивается на месте, так что по телу от задней части к голове пробегают волны мышечных сокращений. Эти сокращения сдавливают вены, продвигают кровь вперед и повышают центральное венозное давление (т. е. давление в крупных венах) в области сердца. В результате поток венозной крови к сердцу увеличивается, и оно может эффективно поддерживать артериальное давление.

Сходные поведенческие реакции можно вызвать и в лабораторных условиях. Когда я выпускал у большезлазого полоза 30—50% общего объема крови, вследствие чего артериальное давление снижалось в среднем на 36%, животное начинало делать волнообразные движения. В результате давление в сосудах головы возвращалось примерно к нормальному уровню. Такие движения не удается вызвать у водных змей; это означает, что данная реакция выработалась в ходе эволюции у древесных змей специально для поддержания кровообра-



СТРОЕНИЕ ЛЕГКИХ у змей различно в зависимости от образа жизни. У древесных змей (вверху) сосудистое легкое (часть, богатая кровеносными сосудами) короткое (синее) и расположено позади сердца (красное). На обоих концах сосудистое легкое переходит в длинное мешотчатое лег-

кое (голубое), в котором нет кровеносных сосудов, участвующих в газообмене. У наземных змей, не лазающих по деревьям (в середине), сосудистая часть легкого близ сердца длиннее, а у морских змей (внизу) легкое состоит почти целиком из сосудистой ткани.

шения. Другие движения тела также улучшают течение крови, однако обычно они не столь эффективно повышают артериальное давление, как типичные волнообразные движения.

**В**ЕРОЯТНО, в противодействии гравитационному давлению важным фактором является также общее строение тела. У древесных змей тело более тонкое, мышечный тонус выше и кожа прилегает плотнее. Небольшая округлость тела и высокая плотность тканей препятствуют растяжению, связанному с накоплением крови. Тому же принципу следуют летчики, применяя при маневрах на высоких скоростях высотные компенсирующие костюмы. Аналогично у высоких млекопитающих — у человека, лошадей, жирафа — кожа и соединительная ткань ног плотные, что препятствует расширению сосудов; мелким млекопитающим, скажем кроликам, это не свойственно.

У водных и не лазающих по деревьям наземных змей, на сердечно-сосудистую систему которых гравитационное давление практически не действует или действует в минимальной степени, тело более рыхлое и кожа прилегает не так плотно. В качестве примера можно привести наземную змею *Python regius* (королевский питон), у которой отношение окружности тела к его длине в 3 раза выше, чем у ее древесного родственника — удава *Corallus enhydris*.

Такую связь между анатомиче-

ским строением и условиями жизни можно проследить и у представителей других семейств. Древесные змеи семейства ужевых (*Colubridae*, к которому относится большинство наиболее распространенных змей Северной Америки, в том числе подвязковая змея и королевская змея) могут быть в 10 раз тоньше, чем их наземные родственники.

Размеры и форма легких у змей также отражают условия их жизни и поведения. Многие ткани организма могут отекать под действием гравитационного давления, однако далеко не во всех вероятностей развития серьезных нарушений при задержке жидкостей так высока, как в легких. При скоплении в легких жидкости увеличивается диффузионное расстояние между кровью и воздухом и тем самым затрудняется перенос дыхательных газов. Чтобы фильтрация жидкости в легочную ткань была меньше, у всех четвероногих позвоночных, а также у змей, кровяное давление в легких ниже, чем в других тканях организма.

У большинства змей в процессе эволюции легкие превратились в одиночную длинную перепончатую камеру. В горизонтальном положении такое удлиненное легкое не создает каких-либо особых проблем, однако древесным змеям приходится справляться с рядом трудностей. В губчатых перепончатых стенках змеиных легких газообмен происходит в радиальных кармашках, аналогичных альвеолам млекопитающих. Область га-

зообмена богата снабжена кровеносными сосудами и носит название сосудистого легкого. Остальная часть легкого, размеры которой у змей разных видов различны, может совсем не содержать сосудов, в которых происходит газообмен, и называется мешотчатым легким.

Когда змея находится в вертикальном положении, вследствие силы тяжести давление увеличивается как в артериях, так и в венах, образующих сплошной столб жидкости, под действием которого длина сосудистого легкого возрастает. Увеличенное давление передается в капилляры и возникает угроза тяжелого отека легкого. Поскольку вероятность отека прямо пропорциональна длине легочных сосудов, ее уменьшение было бы лучшим решением проблем, связанных с силой тяжести. И действительно, изучение анатомии легких у разных змей подтвердило, что длина сосудистого легкого различна в зависимости от условий обитания.

У водных змей сосудистая легочная ткань может простирается почти до конца полости тела (у некоторых видов имеется небольшая мешотчатая «верхушка»). У древесных же видов длина сосудистого легкого гораздо меньше: она может составлять менее 10% от длины тела и обычно занимает небольшое расстояние сзади от сердца. Благодаря малой длине сосудистого легкого кровеносные сосуды легких у древесных змей лишь незначительно подвергаются гравитацион-



ному давлению, даже при вертикальном положении тела. Длина сосудистого легкого у наземных змей, не лазающих по деревьям, обычно имеет промежуточные значения.

Я изучал влияние гравитации на легкие у водных змей на примере морской змеи *Aipysurus laevis*. Чтобы измерять давление в легочных сосудах, под общим наркозом производилась катетеризация этих сосудов. Когда животные выходили из наркоза, их помещали во вращающиеся пластиковые трубки без воды. Как и следовало ожидать, кровяное давление в нижних отделах легких возрастало, по мере того как увеличивали угол наклона трубки. При последующем микроскопическом изучении легочной ткани обнаруживались признаки тяжелого отека и разрыв капилляров в нижних отделах легких. Эти признаки были тем сильнее выражены, чем больше был угол наклона, и, следовательно, длина вертикального столба жидкости. Если же змей поворачивали в соленой воде, таких изменений не наблюдалось. У морских змей в естественной для них среде отек легких не возникает даже при плавании в вертикальном положении, так как под действием давления воды участки легких спадаются и длина столба крови, контактирующего с внутрилегочным воздухом, уменьшается (спадение участков легких связано с тем, что при повышении гидростатического давления в окружающей среде газы в легких сжимаются).

**О**ПИСАННЫЕ здесь физиологические опыты свидетельствуют о том, что змеи благодаря удлинённой форме тела и разнообразным условиям обитания могут служить ценными моделями для изучения устройства и регуляции сердечно-сосудистой системы. В частности, переход к лазанию по деревьям потребовал существенных анатомических и физиологических изменений. Сердце переместилось вперед, а длина сосудистого легкого уменьшилась; регуляция артериального давления стала более жесткой; появилась специфика иннервации разных кровеносных сосудов; уменьшились окружность тела и растяжимость кожных покровов; наконец, выработались особые формы поведения, способствующие возврату венозной крови к сердцу. Если судить о змеях по устройству их сердечно-сосудистой системы, то следует признать, что они являются высокоспециализированными и хорошо адаптированными животными. Возможно, выяснив механизмы регуляции кровообращения у змей, легче будет понять, как влияет сила тяжести на человека, в частности, в космическом полете.

## Вниманию читателей!

### журнал ТИИЭР

(Труды Института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике —  
ежемесячный перевод журнала Proceedings of the IEEE)

ИМЕЕТСЯ В ПРОДАЖЕ  
И ВЫСЫЛАЕТСЯ НАЛОЖЕННЫМ ПЛАТЕЖОМ  
тематический выпуск

**АППАРАТНЫЕ И ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА  
ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ**  
(ТИИЭР, 1987, т. 75, № 9)

### Содержание

#### СБИС

Цифровые процессоры обработки сигналов серии TMS320

СБИС-процессор для обработки изображений

Процессор цифровой обработки сигналов для контрольно-измерительной аппаратуры

Машина поиска на графах: Архитектура СБИС для распознавания слитной речи и других приложений

Специализированный процессорный элемент цифровой обработки сигналов DSP56200

Параллельные СБИС для цифровой обработки сигналов с конвейерным выполнением операций над разрядами операндов

#### Системы

Спектроанализатор с БПФ для радиоастрономии

MUPSI: Мультипроцессорная система для обработки сигналов

Применение мультипроцессорных ЭВМ, управляемых данными, в цифровой обработке сигналов

Синхронные потоки данных в задачах ЦОС

Многопроцессорная система для интеллектуальной цифровой обработки сигналов

Автоматизированное проектирование

Автоматизированное проектирование интегральных КИХ-фильтров

Кремниевый компилятор схем цифровой обработки сигналов: Методология, реализация, применения

#### Алгоритмы

Алгоритмы дискретного преобразования Фурье по смешанным основаниям для векторных ЭВМ

Реализация алгоритмов цифровой фильтрации на основе конвейерных векторных процессоров

Матричные структуры для реализации итерационных алгоритмов

Программное обеспечение  
Универсальная программа для обработки сигналов SIG

#### Приложение

Краткий англо-русский словарь встречающихся в выпуске терминов по цифровой обработке сигналов

Цена номера 3 р. 30 к.

Выпуск можно приобрести в следующих магазинах Москвы:

Московский дом книги (пр. Калинина, 26, секция издательства «Мир»),  
магазин № 19 «Мир» (Ленинградский пр., 78).

У иногородних читателей заказы на отправку выпуска наложенным платежом принимает редакция журнала по адресу:  
129820, ГСП, Москва, И-110, 1-й Рижский пер., 2, издательство «Мир», редакция ТИИЭР.



# Перуанские каналы доинкского периода

*Строители в государстве Чимор сооружали оросительные каналы протяженностью более 70 км. Используя накопленный опыт, им удавалось приспосабливаться к изменчивым геологическим условиям*

ЧАРЛЗ Р. ОРТЛОФФ

**КАЗАЛОСЬ БЫ**, совсем несложно заставить воду течь вниз по склону горы, однако когда ее требуется подвести от горной реки к полям, удаленным на 40 км, то задача намного усложняется. Именно такую задачу пришлось решать древним строителям в государстве Чимор, которое владело северным побережьем современной территории Перу с 1000 г. н.э. до завоевания его инками. Чимор был «государством гидротехников»: в засушливых прибрежных районах у подножия Анд сельское хозяйство культуры Чиму\* полностью зависело от оросительных систем, поэтому индейцы чиму постепенно стали опытными гидротехниками и научились точно намечать трассы каналов и быстро строить эти сооружения.

Строителям чиму приходилось в полной мере использовать накопленный ими опыт, поскольку геологические условия, в которых они жили, были весьма изменчивы и это создавало угрозу для каналов. В результате тектонической и сейсмической активности в прибрежных районах Южной Америки, реки, берущие начало в Андах, постепенно меняют свое русло. По мере углубления нового русла реки приток воды из нее в каналы, построенные чиму, прекращался. Кроме того, теплое сезонное течение Эль-Ниньо вызывает в этих районах сильные, разрушительные ливни. Несмотря на все это, строители чиму находили способы продлить срок службы построенных ими каналов. В течение сотен лет они видоизменяли эти сооружения, используя новые конструктивные решения, позволявшие им приспосабливаться к меняющимся геологическим условиям. Опыт этих строителей был недавно по достоинству оценен в ходе первых крупномасштабных раскопок сооруженных ими каналов.

\* В современной историографии принято терминологически различать «государство Чимор» и «культура Чиму». — *Прим. ред.*

**РАЙОН**, который когда-то заселяли чиму, представляет собой почти прямоугольную прибрежную полосу на северном побережье Перу, прилегающую к Кордильере-Негра. Эта полоса простиралась примерно от Эквадора до Лимы. Реки, берущие начало в Андах и впадающие в Тихий океан, образовали здесь множество долин; именно в этих долинах и была сосредоточена сельскохозяйственная деятельность чиму. Вопрос о происхождении культуры Чиму пока остается нерешенным. Известно, что чиму успешно вели завоевательные войны с первых веков второго тысячелетия н.э. Они завоевали все другие группы, которые жили в долинах, прилегающих к их территории. Центр этой империи, включая столицу Чимора Чан-Чан, находился в долине реки Моче.

В период своего расцвета культура Чиму представляла собой аграрное общество, состоявшее из нескольких сословий. На высшей ступени находились верховный правитель и его приближенные. Следующую группу составляла относительно немногочисленная аристократия, затем — городская трудовая люд (слуги, мастера по металлу, керамике и другим материалам) и перевозчики грузов. Эти группы были сконцентрированы в основном в Чан-Чане. За пределами столицы жило низшее сословие — крестьяне, обеспечивавшие государство продовольствием.

Очевидно, именно последнее сословие было источником рабочей силы при строительстве каналов. Правителями в Чан-Чане была введена «трудова́я повинность»: часть крестьян привлекалась к строительству каналов, возделыванию заливных огородов, а также дальнейшей застройке столицы. После разметки трассы канала начиналось его строительство. Выемку грунта и очистку трассы от породы производили многочисленные бригады рабочих из 10—20 человек, основными орудиями которых

были бронзовые инструменты, каменные молотки, а также кирки с каменными лезвиями; грунт уносили в плетеных корзинах. Для удаления крупных валунов рядом с ними сначала разжигали костры, затем раскаленные валуны поливали водой, чтобы легче было расколоть их.

Вода текла по каналам обычно с ноября по май включительно, т.е. в период, когда в горах идут сильные дожди. Этой воды хватало, чтобы вырастить урожай многих сельскохозяйственных культур, включая бобовые, кукурузу, кабачки, тыквы, пряности, а также хлопок и различные плодовые культуры. Урожай выращивали на вспаханных полях, расположенных серпантинном вдоль канала, но с меньшим, чем у него, уклоном. От основных каналов вода поступала на поля по меньшим, отводным каналам. Чтобы предотвратить размывание полей, основные и отводные каналы не были соединены непосредственно. Вода попадала в отводные каналы через водосливы, когда ее уровень в основном канале повышался за счет временной запруды с помощью специальных щитов.

По этому общему принципу строителями чиму были сооружены многие системы каналов. В настоящей статье рассматриваются две такие системы, ближайшие к центру государства Чимор: система каналов в долине реки Моче, а также междолинный канал, по которому вода подавалась из долины реки Чикама (ближайшей к Моче с севера), в долину реки Моче. Эти две системы тесно связаны с историей столицы, а потому и с историей культуры Чиму. Кроме того, они свидетельствуют об изобретательности строителей каналов, которые могли приспосабливаться к неблагоприятным и изменчивым геологическим условиям.

**ВОЗМОЖНО**, самыми серьезными изменениями были те, которые приводили к постоянному уменьшению поступления воды в каналы. Эти

изменения были обусловлены взаимодействием больших литосферных плит. Близ побережья Южной Америки плита Наска погружается под большую Южно-Американскую плиту. Одним из результатов этого процесса, называемого субдукцией, является то, что западное побережье Южной Америки постепенно поднимается и изменяется. По мере поднятия прибрежных районов происходит углубление русел местных рек, в основном за счет вымывания ранее отложившегося ила. Этот процесс представлял угрозу для всей системы каналов, идущих от этих рек, поскольку вода в эти каналы поступала самотеком. Подъем прибрежных районов приводил также к изменению уклона протяженных участков некоторых каналов, вследствие чего течение воды в этих каналах могло менять направление на противоположное.

Были и другие неблагоприятные факторы окружающей среды. Подъем Тихоокеанского побережья приводил к тому, что песчаные отмели, скрытые ранее под водой, становились сушей. Ветры, дующие с океана,

переносили песок в глубь прибрежных районов. Образовывались большие дюны, передвигавшиеся в направлении от берега со скоростью в среднем около 1,5 м в год. Интересно, что пески также двигались в направлении к океану, причины этого «обратного» движения пока неясны. Верхний слой песка над горными породами мог значительно меняться за несколько сот лет. Большие разрушения несли наводнения, вызываемые Эль-Ниньо. Наиболее сильные наводнения происходят примерно каждые 50 лет. Например, в 1982 г. в Перу за 1 неделю выпало примерно 230 см осадков, которые размывли Панамериканскую автостраду и оставили обширные сельскохозяйственные районы без урожая. Такие наводнения, вероятно, причиняли значительные разрушения каналам Чимора.

За длительное время сооружения каналов строители придумали ряд методов, позволявших им противостоять этим трудностям. Самые первые каналы в долине реки Моче были построены предками чиму — людьми культуры Мочика, период расцвета

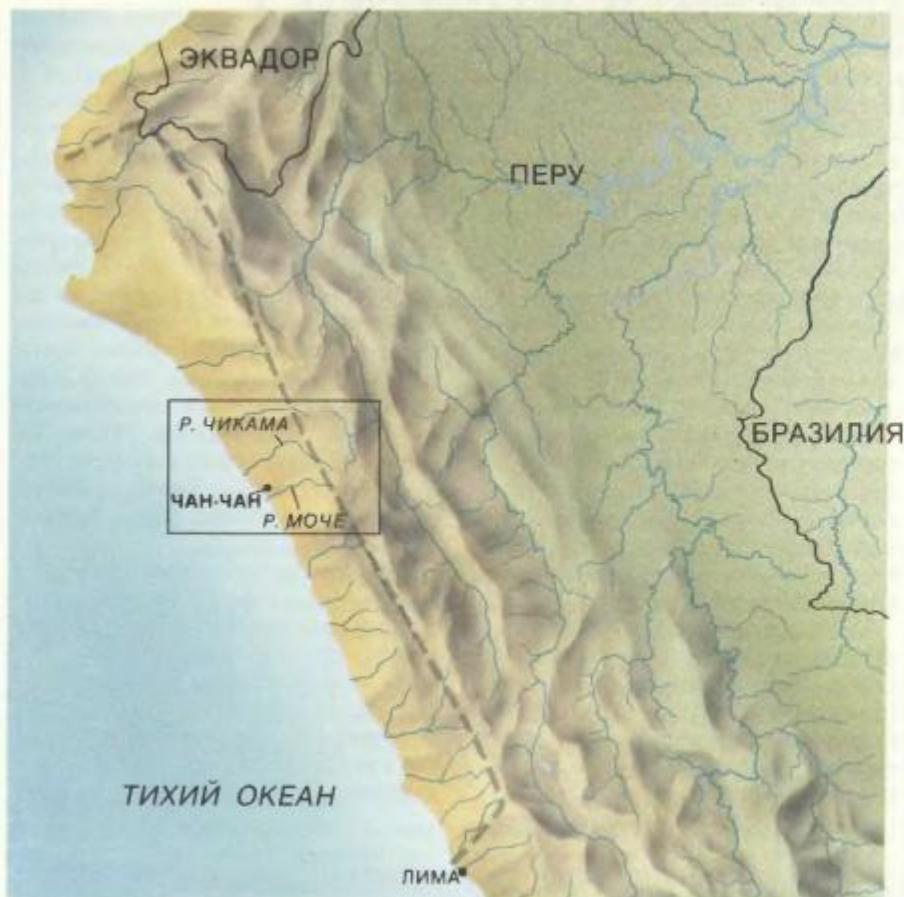
которой приходится на 100—800-е годы н.э. Эти каналы представляли собой глубокие траншеи, вырытые в песчаном грунте. Прокладывать траншеи на покрытой песками территории, имевшей небольшой уклон, было относительно несложно. Многие из них находились в долине реки Моче. Вода из траншей, начинавшихся от реки Чикама, орошала северную часть долины реки Моче, включая самый северный район Пампа-Уанчако, который представлял собой часть главной зерновой зоны вблизи Чан-Чана, известного под современным названием Трес-Пампас. Вода из траншей, начинавшихся от реки Моче, орошала поля в Пампа-Касике и прибрежных районах близ бывшей столицы Мочика.

По мере тектонического подъема и связанного с ним углубления русел рек система оросительных траншей утрачивала свою эффективность. Это была одна из главных проблем, которые строителям Чиму пришлось преодолевать на протяжении всего периода существования их культуры. Водозаборы, с помощью которых вода



**МЕЖДОЛИННЫЙ КАНАЛ** — одно из крупнейших сооружений народа чиму, жившего на северном побережье Перу до завоевания его инками примерно в 1450 г. Канал протяженностью 74 км соединял долину реки Чикама с долиной реки

Моче, центром культуры Чиму. Этот извилистый канал проходил в предгорьях Анд и имел небольшой уклон. Для поддержания такого уклона необходимы были террасы; одна из таких террас видна в центре.



ГОСУДАРСТВО ЧИМОР находилось на северном побережье Перу. Пунктирной линией обозначены владения Чимора в период его расцвета в 1300 г. В этой области люди жили в долинах рек, бравших свое начало в Андах. Речная вода для полива полей была доступна с ноября по май.



СЕТЬ КАНАЛОВ близ Чан-Чана, столицы Чимора. Первые каналы в долине реки Моче представляли собой «большие траншеи», проложенные через песчаную местность. Эти траншеи были заменены контурными каналами, имевшими небольшой уклон. В результате углубления русла реки, вызванного перемещением литосферных плит, водозаборы первых каналов на севере долины реки Моче (С3) и в южной ее части (Ю3) пересохли или оказались выше уровня воды, несмотря на многократные модификации каналов. Позже эти каналы были заменены системой каналов (Ю2, Ю1, С2, С1), которые орошали меньшие площади.

поступала из реки в канал, выкапывали на склоне речной долины. По мере углубления русла реки водозабор становился выше дна реки, и поступление воды в него уменьшалось. В конце концов водозабор мог стать выше уровня реки и вода в этом случае переставала попадать в него.

Для решения этой проблемы в системе траншей необходимо было углублять как водозаборы (чтобы вода снова могла поступать в них), так и сами траншеи, с тем чтобы вода текла в них самотеком. Однако это был временный выход из положения. Ведь для того, чтобы вода поступала на поля самотеком, оросительная траншея должна находиться выше уровня полей. После неоднократного углубления траншей все больше земель становились недоступными для полива. В результате, например, в районе Пампа-Касике все земли были заброшены.

Строители решили заменить траншейные каналы совершенно новым типом каналов — контурными каналами. Эти каналы повторяют контур ландшафта, благодаря чему в них поддерживается небольшой уклон. В отличие от простых траншей строительство контурных каналов требует тщательного выбора и разметки трассы. Необходимы также дополнительные сооружения, такие как акведуки, пересекающие устья каньонов, углубленных потоками дождевой воды, и террасы, позволяющие избежать большой крутизны каналов на неровных склонах предгорий Анд. Контурные каналы, вероятно, появлялись постепенно, в зависимости от обстоятельств, но в конце концов образовали основу эффективной системы.

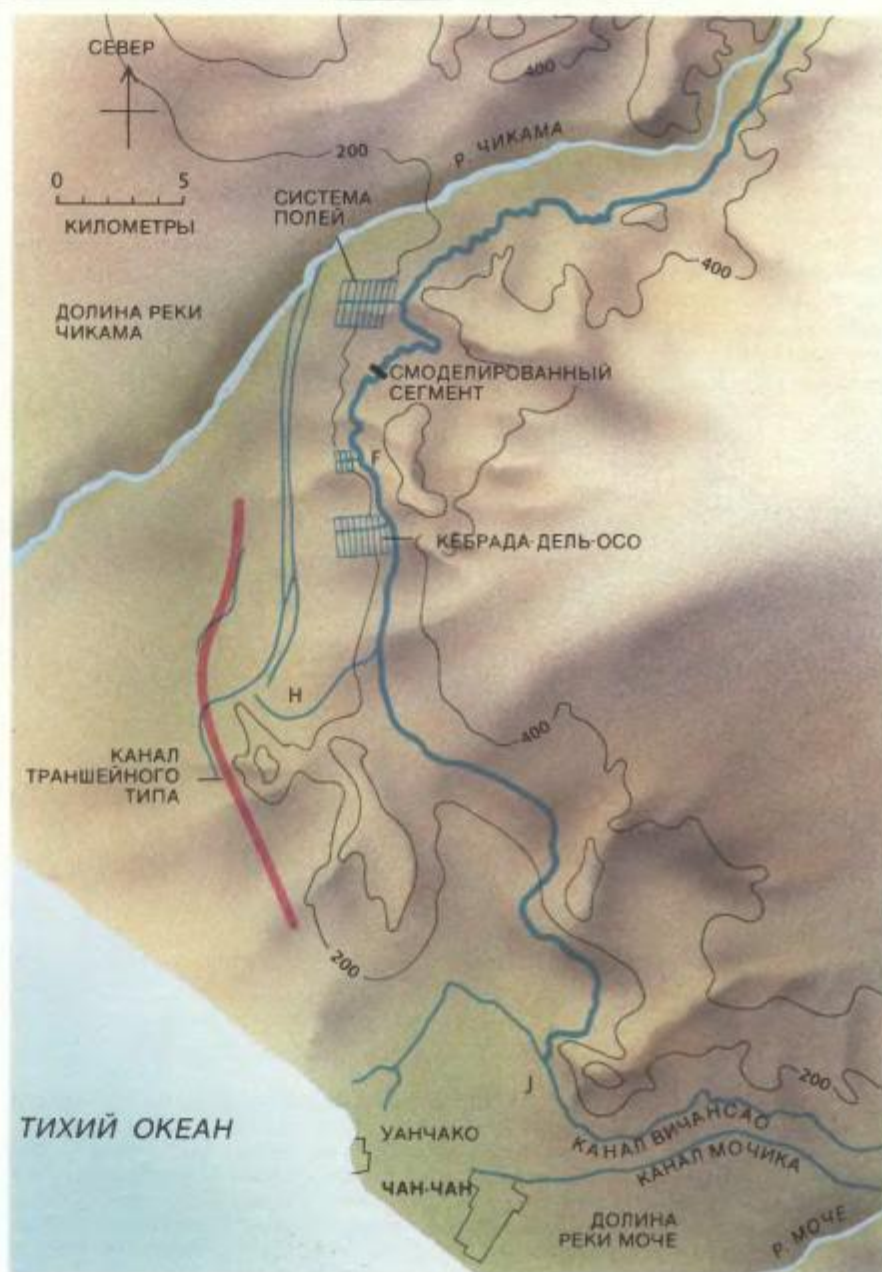
Одна из главных особенностей этой системы заключалась в том, что водозабор стали делать как можно выше по течению реки. Понятно, что чем выше располагался водозабор, тем больше была площадь орошения полей в долинах. Максимальная высота расположения водозабора определялась конфигурацией подстилающих пород в предгорьях Анд. Орудия чиму из камня и бронзы подходили для земляных работ на мягкой почве, представлявшей собой речные наносы, однако они были совершенно непригодными для прокладывания каналов в горах. Поэтому самая высокая точка расположения водозабора могла находиться там, где река Моче покидала предгорья и попадала в долину. Именно там и находились водозаборы первых контурных каналов чиму, предназначенных для орошения обширных земель. Эти каналы располагались по обе стороны реки Моче: северная система

каналов орошала плодородные земли Трес-Пампас, а южная — поля Пампы-Касике.

Контурные каналы новых систем вновь принесли воду на поля, которые были заброшены, после того как перестали действовать каналы траншейного типа. Однако для строителей контурных каналов углубление русла реки также представляло большую проблему. По мере углубления русла вода переставала поступать в водозаборы северной и южной систем каналов. Поскольку водозаборы специально размещали высоко по течению в предгорьях Анд, единственным решением проблемы было перенести их ниже по течению. Однако из-за особой конфигурации речной долины, а также препятствий, создаваемых подстилающими породами вдоль реки, каналы можно было отводить от реки только в определенных местах. Водозаборы как южной, так и северной систем перемещали вниз по течению дважды на различных этапах строительства каналов, каждый раз после того как в них переставала поступать вода.

Когда водозабор располагали ниже по течению, значительная часть земли становилась недоступной для полива и эту землю оставляли. Ко времени завершения строительства системы каналов чиму потеряли столько земли, что строители были вынуждены продлить оросительные каналы до некоторых районов Чан-Чана с тем, чтобы использовать земли, составлявшие часть городского центра. Однако это было сделано лишь после того, как был опробован междолинный канал, который по замыслу строителей, должен был избавить их от прежних проблем.

**МЕЖДОЛИННЫЙ** канал протяженностью 74 км начинался от реки Чикама и соединял ее с системой контурных каналов на северной стороне долины реки Моче. С его помощью строители надеялись восстановить сельское хозяйство в районе Трес-Пампас. Построив с небольшим уклоном специальные отводы от системы каналов Пампа-Уанчако близ Чан-Чана, они надеялись расширить площадь орошаемых земель. Скорость течения воды по междолинному каналу должна была быть такой же, как и в системе каналов, использовавшихся для орошения полей Трес-Пампас. Хотя междолинный канал на юге доходил до Кебрада-дель-Осо, он так и не был достроен, поскольку из-за искривлений на его пути вода не поступала, и он перестал действовать. В результате большая часть полей в Трес-Пампас была оставлена и возделывание земель близ реки оказалось возможным



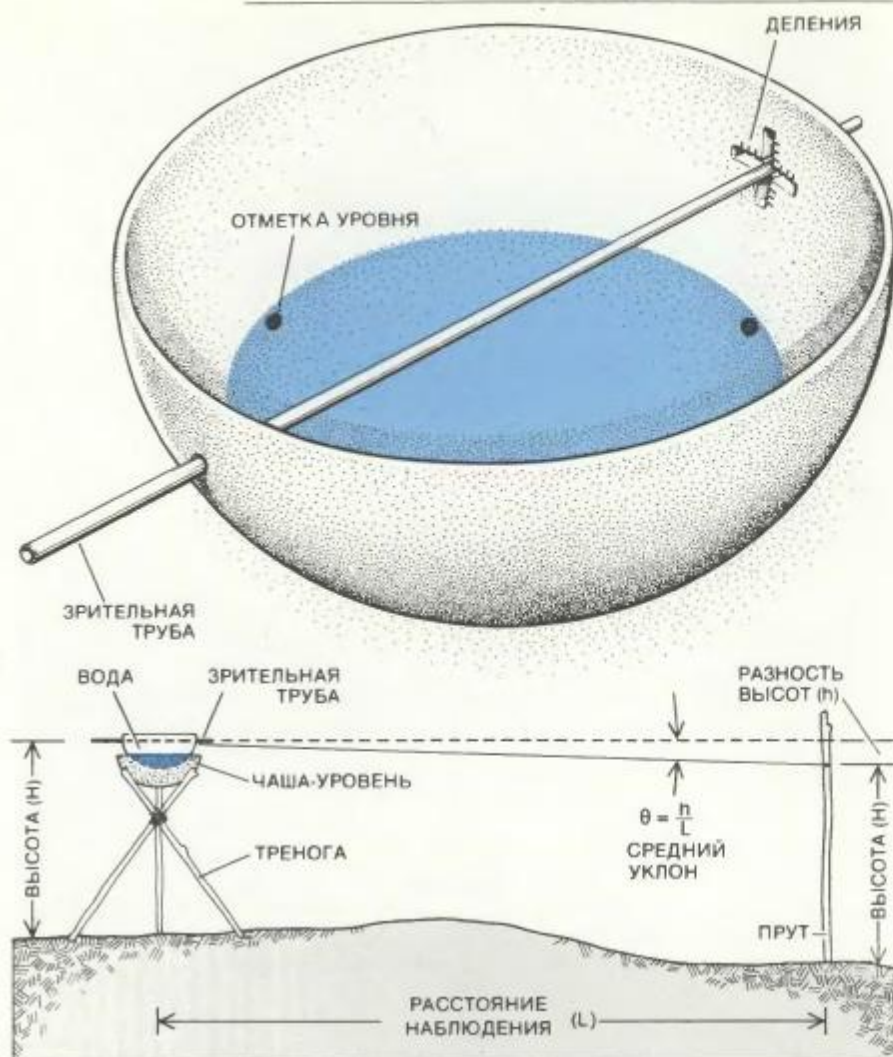
**МЕЖДОЛИННЫЙ КАНАЛ** предназначался для того, чтобы спасти систему каналов чиму за счет переброса воды от реки Чикама в долину реки Моче. Этот канал пересекал канал Вичансао в северной части долины реки Моче (точка J) и предназначался для увеличения подачи воды в сельскохозяйственные районы близ Чан-Чана, включавшие Пампас-Уанчако, Рио-Секо и Эсперанса. Отводные каналы также подавали воду на поля (например, в районе, обозначенном H).

лишь с помощью каналов, доходивших до самых низовий.

Система каналов в долине реки Моче, а также междолинный канал свидетельствуют о нововведениях, которыми пользовались строители чиму. Несколько крупных нововведений привели к изменению конструкции самих каналов. Особенно это заметно в канале Пампа-Уанчако близ Чан-Чана. Поначалу этот канал представлял собой не что иное, как траншею, вырытую в песчаной почве; при его раскопках были выявлены поперечные профили, ха-

рактерные для водной эрозии песчаных почв.

Примерно в 1100 г. н.э. разрушительное наводнение, вызванное Эль-Ниньо, судя по всему, значительно разрушило систему каналов Пампа-Уанчако вместе с другими системами. Вероятно, вследствие этих разрушений было решено перестроить систему каналов, используя новый опыт. Перестроенные участки каналов стали менее извилистыми. Кроме того, новые каналы были облицованы камнем и имели меньшее поперечное сечение, чем прежние каналы.



**УСТРОЙСТВО ДЛЯ РАЗМЕТКИ ТРАССЫ КАНАЛА**, реконструированное автором по глиняному сосуду, хранящемуся в Археологическом музее г. Уарас в Перу. Устройство состоит из чаши (вверху), в которую вставлена зрительная труба, проходящая через небольшое отверстие на одной стороне и крестообразный вырез на другой. Чаша наполнена водой и ориентирована так, чтобы поверхность воды проходила через три точки, отмеченные внутри ее. При пользовании этим устройством (внизу) поверхность воды образует «искусственный горизонт», или абсолютно горизонтальную плоскость. Когда зрительная труба проходит через центр крестообразного выреза, она параллельна поверхности воды. Прут известной высоты ( $H$ ), равной высоте расположения зрительной трубы над землей, помещается на заданном расстоянии ( $L$ ). Наводя трубу на верхнюю часть прута, можно измерить средний уклон земной поверхности ( $\theta$ ), пользуясь калибровочными метками на крестообразном вырезе.

Форма поперечного сечения этих перестроенных каналов была почти полшестиугольной. Самое удивительное, однако, заключается в том, что с точки зрения современной гидротехники, из всех трапециевидных форм поперечного сечения именно полшестиугольная является оптимальной. Такие сечения позволяют свести к минимуму смоченный периметр для данной площади канала и тем самым позволяют достичь максимальной скорости течения воды. Благодаря этим новшествам удалось уменьшить сопротивление течению воды и поддерживать высокую скорость течения даже при постоянном уменьшении по-

ступления воды в водозабор. Уменьшение площади поперечного сечения канала привело к подъему уровня воды, что позволило предотвратить пересыхание отводных каналов, ведущих к полям.

Важная особенность контурного канала состояла в том, что для полива максимальной площади его водозабор располагался далеко вверх по течению реки, а трасса канала проходила вдоль долины с постоянным уклоном. Чем меньший уклон имел канал, тем большей была площадь полива. У большинства каналов системы Пампа-Уанчако уклон был равен примерно 0,009, т. е. на каждые 1000 м пе-

репад высоты составлял 9 м. Добиться постоянного небольшого уклона было невозможно без применения сложных методов измерения перепадов высоты и выбора оптимальной трассы. Как известно, археологами пока не обнаружены свидетельства существования у чиму письменности и системы счисления. Как в таком случае строители могли намечать трассу канала?

Один из возможных ответов на этот вопрос дают результаты исследования керамического сосуда чиму, проведенного в Археологическом музее в г. Уарас (Перу). Сосуд представляет собой цилиндр, который с одной стороны имеет отверстие, а с другой — крестообразный вырез; сверху сосуда устанавливалась чаша-уровень. Предполагая, что этот цилиндр служил для разметки трассы каналов, я изготовил упрощенный вариант этого «прибора» в виде чаши, имевшей с одной стороны отверстие, а с другой — крестообразный вырез, на вертикальном и горизонтальном плече которого нанесены калибровочные отметки. Три отметки на внутренней поверхности чаши определяют плоскость, параллельную продольной оси полой зрительной трубы, проходящей через отверстие и центр крестообразного выреза.

Когда чаша наполнена водой и помещена в неглубокий сосуд, установленный на треноге и заполненный песком, ее положение можно регулировать до тех пор, пока уровень воды в ней не установится на отметках на внутренней поверхности. Поверхность воды после этого считается «искусственным горизонтом», которому параллельна зрительная труба. Трубу можно перемещать в вертикальной плоскости и направлять на вертикальный прут известной длины, установленный на заданном расстоянии, и тем самым определять вертикальный угол. Последний может быть найден путем несложных вычислений. Я построил модель этого разметочного устройства и использовал ее для точных измерений в полевых условиях. Несомненно, что больший и более точный ее вариант может дать еще более точные результаты.

Об изобретательности строителей каналов можно судить по новшествам, которые они применяли при строительстве канала Пампа-Уанчако, однако наибольшую информацию о том, какая конструкция канала считалась в то время оптимальной, можно получить, исследуя большой междолинный канал. Одной из особенностей этого канала является то, что в нем есть множество сегментов с различной формой поперечного сечения. Эти вариации поперечного сечения не

были случайными — строители чьим были слишком искусными, чтобы допускать произвольные отклонения в конструкции. В таком случае, какую роль играли эти вариации?

Ответом на вопрос является тот факт, что многие из указанных сегментов расположены непосредственно перед большими акведуками. Поскольку сооружение таких акведуков требовало немалых затрат труда, то вполне возможно, что сегменты, имеющие необычную форму поперечного сечения, предохраняли акведук от размыва водой во время резких изменений скорости течения воды в результате наводнений. Проверить эту гипотезу можно было бы с помощью компьютерной модели, однако компьютерное моделирование таких систем, как канал, пока не обладает достаточной точностью. Поэтому была создана масштабная модель сегмента канала перед акведуком для изучения работы этого сегмента при различных скоростях течения воды.

**РЕЗУЛЬТАТЫ** этих экспериментов, проведенных в гидравлической лаборатории Университета в Сан-Хосе, оказались весьма интересными. Сегмент канала испытывался в широком диапазоне скоростей течения воды на входе. В гидротехнике этот диапазон обычно оценивается величиной, называемой числом Фруда. Это число представляет собой отношение скорости движения жидкости к скорости распространения небольших волн, возникающих в мелководных каналах в результате любого мгновенного изменения локальной глубины потока. Скорость распространения волн пропорциональна квадратному корню глубины. Отсюда число Фруда для мелководного быстрого потока воды в канале (например, такого, который наблюдается после ливня) будет больше единицы, тогда как для глубокого, медленно движущегося потока это число значительно меньше единицы.

Эксперименты на модели сегмента канала проводились для большого диапазона чисел Фруда: от значительно меньших единицы до намного превышающих единицу. Было установлено, что чем выше число Фруда на входе сегмента, тем ниже оно на выходе. Поэтому по числу Фруда на выходе сегмента можно судить о том, какую опасность представляет собой поток для стен акведука. Строители чьим использовали такие сегменты, которые значительно уменьшали размывание акведука водой, даже если скорость течения увеличивалась.

Детальный анализ действия модели сегмента показал, что предотвратить размыв акведука таким способом было нелегко. Чтобы понять действие

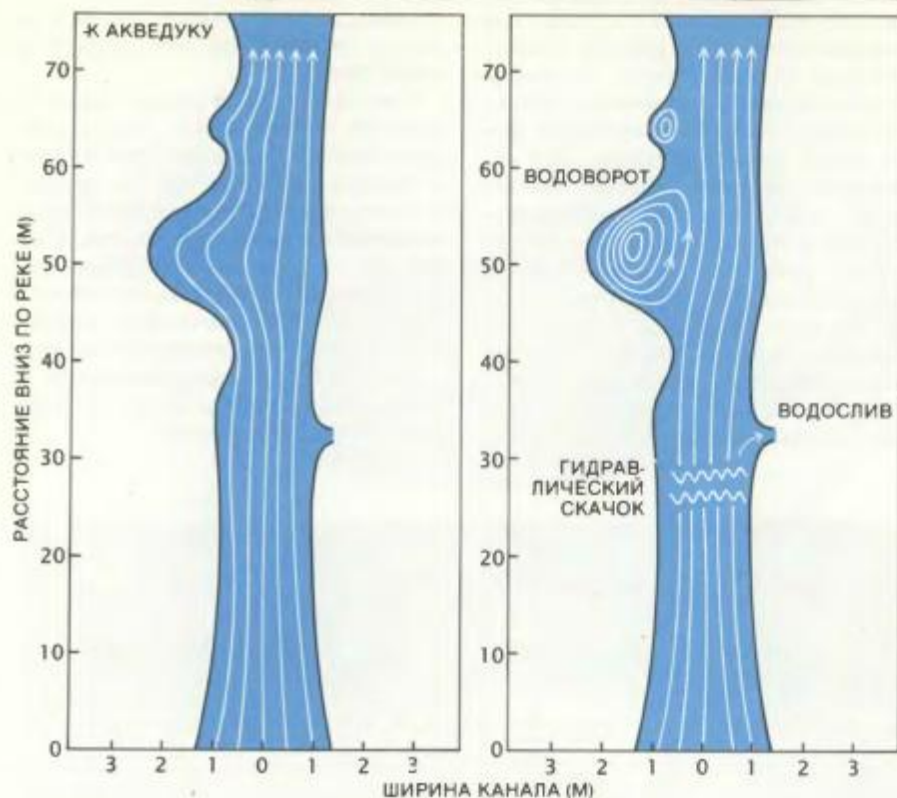
модели, необходимо знать различные режимы потока в открытом канале, которые в гидротехнике называют гидравлическими режимами. Докритическому режиму соответствует число Фруда меньше единицы. Для небольших уклонов высота потока может асимптотически приближаться либо к нормальному, либо критическим глубинам, в зависимости от первоначальной глубины потока. В случае прямоугольного сечения при нормальной глубине поток равномерен и линии тока параллельны дну канала. Нормальная и критическая глубины являются теоретическими вели-

чинами, которые зависят от формы канала, неровностей его склонов, а также уклона.

Сверхкритический режим характеризуется числом Фруда, превышающим единицу. Такие быстрые потоки в каналах, построенных на крутых склонах, асимптотически приближаются к нормальной глубине, при условии что первоначальная глубина потока меньше критической глубины. Кроме того, такие потоки могут приводить к неоднородности скоростей и глубин в форме «гидравлических скачков» в местах сужения канала или при резких изменениях уклона.



**МОДЕЛЬ СЕГМЕНТА КАНАЛА** была построена в лаборатории экспериментальных композиционных материалов корпорации FMC и установлена в гидравлической лаборатории Университета в Сан-Хосе. Смоделированный сегмент междолинного канала находился перед акведуком. Модель испытывалась в лаборатории в широком диапазоне чисел Фруда для установления того, зачем нужны были вариации поперечного сечения. Некоторые результаты испытаний приведены на следующем рисунке.



РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЯ модели сегмента канала, изображенной на предыдущем рисунке. Линии тока (вид сверху) указывают направление течения воды в канале. Для докритического режима на входе (слева) при расширении потока происходит уменьшение его скорости. В случае сверхкритических потоков (справа) образуется водоворот. Граничная линия тока действует как «потенциальная стена», сужая эффективное поперечное сечение канала, что в свою очередь приводит к гидравлическому скачку. После гидравлического скачка канал расширяется и поток остается докритическим. Таким образом, как для докритического, так и сверхкритического потока на входе сегмент канала позволяет уменьшить число Фруда, предотвращая размывание акведука.

**БОЛЕЕ ВАЖНЫМ**, возможно, является то, что докритические и сверхкритические потоки ведут себя по-разному при расширении канала. Когда докритический поток попадает в более широкий участок канала, его ширина увеличивается, а скорость уменьшается. Поток, имеющий сверхкритический режим, наоборот, ускоряется при расширении канала, а его глубина уменьшается. Все сказанное позволяет понять действие модели сегмента канала.

Указанный сегмент представляет собой узкую часть канала, расширяющуюся почти до полукруга примерно в средней своей части. При малом числе Фруда на его входе скорость докритического потока уменьшается вследствие расширения потока. По мере увеличения числа Фруда в расширяющемся русле возникает водоворот. При высоком числе Фруда (около 1) линия тока водоворота действует как «стена», уменьшающая эффективную ширину канала. После водоворота поток вновь замедляется в результате расширения.

Когда поток на входе сверхкритический, водоворот искажает картину линий тока, что приводит к образованию «сверхкритической заглушки». В результате возникает гидравлический скачок в области сужения. Это нарушение непрерывности приводит к резкому переходу от сверхкритического режима к докритическому. Поскольку поток после гидравлического скачка становится докритическим, его дальнейшее расширение может сопровождаться уменьшением скорости.

Таким образом, сегмент междолинного канала, имеющий столь необычную форму поперечного сечения, действовал так, что число Фруда на входе

уменьшалось (за счет уменьшения скорости потока и увеличения его высоты), в результате предотвращалось размывание водой стен акведука. Кроме того, с помощью запруды можно было отводить избыток воды, когда высота потока после гидравлического скачка превышала высоту запруды относительно дна канала. Поскольку высота после гидравлического скачка увеличивается с возрастанием числа Фруда на входе, запруда служила дополнительным средством отвода воды из канала. Использование чередующихся форм поперечного сечения (наряду с изменяющейся степенью неровности откосов канала), в результате чего число Фруда находилось в заданном диапазоне (когда уклон канала было трудно изменить из-за большой твердости подстилающих пород), является главным гидротехническим достижением строителей междолинного канала. Поражает то, что этот сложный способ был изобретен людьми, не имевшими системы счисления.

Однако и этот способ не смог предотвратить ирригационную систему в долине реки Моче от разрушения. В результате дальнейшего углубления русла реки переставали действовать системы каналов, расположенные наиболее высоко по течению. Водозаборы самых поздних каналов (проложенных после того, как перестал действовать междолинный канал) располагались далеко внизу по течению, поэтому орошаемой была лишь незначительная часть прежних полей. В конце концов чиму стали возделывать земли даже в пределах стен Чан-Чана и использовали воду из самых нижних каналов.

Вполне возможно, что уменьшение площади орошаемых земель было одной из причин, приведших к завоеванию столицы Чимора инками около 1450 г. Наибольший интерес, однако, представляет не процесс упадка государства Чимор, а тот факт, что, несмотря на постоянное ухудшение условий для сельскохозяйственного производства, чиму с помощью созданных ими технических средств и простых орудий смогли приспособиться к этим условиям и обеспечить развитие своей культуры на протяжении почти 500 лет.

## Наука и общество

### Дифференциальная машина Бэббиджа

**РАСХОДЫ** на работу уже почти в 10 раз превысили отпущенную сумму, и завершить ее нужно было еще 16

лет назад. Никакой надежды на новое финансирование не было. И тем не менее изобретатель упорно продолжал свое дело. «Кто, имея хоть каплю здравого смысла, рассмотрев непревзойденную конструкцию диффе-



ренциальной машины № 1, может сомневаться, что ту же машину можно сделать гораздо проще?» — спрашивал он.

Однако тогда, в 1842 г., английское правительство проявляло меньше энтузиазма, чем сам изобретатель, Чарлз Бэббидж, и ни одного пени не согласилось дополнительно вложить в его работу. Доведенный до отчаяния Бэббидж так и не закончил свою машину и все же он вошел в историю как автор идеи создания компьютера. Теперь, когда до 200-й годовщины со дня рождения Бэббиджа осталось немногим менее трех лет, можно попытаться создать дифференциальную машину в том виде, в каком она была задумана изобретателем.

Сотрудники Музея наук в Лондоне заняты построением фрагмента счетного механизма по сохранившемуся описанию второго варианта, сделанного Бэббиджем. Как пояснил Д. Суэйд, ведущий специалист отдела вычислительных устройств музея, этот узел сможет складывать два двузначных числа (с переносом разряда). Музей намеревается построить дифференциальную машину Бэббиджа полностью, но для этого потребуются увеличить расходы с 200 до 500 тыс. фунтов стерлингов.

«Общепризнано мнение, что Бэббидж не смог завершить свою машину из-за ограниченных технических возможностей в то время», — сказал Суэйд. Но сам он считает, что Бэббиджу скорее помешали политические интриги, обстоятельства и его собственный характер, чем технические трудности при точном изготовлении сложных деталей машины. К тому времени, когда Бэббидж скончался в возрасте 78 лет, он был известен как человек эксцентричный, в течение долгого времени и с большой настойчивостью проводивший кампанию против шарманщиков.

Идея создания дифференциальной машины родилась примерно в 1812 г., когда Бэббидж начал мечтать о счетной машине, которая могла бы составлять точные математические таблицы. В придуманной им конструкции машины зубчатые колеса были пронумерованы и при суммировании соответствующие складываемым числам колеса должны были поворачиваться. Машину можно было настраивать на расчет различных численных рядов и полиномиальных уравнений; единственно, что требовалось, — это повернуть рычаг, чтобы получить готовый результат.

Построив небольшую демонстрационную модель, Бэббидж предложил английскому правительству сконструировать большую машину для составления навигационных таб-

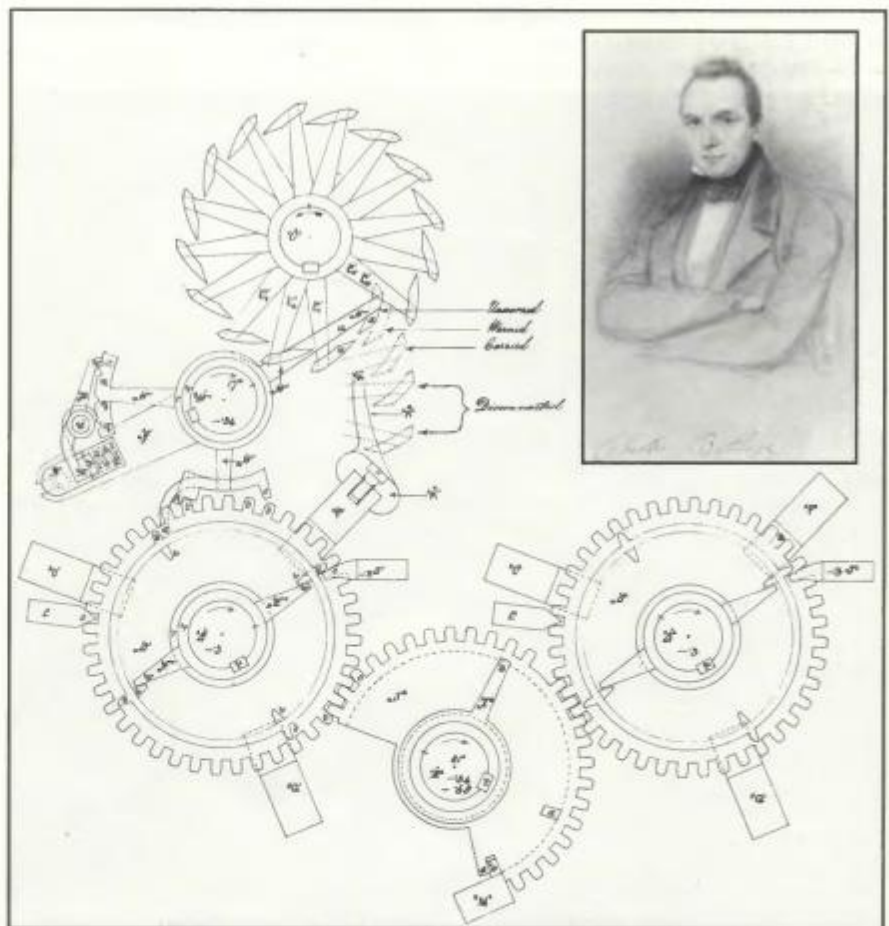
лиц. По его расчетам, на осуществление этого проекта должно было уйти не более трех лет, а расходы составили бы несколько тысяч фунтов стерлингов. Правительство субсидировало на эти цели 1500 фунтов стерлингов.

К середине 30-х годов прошлого века Бэббидж полностью погрузился в конструирование более сложной машины — аналитического устройства, программирование которого, по его замыслу, должно было осуществляться с помощью перфокарт. Но и эта машина не была построена по той причине, что Бэббидж занялся составлением чертежей второго варианта своей дифференциальной машины. Выделив изобретателю 17 тыс. фунтов стерлингов, правительственные чиновники все более убеждались в том, что его успех сомнителен, и при общем одобрении решили отказаться от дальнейшего финансирования проекта.

Понять Бэббиджа не просто. Хотя он и сделал уйму эскизов, подробно

раскрывающих конструкцию второго варианта дифференциальной машины, он не счел нужным проставить на них размеры, указать допуски и материалы, из которых должны быть сделаны детали машины. (Суэйд предполагает, что в окончательном виде машина будет иметь длину 3 м, высоту 2 м и ширину около 0,5 м, а общее число деталей в ней составит несколько тысяч.) Хотя, по словам Суэйда, компьютерное моделирование узлов и деталей машины Бэббиджа сэкономило бы и время, и деньги, специалисты попытаются придерживаться той технологии построения машины, которая в свое время была доступна Бэббиджу.

«Сомнений в том, что эта машина будет работать, у нас почти нет», — заявил Суэйд, не уступая в энтузиазме самому Бэббиджу. Он полагает, что, если сумму денег, машина будет закончена к 26 декабря 1991 г., когда исполнится ровно 200 лет со дня рождения талантливого изобретателя.



ИЗОБРЕТАТЕЛЬ И ЕГО ДЕТИЩЕ: выполненный карандашом портрет Бэббиджа (1841 г.) и одна из сделанных им схем суммирующего механизма дифференциальной машины. Обе иллюстрации любезно предоставлены для публикации попечителями Музея наук в Лондоне.

## О странных отражениях, которые можно увидеть в елочных шарах и других блестящих сферах



ДЖИРЛ УОЛКЕР

**В**ЗГЛЯНИТЕ в блестящий елочный шар и вы увидите искаженное изображение вас самих и окружающей вас обстановки. При этом откуда бы вы ни смотрели, вы, словно почетный гость, оказываетесь в центре картины. Взаимные отражения от двух соприкасающихся шаров формируют две по виду бесконечные последовательности изображений, которые уменьшаются в направлении к точке касания шаров. Три касающихся друг друга шара дают еще более удивительную картину, особенно

если они расположены на темном фоне. «Мозаика» изображений здесь сложнее, а область между шарами представляется взору черным треугольником, который как бы закрывает их округлые бока. Чем же объясняются все эти эффекты?

В 1972 г. М. Берри из Бристольского университета опубликовал статью, в которой он проанализировал отражения от таких сферических поверхностей, как елочные шары, стальные шарики от подшипников и шары, используемые для украшения лужаек.

(Так совпало, что Берри выступает в этом номере журнала как автор статьи «Геометрическая фаза», посвященной, впрочем, совершенно иной теме.) Каждая сфера в разобранных Берри случаях служит выпуклым отражателем, создающим уменьшенное искаженное изображение окружающей сцены, которое как бы находится внутри сферы. Шары большего размера, вроде тех, что используются для украшения лужаек, дают, естественно, более крупные и ясные изображения. Наблюдатель видит внутри них мир, который может поспорить с «Зеркальем» Льюиса Кэрролла.

Если поместить в центр лужайки большой шар и смотреть на него сверху, мир покажется заключенным в круговое поперечное сечение мяча, которое я буду называть плоскостью изображения. Ваши глаза находятся в центре этой плоскости, а голова видна на фоне неба. Край лужайки (по существу, горизонт) образует в поле изображения окружность, а все деревья, растущие по краю лужайки, вытянуты к центру. Изображения высоких зданий, если они есть, также вытянуты к центральной точке и сильно искажены: их нижние части расширены, а верхние сужены. Себя вы также видите в искаженном свете: ваши ноги слишком велики, а тело смешно суживается к голове, что придает вам сходство с персонажами некоторых мультфильмов. Трава, растущая на лужайке, обрамляет плоскость изображения.

Все эти изображения сформированы, разумеется, лучами, отражающимися от шара (см. верхний рисунок на с. 73). Луч, идущий от вашего глаза, отражается от верхушки шара и снова попадает в ваш глаз; этот луч идет вдоль линии, которую я называю центральной линией, и возвращается к вам по ней же. Вот почему отражение своих глаз вы всегда видите в центре плоскости изображения. Лучи, идущие от других объектов, отражаются от шара и идут в вашу сторону под некоторым углом к центральной линии. Как указывает Берри, предельные условия отражения соответствуют лучу, который едва касается шара и при отражении почти не отклоняется. Этот луч, который идет по касательной к шару и который поэтому я буду называть касательным лучом, ограничивает видимую картину. Все, что лежит ближе к шару, чем точка на земле, из которой исходит касательный луч, скрыто от взгляда.

Один из лучей, которые попадают вам в глаза, идет от горизонта и поэтому приближается к шару по горизонтальной траектории. Всякий видимый луч, падающий на шар выше горизонтального луча, наклонен книзу;



Отражения от трех блестящих шаров, используемых для украшения лужайки

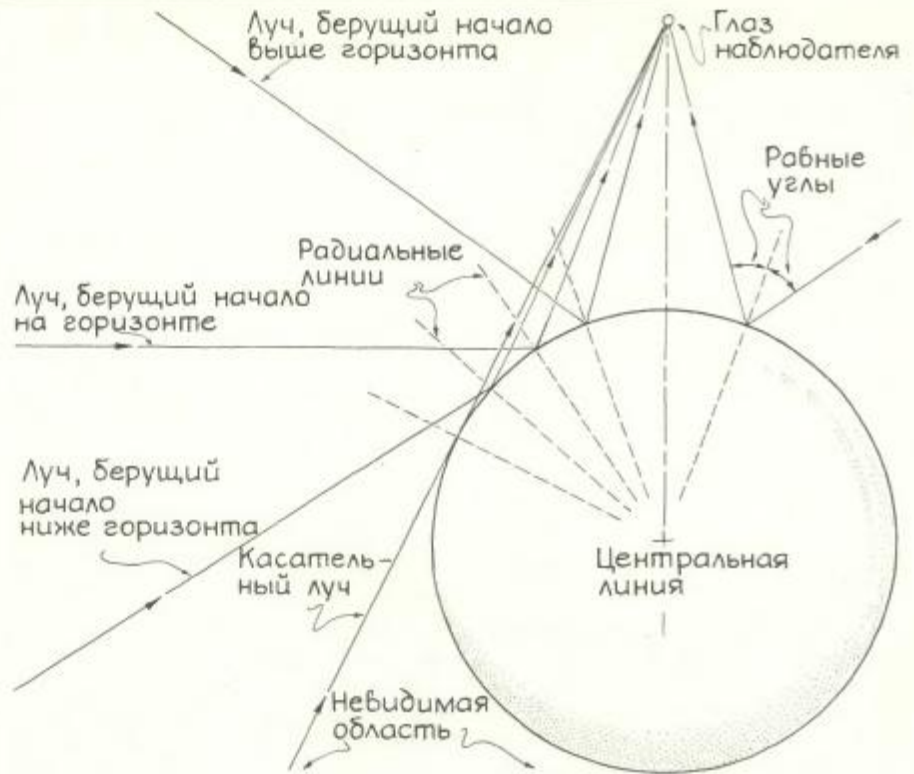
можно сказать, что он берет начало выше горизонта. Луч, отражающийся в вашу сторону от точки на шаре, которая лежит ниже точки падения горизонтального луча, подходит к шару по траектории, отклоненной вверх; можно сказать, что он берет начало ниже горизонта. (Лучи этого типа будут играть важную роль в дальнейшем анализе. Заметим, что образованные ими изображения участков поверхности земли лежат выше центральной плоскости сечения шара, между точками, где отражаются касательный и горизонтальный лучи.)

Отражение луча подчиняется определенному правилу: падающий и отраженный лучи должны образовывать одинаковые углы с радиальной линией, идущей из центра шара в точку, где падающий луч встречается со сферой. Для касательного луча соответствующие углы равны  $90^\circ$ ; для луча, идущего от ваших глаз, они равны нулю. Угол отражения горизонтального луча зависит от расстояния между вами и шаром. Если это расстояние велико по сравнению с диаметром шара, угол отражения горизонтального луча близок к  $45^\circ$  и отраженный луч почти вертикален. Если же это расстояние мало, вы воспринимаете горизонтальный луч, точка отражения которого лежит несколько выше на поверхности шара. Угол отражения в этом случае больше и отраженный луч отклонен от вертикали.

Темный треугольник, который появляется в группе из трех касающихся друг друга шаров, расположенных на темном фоне, был впервые замечен Бобом Миллером, художником из Сан-Франциско. Изображение этого треугольника, выполненное Миллером, можно видеть в «Эксплораториуме», своеобразном музее науки в Сан-Франциско. В этой статье я попытаюсь объяснить, почему возникает этот треугольник и множественные изображения в блестящих шарах, как идут и отражаются лучи, формирующие такие изображения, и какой шар участвует в создании конкретного изображения.

Поначалу я думал, что идентифицировать изображения окажется невозможным. Выстроив в виде треугольника шары, используемые для украшения лужаек, я попытался разглядеть и перенести на бумагу хотя бы с полдюжину изображений, которые я видел в шарах, но безуспешно. Тогда я убрал один из шаров и стал изучать изображения, которые давали два других шара. В каждом шаре можно было насчитать не менее десятка изображений, сходящихся к точке касания шаров.

Нечто похожее наблюдается в том случае, когда вы стоите между двумя параллельными зеркалами в рамках.

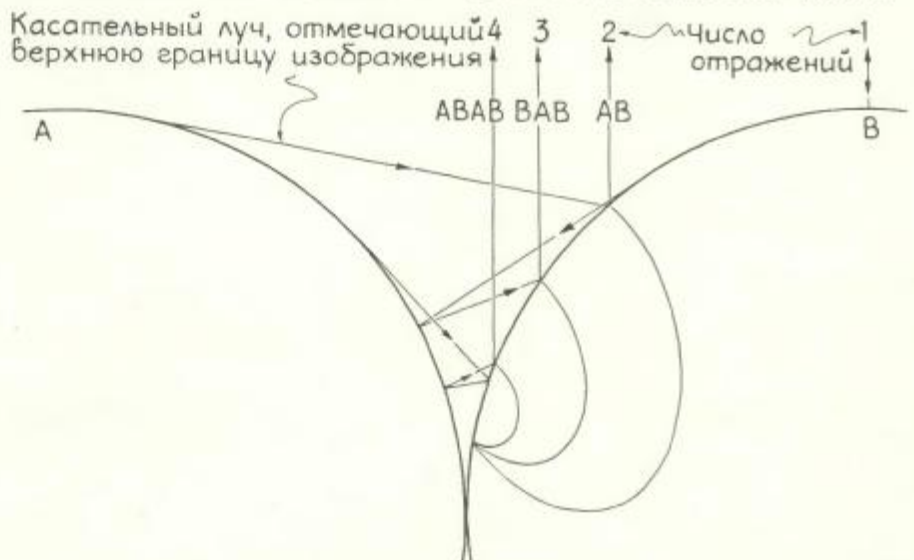


Как отражаются лучи от блестящего шара

В каждом зеркале вы видите последовательность изображений рамы этого зеркала и рамы другого зеркала. Самое большое изображение формируется лучами, которые отходят от противоположного зеркала и отражаются в вашу сторону от того зеркала, в которое вы смотрите. Следующее изображение формируется лучами, которые идут от того зеркала, в которое вы смотрите, затем отражаются от зеркала, стоящего напротив, и вновь отражаются от первого зеркала. Из-за того что свет проходит дополнительное расстояние, это изображение меньше. С каждым последующим изо-

бражением связано одно дополнительное отражение, поэтому изображения последовательно уменьшаются.

Когда вы смотрите сверху в два касающихся друг друга шара, вместо рам зеркал вы видите края шаров; изображения здесь уменьшаются быстрее, чем в двух плоских зеркалах, что объясняется кривизной поверхности шара. Некоторые из отраженных лучей показаны внизу на этой странице. Верхушка шара *B* несет на себе изображение неба, которое формируется лучами, испытавшими одно отражение. Следующее изображение (если считать сверху вниз) «помога-



Отражения от двух соприкасающихся шаров



Отражения касательных лучей с возрастающим наклоном вниз

ет» строить шар  $A$ . Верхней границе изображения соответствует касательный луч, который идет от шара  $A$ , отражается от шара  $B$  и уже после этого попадает в ваш глаз. Прямо под этой границей вы видите изображение неба, отразившегося дважды — один раз от шара  $A$  и один от шара  $B$ .

Еще ниже располагается изображение, которое «помогает» строить шар  $B$ . Его верхняя граница формируется касательным лучом, идущим от шара  $B$ , отражающимся от шара  $A$ , а затем еще раз от шара  $B$ . Непосредственно под этой границей

вы видите изображение неба, сформированное отражениями в последовательности  $BAB$ . Остальные изображения, которые вы видите в шаре  $B$ , формируются таким же образом: изображения, отраженные в первый раз в шаре  $A$ , чередуются с изображениями, отраженными первый раз в шаре  $B$ , причем у каждого из них верхняя граница формируется касательным лучом.

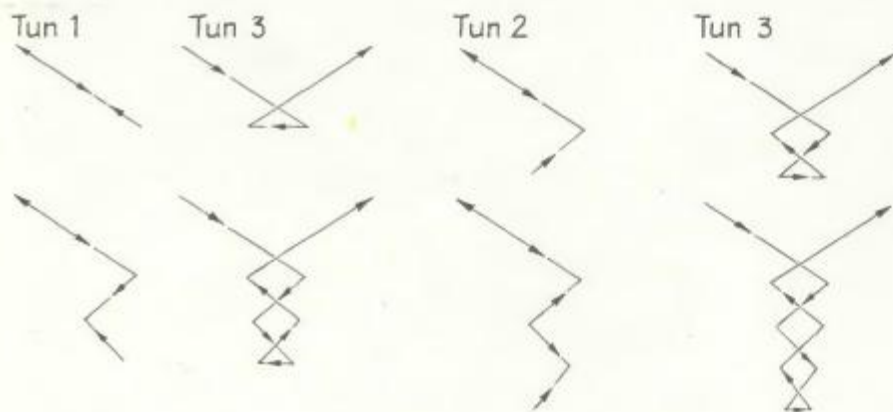
Задавшись целью более эффективно классифицировать изображения, я исследовал, как отражаются касательные лучи, идущие от шара  $A$ , начав с того из них, что берет начало высоко

на шаре  $A$  и отражается шаром  $B$  вправо (см. рисунок слева). Представьте себе, что вы смотрите видеозапись, показывающую, как идущий от шара  $A$  луч медленно отклоняется вниз, оставаясь касательным к шару. Во время такого загибания начального луча, отраженный шаром  $B$ , наклоняется влево, к шару  $A$ , в какой-то момент пересекая вертикаль; последовательность отражений при этом выражается формулой  $AB$ . Остановим видеопленку, когда отраженный луч, как и начальный, станет касательным к шару  $A$ ; заметим, что в этот момент начальный и отраженный лучи идут по радиальной линии шара  $B$ . Вновь пустим видеозапись; число отражений равно трем и они образуют последовательность  $ABA$ . Конечный луч теперь отклоняется вправо, к шару  $B$ , и в какой-то момент пересекает вертикаль. Когда луч коснется шара  $B$ , остановим пленку и рассмотрим траекторию луча. Заметим, что нижний участок траектории горизонтален. Это означает, что траектория луча симметрична. Поскольку начальный луч идет по касательной от шара  $A$ , конечный луч идет по касательной к шару  $B$ .

Продолжим смотреть видеозапись. Теперь мы наблюдаем четыре отражения в последовательности  $ABAB$ , причем конечный луч отклоняется влево, к шару  $A$ , и пересекает вертикаль. Остановим пленку, когда луч коснется шара  $A$ . В этот момент нижний участок траектории луча лежит на радиальной линии шара  $A$ , поэтому луч отражается ровно в противоположном направлении и вновь касается шара  $A$ .

Теперь легко предсказать, как должна выглядеть остальная часть нашей видеозаписи отражений. Всякий раз, когда конечный луч становится касательным к одному из шаров, возникает дополнительное отражение. Траектория луча в этот момент может принимать одну из трех характерных форм, определяемых углом наклона ее нижнего участка. При описании типов траекторий шар, от которого свет отражается сначала, я буду именовать «первым», а соседний с ним «вторым». В траекториях 1-го типа нижний участок лежит на радиальной линии второго шара, а конечный луч идет по касательной к первому шару. В траекториях 2-го типа нижний участок лежит на радиальной линии первого шара. Наконец, в траекториях 3-го типа нижний участок горизонтален, сама траектория симметрична и конечный луч идет по касательной ко второму шару.

Если вы пустите видеозапись с начала и будете отмечать типы траекторий, соответствующие моментам по-



Траектории лучей



Многочисленные отражения в группе шаров

явления нового отражения, вы получите последовательность 1, 3, 2, 3, 1, 3, 2, и т. д. Когда нижний участок траектории горизонтален, траектория симметрична. Между этими моментами нижний участок наклоняется попеременно вначале к одному шару, а затем к другому. Траектории, соответствующие многократным отражениям, можно изобразить в упрощенном виде, как на верхнем из двух рисунков, расположенных в нижней части с. 74.

Закончив этот анализ, я вернул третий шар (С) на место, восстановив конфигурацию из трех шаров. Там, где касались какие-либо два шара, я видел последовательность изображений, напоминавших те, что наблюдались в отсутствие третьего шара. Разница была в том, что внутри каждого изображения теперь располагались два других изображения разного размера. Внутри каждого из этих двух были еще два. Если не обращать внимания на облака и прочие «детали» отражающегося в шарах неба и сосредоточить внимание только на формах изображений, то можно убедиться во фрактальном характере узора, в котором одна и та же структура повторяется в последовательно уменьшающихся масштабах.

Чтобы определить, какой шар дает какое изображение, я использовал обычный подход, применяемый при анализе многократных отражений. Когда лучи света, идущие от какого-либо предмета, отражаются от какой-либо поверхности — плоскости зеркала или блестящего шара, — удобно считать, что изображение предмета создается за поверхностью. Когда лучи затем отражаются от второй поверхности, изображение, находящееся «за» первой поверхностью, служит тем «объектом», который отражается второй поверхностью, за которой появляется второе изображение. В случае многократных отражений вы можете начать с реального объекта и затем следить за отражениями описанным выше образом. Каждое изображение играет роль реального объекта для следующего отражения, и так до последнего изображения, от которого лучи еще попадают в глаз наблюдателя.

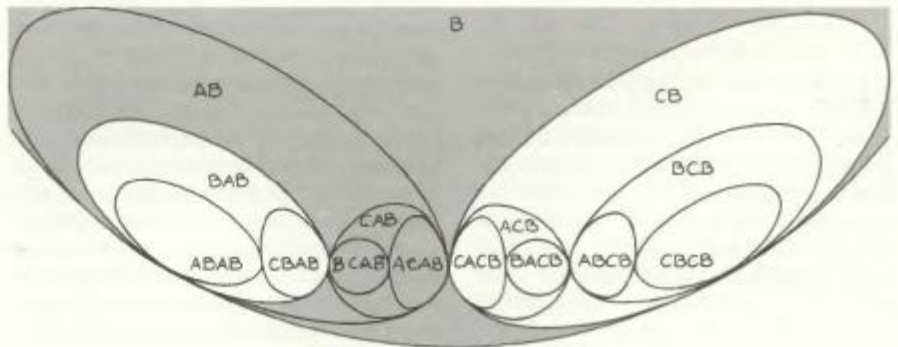
На нижнем рисунке на предыдущей странице проиллюстрирован метод анализа для последовательности отражений, когда лучи, идущие от неба, вначале отражаются шаром А, затем шаром В, а затем в порядке САВ, прежде чем они могут быть восприняты как идущие от бока шара В. Первые отражения не показаны, но совместные изображения неба, которые формируются шарами А и В, представлены отрезком прямой с кружком

на конце, соединяющим А и В. На левой схеме показан следующий шаг в построении последовательности изображений: изображения, сформированные шарами А и В, играют роль реальных объектов, так что изображения этих изображений появляются на шаре С. На средней схеме показан следующий шаг: изображения на шаре С проявляются как объекты, изображения которых появляются на шаре А. Наконец на правой схеме показано, как эти изображения, опять-таки играющие роль реальных объектов, отражаются шаром В; эти отражения вы и видите на боковой поверхности шара. Отметим, что таким способом можно определить, где заканчивается последовательность изображений неба, которое в первый раз отражается в шаре В — слева от изображения неба, в первый раз отразившегося в шаре А.

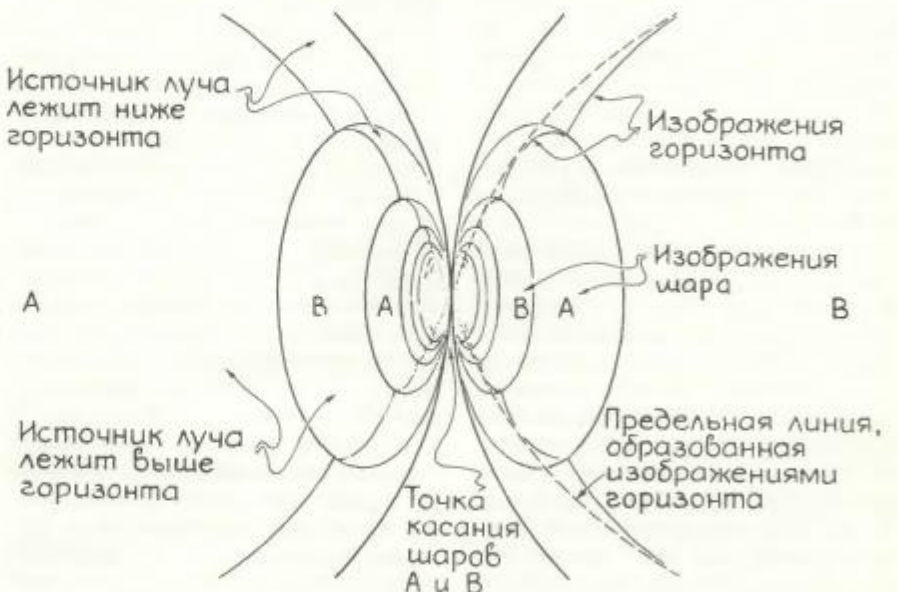
Формулы для последовательностей отражений на рисунке — это АС АВ и ВС АВ. Прделав такой же анализ для других возможных последовательностей отражений, я построил карту многих из изображений, видимых в

шаре В (см. верхний из двух рисунков на этой странице). Видно, что на карте они располагаются на разных уровнях и что изображения на более низких уровнях (ниже на шаре) меньше изображений на более высоких уровнях (выше на шаре).

Пройдемся «вниз» по затушеванным овалам на карте, пока не доберемся до изображений, описанных в предыдущем абзаце. Верхний уровень обозначен В и соответствует вершине шара, от которой лучи света, пришедшие от неба, отражаются прямо в вашем направлении. С левой стороны на следующем уровне располагается изображение неба, которое в первый раз отражается в шаре А. Оно примыкает к точке касания шаров А и В и является частью последовательности изображений, видимой в случае лишь двух шаров — А и В. Внутри этого изображения лежат еще два изображения. Правое — это то, с которым связана последовательность отражений САВ. Внутри его лежат еще два изображения, соответствующие последовательностям отражений



«Карта» изображений на шаре В



Предельная линия, образуемая двумя шарами

ВСАВ (слева) и АСАВ (справа). Именно эти последовательности проиллюстрированы на предыдущем рисунке.

Если вы захотите, то можете легко добавить новые уровни. Изображения при этом уменьшаются, а уровни уплотняются. При таком представлении шара *B* сжимающиеся изображения неба приближаются к «предельной линии», которая соединяет точку касания шаров *A* и *B* и точку касания шаров *B* и *C*. Ниже предельной линии на видимой стороне шара находятся изображения земли.

Что такое «предельная линия»? Она образована совместными изображениями горизонта — дальнего края поверхности земли или другой поверхности, на которой покоятся шары (см. нижний рисунок на этой странице). Если рассматривать шары вблизи, видно, что горизонт на всех изображениях искривлен; если ото-

двинуться от них подальше, кривизна станет неощутимой и отрезки горизонта покажутся лежащими на прямой. Предельная линия, идущая от точки касания шаров *A* и *B*, соединяется без излома с предельной линией, которая идет от точки касания шаров *B* и *C*, и суммарный отрезок образует одну сторону треугольника, впервые замеченного Миллером. Две другие стороны треугольника образуются такими же предельными линиями на других шарах. Ниже предельной линии (т. е. внутри треугольника) вы видите только изображения земли, которые по крайней мере один раз отразились от шаров. В середине треугольника вы видите собственно землю. Таким образом, если поверхность земли темная, вся внутренняя область, ограниченная треугольником, также будет казаться темной, что и наблюдал впервые Боб Миллер.

## Наука и общество

### Лебедь в роли Феникса

**В**ТО ВРЕМЯ как энергия современных ускорителей не позволяет пока получить бозоны Хиггса и другие предполагаемые учеными фундаментальные составляющие материи, во Вселенной появляются новые виды частиц, о существовании которых никто не подозревал. События начали разворачиваться в 1983 г., когда группа исследователей из Университета г. Кия (ФРГ) сообщила о 10-кратном по сравнению с ожидаемой величиной избытке мюонов в широких атмосферных ливнях (ШАЛ) от космических лучей, приходящих из области неба, в которой находится ярчайший источник рентгеновского излучения в нашей Галактике — Лебедь X-3. Мюоны — известные элементарные частицы, масса которых примерно в 200 раз больше массы электронов.

Сообщение из Кия сначала было известно лишь специалистам, однако в 1985 г. сразу несколько научных групп, проводящих подземные эксперименты по регистрации распада протонов, объявили, что поток мюонов в направлении от Лебеда X-3 намного больше, чем от других областей неба. Кроме того, наиболее мощный поток мюонов был зарегистрирован во время самого интенсивного за всю историю исследований ШАЛ, вызванного космическими лучами от источника Лебедь X-3.

После этих сообщений характер неофициальных дискуссий между физиками резко изменился. Почему? Известно, что ШАЛ возникают, когда некоторые частицы космических лучей (обычно протоны), вторгаясь в верхние слои атмосферы Земли, порождают каскад вторичных частиц, в том числе и мюонов; именно их регистрируют детекторы космических лучей. Однако мюоны — неустойчивые частицы: их время жизни при той энергии, которая у них была обнаружена, составляет около 6 мс. Лебедь X-3 находится от нас на расстоянии примерно 40 000 св.лет. Следовательно, эти мюоны не могут пролететь от Лебеда X-3 до Земли, не распадись; те мюоны, которые регистрируются, должны иметь вторичное происхождение и образовываться из каких-то других первичных частиц неподалеку от детектора.

Проблема заключалась в том, что не было ни одной подходящей кандидатуры на роль первичных частиц, получивших причудливое название «цигнетов» (от лат. *cognus* — лебедь). Эти гипотетические частицы должны быть электрически нейтральными, иначе магнитное поле Галактики отклонило бы их траекторию от прямой линии между Лебедем X-3 и Землей.

Нейтроны пришлось сразу же исключить, поскольку они хотя не имеют заряда, но являются нестабильными частицами и должны были бы полностью распасться за 40 000 лет полета от Лебеда X-3. Остаются фотоны и нейтроны, однако не известно

ни одной реакции этих частиц, при которой образовалось бы наблюдаемое количество мюонов. В 1985 г. физики для объяснения новых наблюдений вынуждены были прибегнуть к крайне экзотической гипотезе: они предположили, что источник Лебедь X-3 представляет собой кварковую звезду, выбрасывающую в окружающее пространство цигнетов — небольшие сгустки нейтрального вещества, состоящего из «странных» кварков.

Как это часто случается, со временем интерес к результатам, полученным на детекторах для регистрации распада протонов, постепенно угас ввиду необходимости повторных измерений. Однако недавно группа ученых из Мэрилендского университета в Колледж-Парке, Университета им. Дж. Мэйсона, Лос-Аламосской национальной лаборатории и Калифорнийского университета в Ирвине сделала аналогичное сообщение о поразительных результатах наблюдений в июле 1986 г. ШАЛ, вызванных космическими лучами от источника Геркулес X-1.

Подобно Лебедею X-3, Геркулес X-1 представляет собой тесную двойную систему, в состав которой входят нейтронная звезда и спутник с массой, в несколько раз превышающей массу Солнца. Как и Лебедь X-3, этот объект является мощным источником рентгеновского излучения и фотонов сверхвысокой энергии; он известен так же как источник космических лучей, порождающих ШАЛ.

В 1986 г. было зарегистрировано 17 всплесков от Геркулеса X-1, тогда как нормальный фоновый уровень составляет примерно 3 всплеска. По оценке упоминавшихся выше исследователей, вероятность того, что это превышение над фоном имело случайный характер, приблизительно равно  $10^{-4}$ . Кроме того, количество мюонов в этих ШАЛ по крайней мере на порядок величины превышало число мюонов, которое должно быть, если бы источником ШАЛ служили фотоны высоких энергий, и несколько превышало величину, характерную для ШАЛ, порождаемых протонами.

Хотя новые результаты не связаны с предыдущими, они ставят те же проблемы. Похоже, что цигнетов, исчезнувшие три года назад, вновь возникают из собственного «пепла».

### Сюрпризы малых РНК\*

**Т**АК НАЗЫВАЕМЫЕ малые ядерные РНК играют в клетке важную роль, участвуя в процессинге

\* © «Мир», 1989.

мРНК (см. статью: Дж. Стейц. Большая роль малых РНК, «В мире науки», 1988, № 8). Но их функции этим не исчерпываются. Малые РНК принимают участие во многих аспектах жизнедеятельности клетки.

В конце 70-х годов начались активные поиски регуляторов генной активности. В числе прочих экспериментов проводилась экстракция клеточных ядер солевыми растворами в расчете обнаружить искомые регуляторы среди растворимых веществ в таких экстрактах. В лаборатории М. Краузе из Университета шт. Нью-Брансуик в Фредериктоне (Канада) такие опыты проводили с ядрами фибробластов (клеток соединительной ткани). Оказалось, что добавление экстрактов из хроматина трансформированных фибробластов стимулирует транскрипцию хроматина из нормальных клеток. Когда экстракты из ядер фибробластов фракционировали, обнаружилось, что стимулирующим действием обладают мяРНК из трансформированных клеток, а мяРНК из нормальных клеток действовали очень слабо.

Подобные явления наблюдали также сотрудники лаборатории А. Нейфаха в Институте биологии развития им. Н.К.Кольцова АН СССР (Москва), изучавшие изменение активности генов в раннем развитии вьюна (*Misgurnus fossilis* L.) под влиянием экстрактов из ядер. У зародышей этой рыбы, как и у других низших позвоночных, генетический аппарат на ранних стадиях развития яйца неактивен и синтез РНК начинается лишь через 6,5 ч после оплодотворения. Если же в оплодотворенные яйца вьюна ввести путем микроинъекции ядерные экстракты, то наблюдается интенсификация транскрипции (после 6,5 ч развития). Еще более активными в этом отношении оказались мяРНК, выделенные из ядерных экстрактов.

Канадские исследователи, продолжая поиски активной субфракции, обнаружили, что максимальную стимуляцию синтеза РНК в ядрах фибробластов вызывает фракция U1 мяРНК. Действие U1 мяРНК состоит в том, что усиливается связывание РНК-полимеразы с ДНК. При этом U1 мяРНК из трансформированных клеток оказывает максимальный эффект в системе изолированных ядер нормальных фибробластов.

Помимо интенсификации транскрипции мяРНК участвуют, по-видимому, во внутриклеточном транспорте. Исследователи из Биоцентра Базельского университета (Швейцария) под руководством Э.Де Робертиса вводили ядерные и цитоплазматические низкомолекулярные РНК (нмРНК) из клеток

человека путем микроинъекции в ооциты африканской шпорцевой лягушки (*Xenopus*). Оказалось, что ядерные нмРНК, введенные в ооцит, перемещаются в его ядро, цитоплазматические нмРНК остаются в цитоплазме, а те нмРНК, которые встречаются и в ядре и в цитоплазме, распределяются между этими компартментами клетки. Здесь следует отметить, что в ядра поступают в основном мяРНК, богатые урацилом — U1, U2, U4, U5, U6; именно эти мяРНК участвуют в процессинге мРНК. Сотрудники Нейфаха Т. Буракова и В. Корж изучали интенсификацию транскрипции и распределение инъецированных мяРНК в клетках развивающихся зародышей вьюна. Оказалось, что мяРНК после микроинъекции перемещаются в ядра развивающихся зародышей, увлекая за собой из цитоплазмы определенные белки.

Эти и другие наблюдения внутриклеточного транспорта мяРНК позволили швейцарским исследователям и А. Мазину из Московского государственного университета сформулировать гипотезу о так называемой shuttle-функции мяРНК, согласно которой мяРНК переносят в ядра клетки белки — регуляторы генетической активности.

Исследователи из Московского института биологии развития, используя индивидуальные фракции мяРНК, любезно предоставленные А. Козловым из Института особо чистых биопрепаратов Минмедбиопрома СССР (Ленинград) и А. Мазиним, в опытах с развивающимися зародышами вьюна установили, что интенсификация транскрипции происходит под влиянием все тех же мяРНК — U1, U2, U4, U5, U6. В отличие от фибробластов, где была выявлена всего одна активная фракция мяРНК, клетки эмбриона вьюна относительно мало дифференцированы и, возможно, поэтому наблюдается меньшая специфичность в отношении фракций мяРНК. В то же время уже на этих стадиях развития в зародышах имеются клетки, избравшие определенные направления дифференцировки, и, по-видимому, дифференцирующиеся клетки обладают различной чувствительностью к разным мяРНК. Общим для активных фракций мяРНК является то, что в клетках они формируют мяРНК с участием полипептидов, состав которых может изменяться. Вероятно, в числе полипептидов и гипотетический белок — регулятор уровня транскрипции; его поиск — еще одно направление изучения внутриклеточных функций мяРНК.

Более 30 лет назад, в 1956 г.,

А. Нейфах, изучая влияние рентгеновского излучения на зародышей вьюна на последовательных стадиях развития, установил, что при некоторой дозе облучения зародыши теряют способность к развитию, но погибают не сразу. В результате облучения на стадиях 1—6 ч развитие останавливается на стадии 9 ч, но зародыши живут еще 2—3 ч, не дифференцируясь. Если облучение проводится между 6,5 и 8,5 ч, гибель наступает на более поздних стадиях (до 18 ч). Можно было предположить, что между 6,5 и 8,5 ч в зародышах синтезируются вещества, обеспечивающие существование и сложные морфологические перестройки на стадии гастролы, когда клетки перемещаются с одного полюса яйца, образуют желток и возникает многослойный зародыш. Деятельность ядер в этот период получила название морфогенетической функции. Первые полчаса морфогенетической функции имеют особое значение: работа ядер в это время обеспечивает длительное развитие зародыша (без дифференцировки). Этот ранний период морфогенетической функции выделили как витогенетическую (от лат. *vita* — «жизнь») функцию.

Морфогенетическая функция получила объяснение после открытия мРНК. Это период синтеза специфических мРНК, обеспечивающих определенные этапы развития зародыша. Витогенетическая функция долгие годы оставалась непонятной. В 1988 г., задавшись целью определить влияние мяРНК на синтез белка на запасных матрицах в отсутствие генетического контроля, Т. Буракова, В. Корж и А. Хайновская из Института биологии развития обнаружили, что зародыши, облученные до критического срока 6,5 ч, после микроинъекции мяРНК живут значительно дольше. Этот эффект специфичен для мяРНК, другие РНК таким эффектом не обладают. В ходе исследования выяснилось, что инъекции мяРНК на стадиях до активации транскрипции как бы имитирует первые полчаса работы ядер, когда синтезируются мяРНК, обеспечивающие удлинение жизни зародыша. (Эти результаты были представлены на состоявшемся осенью 1988 г. в Ташкенте советско-финском симпозиуме по биологии развития «Клеточная дифференцировка и экспрессия генов».)

В истории биологии это не первый пример того, как спустя годы явление или гипотеза находят объяснение и подтверждение в эксперименте. За объяснением наступает очередь изучения молекулярных механизмов. Наверное, малые РНК преподнесут еще немало сюрпризов.

## Случайное движение и образование фрактальных скоплений



А.К. ДЬЮДНИ

**Ч**ТО ЭТО — ион цинка, частичка сажи или покачивающийся пьяный — блуждает по экрану дисплея? Соединится ли этот объект с другими ему подобными, образующими вместе металлический цветок, темное пятно или безумную толпу? Ответ пусть подскажет вам собственное воображение, но — будь то цветок, пятно или толпа — форма агрегированной структуры будет, безусловно, фрактальной; можно даже измерить ее фрактальную размерность (которая лежит в диапазоне от 1 до 2).

Фрактал, изображенный на с. 79, создан программой под названием SLO GRO (сокращение от слов SLOW GROWTH — медленный рост). Она отправляет последовательность частиц, одну за другой, в беспечное блуждание по экрану, пока им не встретится неподвижное образование из таких же частиц. Как только частица наткнется на такое образование, она мгновенно останавливается и как бы прилипает к нему. По мере того как несколько сот частиц одна за одной скапливаются вместе, у неподвижной структуры постепенно отрастают ветви и усики хаотической формы, характерной для фрактальных объектов.

Можно сказать, что программа SLO GRO была создана под влиянием статьи, опубликованной в нашем журнале два года назад (см. Л.М. Сандер Фрактальный рост, «В мире науки», 1987, № 3). В статье был описан механизм роста, о котором только что говорилось и который называется диффузионно-ограниченной агрегацией, или ДОА.

Несколько бесстрашных энтузиастов, любителей приключений, в которые так любят пускаться читатели статей рубрики «Занимательный компьютер», не стали дожидаться, пока я затрону тему программного моделирования ДОА, и написали свои собственные версии программы SLO GRO. Особенно большое впечатление произвела на меня работа Э. Смиертки из Санта-Клары (шт. Калифорния). Не имея за плечами практиче-

ского опыта и вооруженный лишь элементарным курсом программирования, он вполне успешно написал программу SLO GRO. Не удовлетворившись наблюдением за тем, как растет фрактал, он измерял также его размерность.

Диффузионно-ограниченная агрегация может послужить неплохим представлением, например, такого физического процесса, как диффузия ионов цинка в двумерном электролитическом растворе. Когда ионы входят в контакт с агрегированным металлическим цинком на электроде, они немедленно прилипают к ранее осажденным атомам. Частицы сажи, хаотично блуждающие прежде, чем они встретятся с другими частичками, уже прилипшими к какому-нибудь субстрату, по-видимому, также следуют этому процессу, хотя в данном случае сила, сцепляющая их с другими частичками, является силой электрического притяжения.

Конечно, самая забавная (хотя и наименее реалистичная) модель процесса ДОА — это множество пьяных, блуждающих в темноте, которые, наткнувшись на сборище своих бесчувственных мирно похрапывающих товарищей, ложатся в кучу и тут же засыпают. При помощи аэрозольки спящей толпы при дневном свете, наверное, можно установить, что она имеет фрактальную форму, аналогичную кластерам атомов цинка или пятнам сажи.

Ключом к моделированию диффузионной части процесса ДОА является «случайное движение». Каждый шаг случайного движения, проходящего в двух измерениях, совершается в одном из четырех случайным образом выбираемых направлений: север, юг, восток, запад. (Иногда в случайном движении допускаются также промежуточные направления, такие, например, как юго-восток или северо-запад, но мы будем придерживаться упрощенной версии.) На верхнем рисунке на с. 80 изображен путь, типичный для частицы, совершающей случайное движение, — она «беспечно»

блуждает туда-сюда. Наблюдая за тем, как движется такая частица на экране, невольно начинаешь сомневаться, что она когда-либо достигнет точки назначения. Однако в блужданиях частицы все же есть цель (хоть это звучит несколько теологически): достичь скопища себе подобных частиц, постепенно образовавшегося в центральной части экрана.

Все начинается с того, что программа SLO GRO помещает одну частицу в центр экрана компьютера. Затем из произвольной точки большого круга с центром в точке, где находится первая частица, начинает случайное движение другая частица. Продолав долгий и сложный путь, она наталкивается на неподвижную частицу и останавливается. После этого программа сразу же отправляет в путь следующую частицу, которая также стартует из случайно выбранной точки на круге и совершает аналогичное путешествие. Частицы одна за другой собираются в том месте, куда была помещена первая частица, и постепенно в центральной части круга начинает вырастать древовидное образование со странно переплетающимися ветвями и сучьями. Такую причудливую форму эта структура имеет потому, что случайно блуждающие частицы чаще всего наталкиваются на неподвижных собратьев уже на периферии образования, задолго до того, как проникнуть вглубь, в более плотно заселенную центральную часть. Новые веточки с большей вероятностью начинают расти также от веток, а не от ствола, если можно так выразиться.

Все это требует времени. Как говорит Смиертка: «На моем компьютере «IBM XT» программа работает четыре-пять часов, поэтому я просто запускаю ее на ночь». С помощью алгоритмов, описанных ниже, можно построить несколько более быструю версию программы, но продолжительность ее работы, конечно, зависит от выбранного числа частиц, участвующих в процессе.

Алгоритм диффузии (SLO) немного проще алгоритма агрегации (GRO). В целях простоты ограничимся всеми действиями внутри круга диаметром 200 точечных элементов изображения, или пикселей. Чтобы выбрать точку на окружности, из которой очередная частица начинает свой путь, алгоритм SLO выбирает случайный угол в одном операторе и затем в последующих двух операторах вычисляет координаты точки на окружности, где она пересекается радиусом, проведенным под данным углом к горизонтали:

$$angle \text{ — } random \times 360$$

$$x \text{ — } 100 \times \cos(angle) + 100$$

$$y \text{ — } 100 \times \sin(angle) + 100$$



Компьютер сам выбирает число случайным образом в качестве значения переменной *random*. Поскольку это число всегда принадлежит диапазону от 0 до 1, мы должны помножить его на 360, чтобы получить произвольный угол в диапазоне между 0 и 360°. (В системах, где вместо градусов используются радианы, значение *random* следует помножить на  $2\pi$ , или приблизительно на 6,283.) На следующем шаге вычисляем координату *x* точки на окружности под данным углом, умножая 100 (радиус окружности) на косинус угла. На третьем шаге получаем координату *y*, воспользовавшись функцией синуса. Поскольку в большинстве распространенных систем программирования начало координат — точка с координатами (0,0) — находится в углу экрана, добавлено смещение 100 к обеим координатам для того, чтобы поместить начало координат в центр экрана. Конечно, этот прием годится лишь для экрана размерами 200 × 200 пикселей. Поэтому читатели должны будут сами подобрать подходящие смещения, исходя из размеров экрана того компьютера, для которого они напишут программы.

Выбрав точку старта для очередной частицы, программа SLO должна привести ее в движение в соответ-

ствии со следующим алгоритмом случайного движения (который мы встраиваем в цикл):

```

select — random
if select ≤ 0.25
  then x — x + 1
if select > 0.25 and ≤ 0.5
  then x — x — 1
if select > 0.5 and ≤ 0.75
  then y — y + 1
if select > 0.75
  then y — y — 1

```

Правила движения выражаются явным образом через значения случайной переменной *select* (выбор). В зависимости от того, где (в каком из четырех равновероятных диапазонов между 0 и 1) лежит *select*, одна из координат частицы увеличивается или уменьшается на 1. Таким образом, частица случайно перемещается вверх, вниз, вправо или влево на один пиксел.

А вот что не выражено явно, так это два условия, при удовлетворении которых частица должна остановиться: в том случае, когда частица вышла за пределы окружности, с которой она стартовала, или если она достигла пиксела, прилегающего к уже накопившемуся скоплению неподвижных частиц, составляющих фрактальный объект. В первом случае программа

просто ликвидирует частицу — если бы она этого не делала, то частица могла бы легко уйти за пределы экрана в бесконечное темное пространство электронного мира машины. Во втором случае программа фиксирует частицу в той точке, где она соприкоснулась с растущим кластером; частица как бы замирает на месте, загипнотизированная фрактальной Медузой.

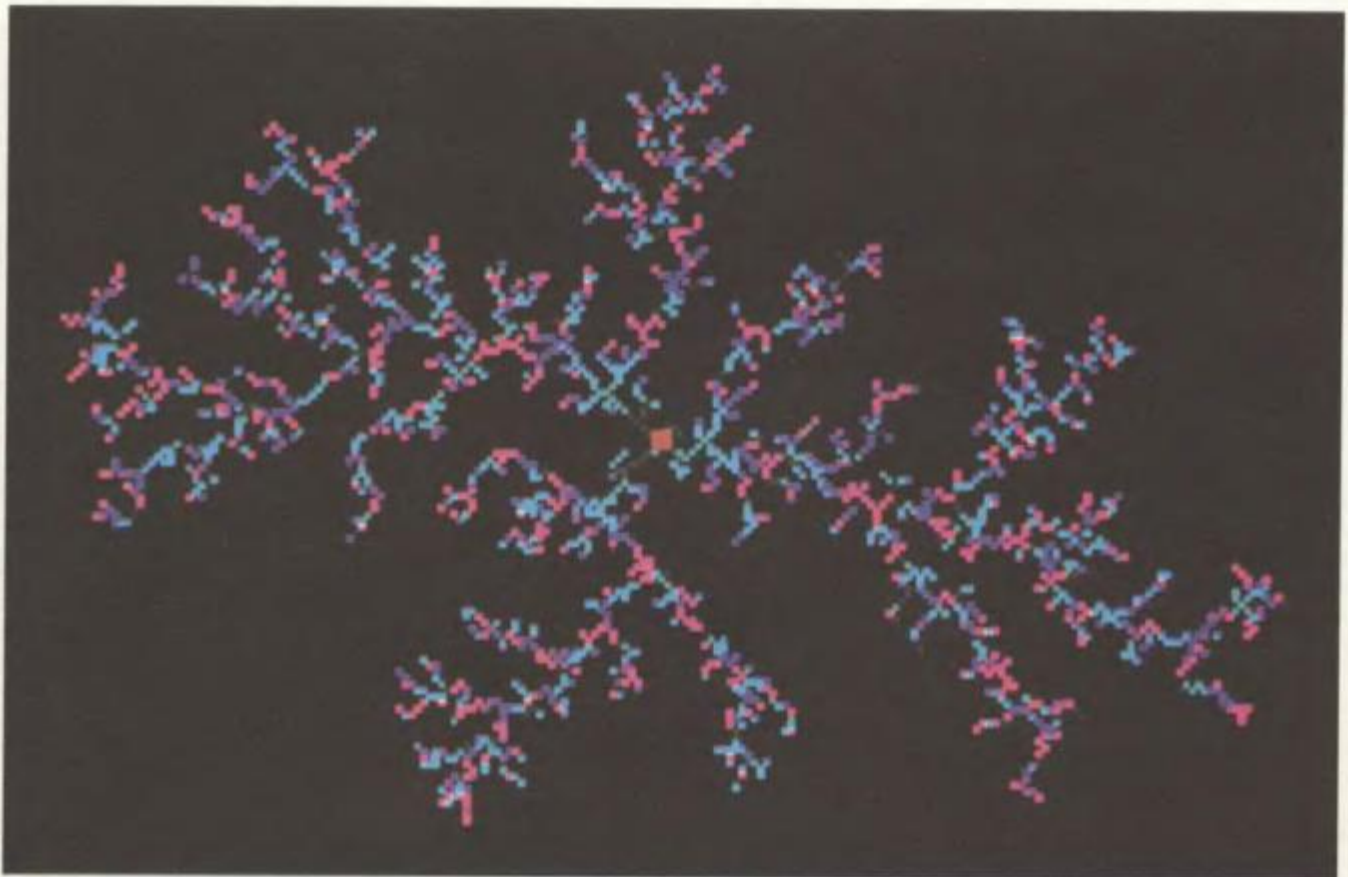
Операторы, выполняющие эти действия, встроены в условный оператор *while* в начале цикла случайного блуждания, который приводит в движение частицы. Программа препятствует выходу частиц за пределы окружности постоянно следя за величиной расстояния между частицей и центром окружности. Это расстояние подсчитывается каждый раз при появлении новых значений *x* и *y*. (На самом деле программа SLO GRO вычисляет квадрат расстояния. При этом немного экономится время, поскольку не нужно выполнять операцию извлечения квадратного корня.)

```

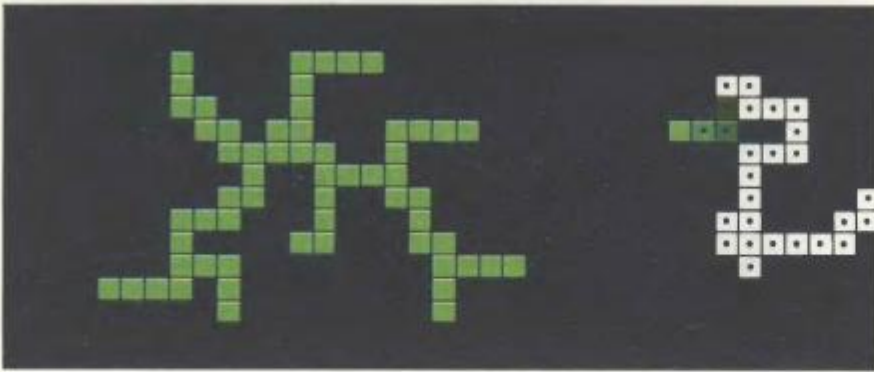
distx — x — 100
disty — y — 100
distance — distx2 + disty2

```

Условие *while* проверяет, насколько далеко частица ушла от центра окружности, путем сравнения величин



Фрактальное скопление К. Эбера



Покачивающийся пьяный, возможно, попадет, а возможно, и не попадет в скопление себе подобных

ны  $distance$  с квадратом 100 (плюс 1). Если условие не выполняется, программа выходит из цикла и начинает его заново с другой частицей.

Ну а как определяется другое условие, а именно соприкоснулась ли частица с уже образовавшимся кластером неподвижных частиц? Для этого программа организует два списка, по одному на каждую координату для всех частиц, образующих неподвижное скопление. Эти списки представляют собой массивы с именами соответственно  $crdx$  и  $crdy$  (от *crowd* — скопление). Исходная частица, помещенная в центр экрана, имеет координаты  $crdx(1) = 100$  и  $crdy(1) = 100$ . Если в своем хаотическом движении частица входит в соприкосновение с неподвижными частицами, программа SLO GRO выполняет следующие операторы:

```
crdx(count) ← x
crdy(count) ← y
```

нарисовать точку (100,100)

```
count ← 1
crdx(1) ← 100
crdy(1) ← 100
while count ≤ 500
```

выбрать точку на окружности

```
distance ← 0
contact ← false
while distance < 10001 and not contact
  erase point(x,y)
```

алгоритм движения

```
draw point(x,y)
```

вычислить расстояние

алгоритм касания

```
if contact = true
  then count ← count + 1
       crdx(count) ← x
       crdy(count) ← y
```

Полное описание алгоритма программы SLO GRO

Величина  $count$  (счетчик), как говорит уже ее имя, соответствует числу частиц в агрегате. В начале работы программы значение этой величины равно 1, и всякий раз, когда к агрегату добавляется очередная частица,  $count$  увеличивается на 1.

Но каким же образом GRO определяет момент, когда частица входит в соприкосновение с агрегатом? Простейший алгоритм проверки на соприкосновение заключается в том, чтобы сравнивать координаты четырех пикселей, непосредственно прилегающих к частице на данный момент, с координатами пикселей, содержащимися в списках  $crdx$  и  $crdy$ .

```
for n ← 1 to count
  x1 ← x + 1
  if x1 = crdx(n)
    and y = crdy(n)
    then contact ← true
  x1 ← x - 1
  if x1 = crdx(n)
    and y = crdy(n)
    then contact ← true
  y1 ← y + 1
  if x = crdx(n)
    and y1 = crdy(n)
    then contact ← true
  y1 ← y - 1
  if x = crdx(n)
    and y1 = crdy(n)
    then contact ← true
```

Здесь мы воспользовались так называемой булевой переменной под именем  $contact$ . Такая переменная может принимать одно из двух значений: «истина» или «ложь» (или, что эквивалентно, 1 или 0). Непосредственно перед началом цикла  $while$  переменной  $contact$  присваивается исходное значение «ложь».

Теперь мы почти полностью описали структуру программы SLO GRO, за исключением внешнего цикла  $while$ , который повторяет всю процедуру работы программы до тех пор, пока величина  $count$  не достигнет какого-то установленного числа частиц, ска-

жем 500. Полностью алгоритм SLO GRO представлен на нижнем рисунке. Те его фрагменты, которые уже были подробно описаны по отдельности, представлены здесь блоками, помеченными соответствующим образом. Фрагменты, которые не были описаны явно, включают такие операторы, как инициализация переменных, стирание и высвечивание частиц на экране. (Начинающим программистам следует иметь в виду, что команды *erase* (стереть) и *draw* (нарисовать) представлены здесь в условной форме: в реальных системах программирования таких команд нет. Они реализуются при помощи других операторов, закрасивающих элементы изображения на экране.)

Фрактальные образования, подобные тем, которые строит программа SLO GRO, имеют определенную размерность, характеризующую скорость их роста. Рассмотрим, например, число частиц, лежащих в пределах окружности радиуса  $R$ . Если частицы образовавшегося скопления более или менее равномерно и плотно заполнили область роста, то естественно полагать, что удвоение радиуса приведет к учетверению числа частиц, заключенных внутри окружности, другими словами, рост агрегата идет по квадратичному закону и, таким образом, число частиц пропорционально  $R^2$ . С другой стороны, если скопление частиц вытягивается в линию с немногочисленными ответвлениями или вообще без ветвей, то удвоение  $R$  приведет просто к удвоению числа частиц во внутренней части круга. Таким образом, рост агрегата будет линейным или пропорциональным  $R$ . Оказывается, фрактальный рост несколько быстрее линейного, но медленнее квадратичного: число частиц фрактального объекта, заключенных в круг радиуса  $R$ , пропорционально  $R^d$ , где  $d$  — число в диапазоне от 1 до 2.

Поэтому график зависимости числа частиц  $N$  в скоплении SLO GRO от радиуса круга  $R$  (в пикселях), построенный на бумаге в линейном масштабе, представляет собой кривую, по внешнему виду и своим свойствам находящуюся где-то между прямой и параболой, соответствующих линейному и квадратичному росту. Определить точно показатель степени роста, просто глядя на такой график, пожалуй, трудно. Намного проще это сделать, построив график в логарифмическом масштабе, т. е. на осях, на которых откладываются логарифмы величин.

На логарифмических осях координаты точек удваиваются, утраиваются или увеличиваются в какое-то определенное число раз, зависящее от выбора единиц. Если отложить зависи-

мость числа  $N$  от радиуса  $R$  на логарифмической бумаге, то с квадратичными кривыми происходит странная вещь — они превращаются в прямые линии! Почему? Вспомним, что при квадратичном росте каждый раз при увеличении радиуса вдвое число частиц увеличивается в четыре раза. На логарифмической бумаге это будет соответствовать увеличению на четыре единицы по вертикальной оси на каждые две единицы роста по горизонтальной. Но график такой зависимости представляет собой прямую линию с коэффициентом 2. На самом деле график роста, пропорционального  $R^3$ , будет выглядеть в логарифмическом масштабе тоже как прямая линия, с коэффициентом 3, в чем нетрудно убедиться, рассуждая аналогичным образом.

Теперь вам уже должно быть ясно, что делать, когда точки, соответствующие всем парам значений  $R$  и  $N$ , нанесены на логарифмическую бумагу. Если объект фрактальный, то все точки расположатся вблизи прямой линии (кроме, быть может, самого конца линии, где плотность частиц очень мала). Наклон полученной линии приблизительно равен фрактальной размерности объекта.

Смиретка сделал в точности то же самое с одним из произведений программы SLO GRO. Его график приведен на рисунке справа. Коэффициент полученной линии роста оказался равным 1,58. Правда, эта оценка немного меньше значений, обычно приводимых в научной литературе, но едва ли это обстоятельство испортит настроение любителю, проводящему свой собственный эксперимент. Он провел исследование с различными правилами прилипания частиц к агрегату и измерил размерности получившихся фракталов ДОА.

Как уже говорилось выше, другие читатели также построили свои версии программы SLO GRO. Например, С. Камазин из Итаки (шт. Нью-Йорк) считает, что его частицы не всегда движутся по случайным траекториям, а иногда даже создается впечатление, что они «набрасываются» на агрегат. Однако изображения полученных им фракталов убеждают меня в том, что его программа, по всей видимости, правильно отражает основные свойства диффузионно-ограниченной агрегации. Его программа написана для персональных компьютеров IBM PC и совместимых с ними машин.

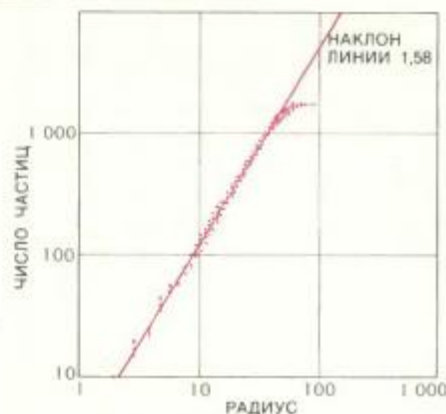
К. Эбер, выпускник журналистского факультета Колорадского университета в Баулдере, написал версию программы SLO GRO, в которой частицы рождаются в случайно выбранных точках левого края экрана. С по-

мощью своего приятеля Д. Сэйкена из университетского центра по астрофизике и астрономии он получил фрактальное скопление, приведенное на рисунке на с. 79. Через каждые 100 итераций Эбер менял цвет частиц, что позволяло ему быстро оценивать число частиц, скопившихся на экране дисплея.

Наконец, я должен также сказать и об М. Эллере, приславшем письмо из японского города Хиросима. Он составил программу SOOT (сажа), похожую на SLO GRO во всех отношениях, за исключением того, что у него диффузия проходит в обратном направлении: частицы выходят из центра экрана и блуждают до тех пор, пока не наткнутся на очертание окружности или на другую частицу сажи. В результате от окружности начинают расти ветви к центру, и в конце концов источник оказывается поглощенным этой паутиной.

**В НАШЕЙ СТАТЬЕ**, посвященной поиску простых чисел на берегах реки Континуум (см. сентябрьский номер журнала за прошлый год), бывалый старик золотоискатель совершил ошибку, доказывая, что простым числам нет конца: предположив, что  $n$  последнее простое число, он перемножил все простые числа от 2 до  $n$  и прибавил 1 к произведению. Полученное число он назвал  $p$ . Когда новичок воскликнул: «Уж не хотите ли вы сказать, что  $p$  простое число!», старик должен был ответить, что  $p$  не делится ни на одно из простых чисел конечной последовательности. Это означает, что либо само  $p$  является простым числом, либо существует другое простое число (не принадлежащее данной последовательности), которое делится на  $p$ . В любом случае все-таки существует новое «самое что ни на есть простое число».

Ну что ж, когда на берегах великой реки Континуум идет дождь, то он льет как из ведра — несколько более тонких ошибок были замечены некоторыми читателями. В частности, они заметили, что программа SLUICE2 проходит через значительно большее количество простых чисел, чем я указал в статье, предложив предельное количество итераций, равное одному миллиону. На самом деле предел оказался равным миллиону в квадрате, поскольку простые числа, хранимые в массиве, должны достигать лишь до квадратного корня из предельного значения. С.Д. Йейтс из Дэлри-Бич (шт. Флорида) получил многочисленные письма от наших читателей с просьбой выслать упомянутый мною в сентябрьской статье список всех простых чисел, больших 1000. Однако в действительности у



Как оценить величину фрактальной размерности

Йейтса есть список, содержащий все известные простые числа, количество разрядов которых превышает 1000.

Многие читатели представили новые магические квадраты из простых чисел, а некоторым удалось построить решетки, содержащие больше простых чисел, чем в рекордной на сегодняшний день решетке, насчитывающей 170 чисел. Победителям конкурса придется подождать до следующего номера журнала, в котором они будут официально объявлены.

В статье в октябрьском номере за 1988 г. было проведено описание «перемешивающей машины», клеточного автомата, изобретенного М. Герхардтом и Х. Шустер из Билефельдского университета в ФРГ. Перемешивающая машина прекрасно моделирует цветные волны, распространяющиеся в некоторых химических средах. Иногда у этих волн образуются острые края, завивающиеся в спирали и порождающие богатое разнообразие фигур Пэйзли. Но это не обязательно означает, как, по-видимому, считают некоторые читатели, что в этих волнах присутствует хаос; явления, происходящие в клеточном автомате, не следует путать с хаосом.

В статье о перемешивающей машине речь шла об алгоритмическом описании программы HODCE-PODGE. Составляя это описание, прислать которое меня попросили многие читатели, я смог не только детализировать инструкции, необходимые для моделирования химических реакций на экране домашнего компьютера, но и прояснить некоторые моменты, изложенные в статье. Во-первых, параметр  $g$  должен принимать целые значения в диапазоне от 1 до 20. Во-вторых, значение переменной  $A$ , количество зараженных клеток в окрестности данной зараженной клетки, должно также включать в себя и эту клетку.

Из многих интересных откликов читателей, касающихся перемешивающей машины, необходимо отметить Д. Смита из Эль-Серрито

(шт. Калифорния), сумевшего втиснуть правила перемешивающей машины в одно измерение. Смит устанавливает исходные значения в полоске клеток, расположенной в верхней части экрана. После того как автомат запущен, на экране появляются все новые и новые полоски, на которых

замысловатые конфигурации здоровых клеток сменяются зараженными. Однажды, после длительного ночного сеанса, Смит обнаружил конфигурацию, которая повторялась снова и снова подобно бесконечной последовательности отражающихся одномерных волн.

## Наука и общество

### Снова о радоне

**Т**ИХОЕ «вторжение» радона в нашу жизнь вызвало острые споры среди специалистов. В сентябре 1988 г. Агентство по охране окружающей среды (АООС) предупредило, что газ, просачивающийся из почвы в миллионы домов по всей стране, возможно, является причиной около 20 000 смертей от рака легких в год. Многие биофизики с этим не согласны. Один из бывших руководителей отдела радиационных стандартов АООС У. Миллс обвиняет агентство в том, что оно вводит людей в заблуждение, преувеличивая опасность радонового загрязнения. Новые исследования этого загрязнения и его связи с частотой раковых заболеваний заставляют уточнить прежние представления о степени опасности низких уровней радиации.

Радон образуется при распаде урана, содержащегося в некоторых земных породах. Попав в легкие, радон также распадается, в результате чего образуются вредные вещества. Доказано, что высокие концентрации радона, например на урановых рудниках, вызывают рак легких; предполагалось, что низкие концентрации увеличивают риск возникновения рака пропорционально дозе радиации.

В брошюре, выпущенной Службой здравоохранения США в сентябре 1988 г., содержится настоятельная рекомендация проверить большую часть зданий на содержание радона, и в тех домах, где концентрация этого газа превышает 4 пКи/л, установить фильтры и вытяжки. Новое исследование, проведенное АООС в семи штатах, показало, что почти в каждом третьем доме концентрация радона превышает уровень 4 пКи/л.

Р. Лапп, консультант по радиационной безопасности, считает, что при выпуске брошюры «главный медицинский инспектор получил плохую

подсказку». Лапп утверждает, что АООС завышает опасность в 2,5 раза, так как измерения проводятся зимой (при закрытых окнах) и в подвалах (где скапливается газ). Его предложение считать предельно допустимым для зданий уровень 10 пКи/л существенно снижает остроту проблемы. Лапп также отмечает, что 85% умерших от рака, связанного с воздействием радона, — курильщики, а курение усугубляет влияние газа. Он полагает, что, даже если принять в качестве допустимого тот уровень концентрации радона, который предлагает АООС, это может спасти не более чем 300 некурящих за год. Правительство, говорит он, не должно устанавливать слишком низкие нормы содержания радона в помещениях, только для того чтобы защитить курильщиков, и так сознательно рискующих своим здоровьем.

Лапп полагает, что АООС установило предел в 4 пКи/л, чтобы «сохранить свое лицо»: несколько лет назад оно предложило считать этот уровень допустимым для зданий, находящихся неподалеку от мест захоронения продуктов распада урана, и произвело дорогостоящие измерения в подтверждение своего предложения. Установление менее строгих норм содержания радона считает возможным и Миллс; по его мнению, АООС не сумело доказать, что многие из 20 000 смертей, которые оно приписывает влиянию радона, обусловлены очень низкими концентрациями этого газа, которые не удастся устранить с помощью обычных вытяжек и фильтров.

Результаты исследования Б. Козна из Питтсбургского университета заставляют сомневаться в правильности предположения, будто степень риска пропорциональна дозе радиации и при низких ее уровнях. Козн утверждает, что впервые подтвердил это предположение доскональной проверке. Изучая смертность от рака легких и средний уровень содержания радона

в 411 графствах США, он обнаружил, что смертность значительно ниже там, где концентрации радона высоки — противоположное тому, что ожидалось.

Козн исключил несколько «посторонних факторов» и картина прояснилась. По его мнению, ключом к разгадке может служить гипотеза о том, что малые дозы радиации могут на самом деле препятствовать развитию рака. Дж. Пускин из АООС, напротив, думает, что эти результаты объясняются каким-то еще не установленным посторонним фактором.

АООС не планирует пересматривать свои нормы по содержанию радона. Пускин говорит, что допустимые пределы нужно было бы установить даже ниже, если бы это было практически выполнимо. Но как заявил Р. Александер, президент Общества здравоохранения, у него есть «сильные подозрения», что оценки риска в отношении радона завышены. Эта организация сформировала специальную рабочую группу с целью прийти к единому мнению.

### Разложение стозначных чисел

**Р**АБОТАЯ с сетью, объединяющей более 400 компьютеров в США, Голландии и Австралии, группа ученых побилла все предыдущие рекорды, найдя два больших простых множителя для стозначного числа. Это достижение, результат самого крупномасштабного на сегодняшний день вычисления, выполняемого с помощью параллельно работающих компьютеров, начинает угрожать сохранению секретности некоторых шифров, применяемых правительственными, банковскими и промышленными учреждениями.

Чтобы разложить стозначное число, организаторы этого коллективного вычисления М. Манассе из фирмы Digital Equipment Corporation в Пало-Альто и А. Ленстра из Чикагского университета решили применить метод, изобретенный Карлом Померансом из Университета шт. Джорджия. Этот метод разложения на множители, известный под названием квадратичного решета, основан на отыскании двух чисел, которые, будучи возведенными в квадрат и поделенными на исходное (раскладываемое) число, дают один и тот же остаток. Например, чтобы, следуя этому методу, найти множители числа 15, мы найдем, что числа 8 и 2, возведенные в квадрат и поделенные на 15, оба дают в остатке 4. После того как были найдены такие числа, нетрудно вычислить искомые множители. В дан-

ном случае из 8 следует вычесть 2, в результате получим 6. Затем 6 вычитается из 15 столько раз, сколько это возможно, так чтобы разность не получилась отрицательной. Окончательный результат 3, а это действительно один из главных простых множителей числа 15. Хотя для разложения маленьких чисел метод квадратичного решета выглядит неуклюжим и медленным, для больших чисел — это самый быстрый из известных на сегодняшний день методов.

Другое преимущество метода квадратичного решета заключается в том, что задачу отыскания множителей можно распределить между многими одновременно работающими компьютерами. Так, основная координационная часть работы по разложению стозначного числа производилась компьютером на фирме DEC, а остальные вычисления были распределены между вычислительными центрами США, Голландии и Австралии. На 26-й день работы Манассе и Ленстра накопили достаточно данных, чтобы разложить стозначное число, равное  $11^{104} + 1$ , поделенное на  $11^8 + 1$ , на простые множители длиной в 41 и 60 знаков.

При наличии алгоритмов разложения на множители столь больших чисел появляется возможность расшифровки некоторых кодов широко распространенной криптографической системы, созданной Р. Ривестом, А. Шамиром и Л. Эдельманом из Массачусетского технологического института. Система Ривеста, Шамира и Эдельмана (RSA) основана на том факте, что, хотя большие простые числа вычисляются сравнительно легко, задача разложения на множители произведения двух таких чисел является исключительно трудоемкой и считалась практически неразрешимой. Каждый пользователь системы RSA выбирает два больших простых числа и передает их произведение. Сообщение преобразуется в числовую цепочку каким-нибудь обычным методом, а затем кодируется посредством математической операции с использованием переданного числа. Сообщение можно декодировать только посредством другой математической операции с использованием исходных простых чисел. Однако если найти множители переданного числа, то сообщение может быть декодировано посторонними людьми. Чтобы система оставалась надежной, пользователи должны выбирать достаточно большие простые числа, такие, чтобы их произведение практически было невозможно разложить.

После удачной попытки, предпринятой Манассе и Ленстрой, многие организации, возможно, вынуждены

будут пересмотреть степень надежности своих шифров и пользоваться впредь еще большими числами. По оценке Ривеста, сделанной им в 1977 г., код с использованием числа длиной 125 разрядов и состоящего из двух простых чисел по 63 разряда каждое, можно было считать вполне надежным. Время, требовавшееся самому быстродействующему компьютеру тех лет разложения 125-разрядного числа, составляло 40 квадриллионов лет. Системе же, подобной той, которой воспользовались Манассе и Ленстра, для расшифровки такого кода, по их словам, хватило бы и одного года.

### Электронный «ноев ковчег»

**СЕРЬЕЗНО** встревоженные перспективой исчезновения большинства объектов своих исследований, биологи организуют кампанию по ускоренной каталогизации растений и животных, существованию которых угрожает уничтожение лесов и другие последствия развития хозяйственной деятельности человека. Начинается также количественное изучение устрашающей динамики этого процесса; для обработки данных при осуществлении подобной программы мероприятий понадобится широко применять компьютеры.

Тревожные сигналы биологов были услышаны. В октябре 1988 г. конгресс США принял совместную резолюцию, призывающую президента активизировать обсуждение вопросов, связанных с заключением международного соглашения по охране биологического разнообразия. Одновременно Национальный совет по науке (орган, определяющий стратегию использования средств Национального научного фонда) учредил специальную рабочую группу по этой проблеме.

В Смитсоновском институте рассматривается вопрос об организации Национального центра по биологическому разнообразию. По словам С. Шелтера из Национального музея естествознания, это научное учреждение должно будет изучать экологические процессы и разрабатывать стратегии сбора образцов живых объектов в районах, находящихся под угрозой. Хотя первоначально центр был задуман как национальная организация, Шелтер полагает, что впоследствии он станет международным, и в его задачи войдет подготовка кадров местных специалистов для развивающихся стран.

Причина всей этой бурной деятельности — растущая тревога по поводу исчезновения тропических лесов, являющихся средой обитания для ос-

новной части видов, населяющих нашу планету. Большинство из них до сих пор не описано, а оценки скорости разрушения лесов становятся между тем все более мрачными. Т. Лавджой из Смитсоновского института сообщает, что ежeminутно уничтожается от 20 до 40 га тропического леса. Цифры, полученные Лавджоем на основании результатов дистанционных обследований, существенно выше оценок, сделанных несколько лет назад.

Неописанные виды постепенно вымирают, а биологи не успевают обработать даже уже существующие музейные коллекции. Шелтер подчеркивает, что на территории одних только Соединенных Штатов существует множество систематических групп, для которых нет самых простейших определителей. В первых проектах составления кадастров видового разнообразия основное внимание уделяется картированию территорий с различной степенью угрожаемости и их динамики, однако эти попытки, как говорит Шелтер, потерпели неудачу главным образом из-за отсутствия необходимой информации.

По мнению У. Харриса из Национального научного фонда, для выполнения этой задачи, возможно, не хватит специалистов-систематиков. Число таких специалистов, выпускаемых университетами, постоянно сокращается отчасти потому, что студентов, изучающих систематику, часто переманивает молекулярная биология. Есть надежда как-то компенсировать недостаток людей путем создания компьютерных банков данных, позволяющих ускорить компиляцию и обмен информацией. «Компьютеризация — единственный способ справиться со всем этим», — считает П. Рейвен из Ботанического сада шт. Миссури.

Недавно в Вашингтоне состоялось совещание Ассоциации систематических коллекций, посвященное обсуждению потребностей в компьютерном обеспечении. Согласно данным Дж. Дейвиса — одного из организаторов совещания, в настоящее время компьютерной каталогизацией охвачено менее 10% экземпляров из имеющихся в США коллекций, в то время как общее число экземпляров возрастает ежегодно примерно на 11 млн., что составляет 5%. Кроме того, ожидается рост числа запросов на информацию. «Мы просто в критическом положении», — сказал Дейвис. Ассоциация рассчитывает, что уже в течение ближайших 10 лет через компьютеры можно будет получить данные об основной части американских коллекций, но еще предстоит оценить стоимость необходимой мощности компьютеров.

## Обзор книг для юного читателя



### ФИЛИС И ФИЛИП MORRISON

*Вильям К. Хартман. Огненные циклы: звезды, галактики и чудеса глубокого космоса. Иллюстрации Вильяма К. Хартмана, Рона Миллера, Памелы Ли, Тома Миллера.*

CYCLES OF FIRE: STARS, GALAXIES AND THE WONDERS OF DEEP SPACE, by William K. Hartman. Workman Publishing (\$ 14.95)

**ЗАГАДОЧНАЯ** плоская равнина. На горизонте виднеется гряда огромных валунов. Ландшафт необычен. Быть может, это результат какого-нибудь древнего геологического процесса на Земле? Однако наше предположение неверно. Над горизонтом мы видим багровое солнце-звезду с размытыми контурами, диаметр его слишком велик для нашего Солнца. Рядом с ним находится небольшое второе солнце, блистающее яркой голубиной; оно составляет разительный контраст с первым. Автор книги, астроном и художник, изобразил ландшафт на планете, находящейся на орбите вокруг двойного красного гиганта Антареса со своим спутником. Эту большую книгу украшают около 100 рисунков, выполненных в ярких и темных тонах. Они принадлежат кисти четырех художников.

Текст книги — это, по существу, введение в астрономию для широкого читателя. Вначале рассказывается о том, как живут и умирают звезды, и о планетах. Затем говорится о галактиках, возможно таких же «гостеприимных», как и наша, а также о галактиках, из центров которых в противоположных направлениях вырываются сильные струи. Галактики вращаются и сталкиваются, причем пространство оказывается пронизанным их звездными хвостами. В конце книги автор высказывает догадки, какой может быть внеземная жизнь. Здесь рисунки более привычные: молния, океанские просторы и остатки пресмыкающихся на какой-то покрытой льдами планете. Все рисунки в книгах великолепны. Мы наслаждаемся свободой смешения красок и контрастов. Любой вдумчивый читатель узнает для себя что-то новое из этих изображений, дающих волю фантазии.

Книга посвящена Жюлью Верну; ему бы она наверняка понравилась, хотя неизвестные путешественники, о которых здесь рассказывается, совершили гораздо более далекое путешествие, чем капитан Немо.

МИР МАТЕМАТИКИ, в 4-х томах. Под редакцией Джеймса Р. Ньюмена.

THE WORLD OF MATHEMATICS, edited by James R. Newman. Four volumes. Tempus Books, Microsoft Corporation (\$ 50).

**ДЖЕЙМС НЬЮМЕН** был талантливым юристом и прекрасно знал математику. В 1956 г. он опубликовал антологию математики, составленную им с большим старанием и любовью, для широкого круга читателей. В книгу вошли более 133 статей, включая работы математиков от Архимеда до Тьюринга и лучшие популярные комментарии к ним. Благодаря доступности изложения и остроумию предисловия, написанного Ньюменом, книга стала подлинным триумфом. С тех пор было продано более 200 тыс. экземпляров. И хотя книга уже много лет не переиздавалась, она по-прежнему увлекательна.

*О.А.В. Дилк. ЧИТАЯ ПРОШЛОЕ: МАТЕМАТИКИ И ИЗМЕРЕНИЯ.*

READING THE PAST: MATHEMATICS AND MEASUREMENT, by O.A.W. Dilk. University of California Press/British Museum (\$ 7.95).

В своей небольшой работе профессор Дилк «хотел показать, сколь многочисленными свидетельствами мы располагаем; они проливают свет на уровень математических знаний древних людей и методы измерений, которыми они пользовались». Автор книги — латинист из Университета Лидса — давно интересуется картами и методами топосъемки древних греков и римлян. В его работе не оставлены без внимания Египет, Шумер и Вавилон; несколько страниц посвящены Индии, исламскому миру. В десяти главах рассказывается о древних си-

стемах счисления, о способах составления карт, топосъемки, измерения времени, взвешивания, о математике в ремеслах и торговле, а также о занимательной математике — вплоть до того времени, когда появился ноль.

Мы узнаем о знаменитом папирусе Ринда, скопированном приблизительно в 1575 г. до н.э. писцом Ахмесом с другого папируса, которому уже тогда было 250 лет. В нем собраны решения арифметических и геометрических задач, многие из которых связаны с пирамидами, дается значение числа  $\pi$  ( $16/9$ )<sup>2</sup>.

Все мы знаем римские цифры, однако вряд ли многим известно о милетской системе счисления, в которой числа обозначались греческими буквами. Эта система существовала начиная с 6 в. до н.э. вплоть до падения Константинополя. Изображенная в книге восковая дощечка содержит таблицы умножения в греческой системе. На другом древнем манускрипте можно различить числа 1, 5 и 6, возведенные в степени от 1 до 5 и записанные римскими цифрами. А вот фрагмент плана города Рима, выполненный на мраморе около 205 г. до н.э. в масштабе примерно 1:250, содержащий лишь некоторые неточности. Другие изображения в книге, например древних весов и гирь, также любопытны, но более привычны. Книга написана доступным языком и будет интересна любому любознательному школьнику.

*Мисумаса Анно. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ИГРЫ АННО*

ANNO'S MATH GAMES, by Misumasa Anno. Philomel Books, Putnam Publishing Group (\$ 18.95)

**ВНОВЬ** на красочных рисунках Анно мы видим веселых эльфов, которые в этой книге хотят поведать основы математики самым маленьким читателям. Если на ее страницах и есть текст, то всего несколько строчек (не считая полезных указаний для учителей и родителей).

Анно предлагает своим читателям четыре игры. Предмет первой игры — различия внутри множества. Вначале все совсем просто: красный круг в ряду синих квадратов. Но на следующих 16 страницах требуется проявить способность к распознаванию образов. Затем эльфы предлагают комбинировать элементы. Объединение зонтика и трости имеет практический смысл, что же касается слов и картинок, то в результате хитроумной комбинации может получиться даже черная морковь или горький леденец. В третьей игре используются игральные карты, с тем чтобы объяс-

нить функции числа как количественного, так и порядкового. Вскоре малыш уже может обозначать небольшую группу домов при помощи карточных значков.

В четвертой игре эльфы занимаются сравнением длин, например они сопоставляют высоких детей и детей маленького роста и располагают палочки по длине. В конце книги они знакомят читателей с отношением и пропорцией, распределяя трубы с водой и соответствующие им кусочки сахара так, чтобы в конце концов найти трубу с самой сладкой водой. Автор избегает математических терминов, делая упор на развитие интуитивного мышления. Несмотря на свою кажущуюся простоту, книга требует серьезной работы. В этом смысле она прямо противоположна комиксам, которые слегка напоминает.

*Дон Козн. Задачи для школьников CALCULUS BY AND FOR YOUNG PEOPLE, by Don Cohen. The Math Program (\$ 12)*

**КАК РАЗДЕЛИТЬ** поровну шесть пирожков на семь человек? Третьеклассник Брад сообразил правильно: сперва нужно разделить каждый пирожок пополам и раздать всем по одной половинке, затем опять разделить оставшиеся куски пополам и раздать каждому по одинаковому куску и т. д. Брад закончил этот процесс, дойдя до одной шестнадцатой пирожка. Очевидно, что его можно продлить и дальше и то, что достанется каждому человеку, записать в виде следующей последовательности:  $1/2 + 1/4 + 0/8 + 1/16 + 1/32 + 0/64 + \dots$ . Итерационный процесс более эффективен и в большей степени опирается на интуицию, чем просто деление каждого пирожка, пусть даже и круглого, на семь равных частей.

В книге форматом с ладонь и переплетенной спиралью Дон Козн, прекрасный педагог, приводит интересные задачи, которые его ученики решали на протяжении десятилетий. С помощью них они постепенно постигали понятия интеграла, натуральных логарифмов и экспоненты. При решении этих задач попутно сталкиваясь с большим количеством известных задач, среди них — доказательство расходимости гармонического ряда, нахождение суммы ряда Фибоначчи и т.д. Книга эта будет интересна не только школьникам, склонным к математике, но и взрослым, которых, несомненно, привлечет нестандартный подход автора.

*Хелен Рони Сэттлер. НАШИ ПРЕДКИ — ГОМИНИДЫ*

**HOMINIDS: A LOOK BACK AT OUR ANCESTORS, by Helen Roney Sattler. Lothrop, Lee & Shepard Books (\$ 29.95)**

*Бьорн Куртэн. КТО НАСЕЛЯЛ НОВЫЙ СВЕТ ДО ПОЯВЛЕНИЯ ИНДЕЙЦЕВ. BEFORE THE INDIANS, by Bjorn Kurten. Columbia University Press (29.95)*

**ПРЕДНАЗНАЧЕННЫЕ** для учащихся 3—4-х классов, эти книги, несомненно, будут интересны и взрослым. Первая из них отличается большей сжатостью и простотой изложения и богато иллюстрирована черно-белыми рисунками. Хелен Сэттлер дает описание немногочисленных, но весьма ценных находок костей и обработанного камня, помогающих проследить историю возникновения вида *Homo sapiens*. Место действия книги — Восточная Африка и пещеры острова Ява, Китая и Франции.

Человек не сразу научился защищаться от своих главных врагов — хищных кошачьих. В подтверждение этой мысли автор приводит один пример. Череп 12-летнего гоминида из пещеры, образованной в известковых породах (Южная Африка), имеет два следа, в точности соответствующие клыкам доисторического леопарда, остатки которого найдены в той же пещере. Молодой гоминид был не обитателем пещеры, а жертвой ее хозяина — леопарда.

Автор обращает наше внимание на незавершенность и неоднозначность существующей классификации гоминид и построенного родословного древа человека и на необходимость их дальнейшей доработки.

Бьорн Куртэн, известный палеонтолог из Хельсинки, подробнейшим образом живо повествует о животных, населявших Американский континент до появления палеоиндейцев — непосредственных предков аборигенов Америки. Среди остатков древнейших обитателей Нового Света кости многочисленных «пассажиров Ноева ковчега»: апалачских наземных ленивцев, обитателей равнин — зебр, гиен, слонов, тигров — флоридских лам, летучих мышей-вампиров, а также хищных бескрылых птиц. Однако нигде в Америке не обнаружено остатков гоминид. Пока точно не известно, когда и где там появились первые люди, ясно лишь, что это произошло далеко не на ранних стадиях эволюции человека.

В книге говорится о том, как находки остатков крупных животных в пещерах, асфальтовых озерах, карстовых воронках в известняковых породах, в застывшей лаве, отвесных стенках каньонов и в речном иле позволяют составить представление о том, какие животные населяли Новый Свет 3 млн. лет назад. Приведем

один пример. Остатки различных подвидов доисторического льва обнаружены на огромной территории от Африканских разломов до Европы, от Европы до Монголии и далее до Владивостока и Южной Америки. В одной только Северной Америке остатки льва были обнаружены в 40 местах. В свои лучшие дни доисторический лев обитал одновременно на 5 континентах, в самых разных климатических условиях, лев — наиболее адаптировавшееся и самое распространенное из всех наземных млекопитающих до прихода человека. Воистину «царь зверей», самый умный и сильный из всех кошачьих, он охотился в лесах и на равнинах от Аляски до Флориды. В Америке этот лев вымер около 10 000 лет назад. Почему? На последних страницах книги автор приводит и анализирует все гипотезы и предположения на этот счет.

*Линанн Вескотт, Пола Диджен. ВЕТЕР И ПЕСОК: БРАТЬЯ РАЙТ В КИТТИХОУК. Предисловие Оливера Йенсена. WIND AND SAND: THE STORY OF THE WRIGHT BROTHERS AT KITTY HAWK, by Lynanne Weskott and Paula Degen. Foreword by Oliver Jensen. Eastern Acorn Press, distributed by Harry N. Abrams, Inc. (\$ 19.95)*

**В ЭТОЙ КНИГЕ**, раскрывающей перед нами период жизни братьев Райт с 1900 по 1911 г., использованы в основном их собственные высказывания (взяты из писем и дневников этого периода) и фотографии. Большая часть фотографий воспроизводится с фотопластинок, отснятых, а затем проявленных самими братьями. Великолепное введение раскрывает перед нами ту огромную и кропотливую работу, которая стоит за успехом братьев Райт. Шаг за шагом методом проб и ошибок они проверяли свои предположения. Долгие зимы были потрачены на эксперименты в аэродинамической трубе; в летнее же время были сделаны сотни отчаянно смелых попыток летать в дюнах. И как награда за это — овладение искусством полета!

На страницах книги и на фотографиях перед нами предстают ее герои — два велосипедных механика, блестящие инженеры и неутомимые мечтатели. Мы видим их небольшую велосипедную фабрику-мастерскую в Дейтоне, где они сперва установили двигатель внутреннего сгорания на токарном станке, а шесть лет спустя собрали двигатель (также внутреннего сгорания) для своего самолета. Снова и снова мы видим братьев в кепках и с засученными рукавами за работой в дюнах или вблизи времян-

нок, сооруженных ими на холме Килл-Дэвил. Как остроумно замечает Оливер Йенсен, все это напоминает знаменитые чаплиновские немые фильмы тех лет, — история двух неловких, но весьма решительных молодых людей, вступающих в конфликт с местными властями.

Перед нами фотографии взлетной полосы стоимостью всего в 4 доллара, только что изготовленных летательных аппаратов, а вот и знаменитый снимок первого удачного старта, сделанный служащим береговой охраны Дж. Дэниельсом как раз в тот момент, когда машина оторвалась от земли. На последних фотографиях мы видим, как братья Райт совершают пробные планирующие полеты в 1911 г.

**ВАХТЕННЫЙ ЖУРНАЛ ХРИСТОФОРА КОЛУМБА.** В переводе Роберта Х. Фьюзона

THE LOG OF CHRISTOPHER COLUMBUS, translated by Robert H. Fuson. International Marine Publishing Company (\$ 29.95)

**В** ПЯТНИЦУ 3 августа 1492 г., за полчаса до восхода солнца, великий адмирал во главе флотилии из трех каравелл вышел из испанского порта Палос в направлении Канарских островов, окрыленный надеждой осуществить свой смелый замысел — достичь Индии и владений Великого Хана западным путем. Выйдя в море, «я решил вести подробную запись всего сделанного и увиденного мною в пути». Этот документ, написанный Колумбом на неродном ему, генуэзцу, испанском языке (кастильском диалекте), был «наиболее полным и подробным из всех когда-либо составленных вахтенных журналов». Весной, по возвращении Колумба в Испанию, журнал был преподнесен королеве. Щедрая покровительница распорядилась снять с него для адмирала точную копию, которую он получил осенью 1493 г. Увы, к 1550 г. оба варианта этого ценнейшего документа оказались бесследно утраченными.

Известный историк — доминиканец Бартоломе де Лас-Касас был другом семьи Колумба и горячим поклонником знаменитого мореплавателя и первооткрывателя. Многие годы своей жизни (значительную часть которой он провел в Новом Свете) Лас-Касас посвятил написанию своей знаменитой «Истории Индии». Он умер в возрасте 92 лет, так и не успев окончательно завершить работу над рукописью. Лас-Касас видел вахтенный журнал Колумба, более того, он составил его сокращенный вариант. Именно этот вариант, обнаруженный

лишь в 1790 г., является основным и практически единственным источником наших знаний о журнале, за исключением немногих дополнительных сведений из книги Лас-Касаса и нескольких выдержек из журнала, вошедших в биографию Колумба, написанную его сыном Эрнандо.

И вот перед нами этот документ, переведенный на современный английский язык и снабженный комментариями и прекрасными иллюстрациями. Удивительное чувство охватывает, когда читаешь о том, что особенно поразило или заинтересовало Колумба во время его первого плавания в неизведанный Новый Свет. Но, пожалуй, интереснее всего следить за тем, как по мере продвижения мореплавателя вдоль Багамских островов к Кубе и Эспаньоле (одно из прежних названий о. Гаити. — *Ред*) рушится его вера в сказочно богатых золотом туземцев, так же как и убежденность в том, что перед ним — подданные Великого Хана.

Около десяти часов вечера в тот день — день открытия Америки (12 октября 1492 г.) — адмирал первым заметил огонь: он «был похож на пламя маленькой восковой свечи и казалось, что он то поднимается вверх, то опускается вниз... На рассвете мы увидели нагих людей, и я сошел на берег». Где же произошла эта первая высадка? К настоящему времени учеными было предложено более 40 возможных мест-«кандидатов», последним из которых является Самана-Кей (один из 723 островов в южной части Багамского архипелага). Океанолог Фьюзон приводит убедительные аргументы (подкрепляемые множеством подробных морских карт) в пользу этой последней гипотезы, хотя за отсутствием исходного текста вахтенного журнала (возможно, что и его наличие не устранило бы всех сомнений) не удается полностью избавиться от некоторых расхождений при расчете расстояний и направлений. Остается надеяться на то, что когда-нибудь археологи добудут нам новые сведения.

**СЛАЙДЫ АМУНДСЕНА.** Под редакцией Роланда Хантфорда

THE AMUNDSEN PHOTOGRAPHS, edited and introduced by Roland Huntford. The Atlantic Monthly Press (\$ 35)

**РАУЛЬ АМУНДСЕН** родился в 1872 г. недалеко от Осло в состоятельной семье владельца судовой верфи. Движимый страстью к путешествиям, он в двадцать с небольшим лет начал плавать матросом на разных судах. Первым за всю историю мореплавания Амундсен на собственном судне прошел Северо-Западным про-

ходом от Гренландии до Аляски, за три года (1903—1906 гг.) пробывшись через лабиринт островов Канадского Арктического архипелага.

В 1909 г., подготавливая экспедицию на Северный полюс, Амундсен узнает о том, что туда же направляется экспедиция американского исследователя Роберта Пири. Тогда он сразу решает отправиться в Антарктику. В 1911 г. Амундсен благополучно достиг Южного полюса к намеченному сроку отчасти благодаря тому, что участники экспедиции имели первоклассные норвежские лыжи, были одеты в меховую эскимосскую одежду, а сани тянули 100 ездовых собак, которые сперва питались мясом тюленей, а затем своими собратьями.

Однако это путешествие разорило Амундсена: на его подготовку ушло все личное состояние. И хотя норвежское правительство пожаловало путешественнику некоторую сумму денег, она не покрыла его долгов. Недостаточно было и гонораров за публикацию книг и газетных статей; лишь длительные поездки с лекциями могли дать прославленному путешественнику необходимую для погашения долга сумму. В одной только Америке Амундсен за полгода прочитал около 160 публичных лекций. «Я не знал покоя ни днем ни ночью... и сделался дельце какой-то лекционной машины.»

Популярные лекции, разумеется, требовали показа иллюстративного материала. В качестве такового Амундсен использовал слайды. Тогдашняя неподвижная фотокамера позволяла получать диапозитивы размером примерно 8 × 10 см. Диапозитив помещался между двумя стеклянными пластинками и изображение на нем проецировалось на экран. Обычно эти черно-белые слайды подкрашивались от руки. Хрупкие и тяжелые, они доставляли лектору множество хлопот при переездах.

Из сотен слайдов, которые Амундсен использовал во время лекций, уцелели лишь несколько потрескавшихся и выцветших экземпляров. В 1986 г. организаторы выставки, устроенной в Норвегии в честь шестидесятилетия перелета Амундсена через Северный полюс к Аляске на дирижабле, стали разыскивать новые предметы, связанные с именем знаменитого путешественника. И вот тогда-то одна из родственниц Амундсена обнаружила на чердаке своего дома в Осло принадлежащий ему когда-то деревянный ящик с надписью: «Сухое молоко Хорликса». Вместо ожидаемого порошка ящик содержал 200 слайдов, по-видимому неиспользованных дубликатов.

Слайды освещают три самые известные экспедиции Амундсена: через



Северо-Западный проход к Аляске, на Южный полюс и через Северо-Восточный проход вдоль северных берегов Евразии, последняя из них была осуществлена в конце первой мировой войны. В книге мы видим фотографии, сделанные с этих слайдов. Они дополнены картами и живым повествованием о всех трех экспедициях. Вот один из снимков — последний из сделанных на Южном полюсе. Четверо путешественников находятся рядом с маленькой палаткой темного цвета, из которой они вышли, чтобы отметить самую южную точку Земли — Южный полюс. Рядом развевается норвежский флаг, который на слайде был старательно раскрашен художником. «Я оставил... небольшое послание Скотту, — писал Амундсен, — который, надо думать, первым придет сюда после нас.» Как мы знаем, именно так и было.

*Дэвид Вайтцман. СВЕРХМОЩЬ: СОЗДАНИЕ ПАРОВОЗА*  
SUPERPOWER: THE MAKING OF A STEAM LOCOMOTIVE, written and illustrated by David Weitzman. David R. Godine, Publisher, Inc. (\$ 19.95)

**З**ДАНИЯ завода по производству паровозов в городе Лима (западная часть шт. Огайо) тихо стоят там, где блестящие рельсы компаний Nickel Plate и Baltimore & Ohio соединяются в магистраль, ведущую в Узбаш-Ривер. Когда-то здесь было построено большое количество паровозов. Этот район Лимы сотрясался от ударов паровых кузнечных молотов, когда из раскаленных заготовок выковывали шатуны и пальцы кривошипа. Самым большим и шумным был цех, где делали паровые котлы и работала пневматическая клепальная машина. По железной дороге сюда привозили стальные болванки и кокс, а также некоторое количество медных свистков, и каждый день отсюда уходили новые локомотивы, которые с годами становились все более тяжелыми и внушительными.

На двойном развороте этой книги мы видим выполненный тушью рисунок грандиозного и знаменитого создания — паровоза А-1. Свой первый испытательный рейс он совершил из Лимы в Беркшир в апреле 1925 г. А-1 послужил прототипом для более чем 600 паровозов весом в 200 т, имевших мощность 3000 л.с. Они выпускались на протяжении около 25 лет. «Строители паровозов оценивали свою продукцию на вес, так же как бобы и картофель», — говорит главный конструктор Уилл Вудард. Однако, если его спросить, какова все же была действительная стоимость

паровоза А-1, он не задумываясь ответит: «184 тысячи долларов».

Двадцать великолепных рисунков дают возможность проследить процесс рождения гиганта. Все началось с чертежа или даже с нечто еще более эфемерного — идей, которые воплощались на бумаге в конструкторском бюро. Затем из ели и дуба изготавливали модели деталей паровоза, а из них — литейные формы в песке, с помощью которых детали отливали из железа и стали.

Конечно же, паровозы строили не машины и инструменты, а люди с их помощью. Мы видим этих людей на большинстве рисунков. В основу книги легли воспоминания автора о встречах с людьми, которые когда-то работали на заводе в Лиме. От них он услышал много интересных подробностей. Например, котельщики, как правило, слегка глуховатые, составляли что-то вроде клана — все как на подбор здоровяки, очень похожие друг на друга, будто братья. Молотобойцы же всегда выигрывали состязания по перетягиванию каната.

Последний паровоз был построен в США в 1953 г. Даже автоматические топки и длинные колосники, благодаря которым стало возможным загружать топливо без помощи лопаты, не смогли спасти их. Дорогие, но вместе с тем обладающие высоким к.п.д. дизельные двигатели на тепловозах не требуют ни остановок для заправки водой, ни удаления золы, ни замены колосников и к тому же в них используется дешевое нефтяное топливо. Возможно, когда-нибудь выйдет в свет такая же проникнутая ностальгией книга о заводе, производившем тепловозы.

*Мадхур Джаффи. ВРЕМЕНА великолепия: сказки, мифы и легенды Индии.* Иллюстрации Майкла Формана  
SEASONS OF SPLENDOR: TALES, MYTHS & LEGENDS OF INDIA, by Madhur Jaffrey, illustrated by Michael Foreman. Viking Penguin Inc. (\$ 7.95)

**Н**Е НАПРАСНО мать Мадхур Джаффи каждый год освящала орудия семейного ремесла — обычные карандаши и ручки. Ведь семья Джаффи, чьи традиции уходят в глубокое прошлое, посвятила себя искусству сочинительства. В шесть лет Мадхур потянуло к «бумаге и карандашу», и сейчас мы можем видеть, что из этого получилось и оценить ее любовь и бережное отношение к слову, сказаниям, ее умение их интерпретировать.

Автор предлагает нашему вниманию более двадцати историй и рассказов, непринужденно написанных,

причем рассказы даются в порядке, соответствующем индийскому календарю. В книге рассказывается об известных героях индийских мифов, таких как Рама и бог Кришна, Шива и Парвати, их сын Ганеш с головой слона и царь обезьян Хануман. Эти истории знакомы каждому в Индии. Но о них слагают и семейные предания, а в некоторых семьях существуют также связанные с ними семейные традиции, знакомые только членам данной семьи, как, например, тем «проказникам», о которых упоминает Мадхур в своей книге, имея в виду своих двадцать двоюродных братьев и сестер, которые когда-то жили в большом доме своего дедушки в Дели. В книге переплетается серьезное и смешное, и ее хочется читать снова и снова. Каждый может найти в ней что-то по душе.

Вот две легенды из этой книги. Жил-был один надменный правитель. Ему было даровано богом не быть убитым ни человеком, ни зверем, ни одним существующим на земле оружием, ни днем ни ночью, ни на земле ни в воде, ни в доме, ни вне его. День ото дня правитель становился все злее и злее, и бог решил покарать его. Приняв облик получеловека-полульва, он явился ко дворцу правителя-злодея. В сумерках это странное существо посадило себе правителя на колени и на пороге дворца лапой разорвало его на части.

Другая легенда — о волшебном даре. Говорят, что во время полнолуния в октябре лунные лучи посылают на Землю небесный нектар. В это время девушки из одного дома пытались при лунном свете вдеть нитку в иголку, повторяя это 110 раз. Если это удавалось сделать, то ваши усталые глаза наполняются нектаром и становятся яркими и блестящими. Гораздо реже нектар может коснуться ваших губ, а это делает вас бессмертными. Для этого хозяйки дома готовят обычно сладости из масла, сахара и манки, кладут на большие подносы и выставляют на крыше дома в лунную ночь.

Майкл Форман — автор иллюстраций, помещенных в книгу, специально побывал в Индии, чтобы собрать в себя краски страны. Его рисунки столь же красочны, как и весенний праздник Холи, во время которого индийцы разрисовывают друг друга красками.

*Дебора Норс Лэттимор. ОГОНЬ МИРА, АЦТЕКСКАЯ ЛЕГЕНДА*  
THE FLAME OF PEACE: A TALE OF THE AZTECS, by Deborah Nourse Lattimor. Harper & Row, Publishers (\$ 12.95)

**М**Ы МАЛО что знаем о преданиях ацтеков, чья великая столица ныне известна как Мехико. Молодая

талантливая художница, она же автор текста, «воссоздала» для юных читателей ацтекский миф на основе того немногого, что нам известно о жизни этого народа.

Отец молодого ацтека Ту Флинта был убит в бою. Накануне очередной битвы, когда в храме горел огонь, а воины отдыхали перед сражением, Ту Флинт отправился в путь, чтобы принести мир на землю. Он узнал от своей матери, что мир наступит лишь тогда, когда удастся добыть Новый Огонь у Господина Утренней Звезды. Никто прежде не отваживался подняться к нему на Далекую Гору. Однако Ту Флинт, получивший во сне совет использовать в битве не оружие, а остроумие, бесстрашно двинулся в путь. Ему удалось одолеть девятерых Повелителей Зла; даже сама госпожа Смерть отступила перед ним. Герой получил из рук Господина Утренней Звезды священный огонь, и, когда он водрузил его на высокий алтарь, наступил наконец долгожданный мир. Бывшие враги обнялись как братья и слили свои голоса в едином хоре.

Книга выдержана в едином стиле. Это касается и ее оформления и рисунков. Иллюстрации, которыми заполнены почти все страницы книги, делают ее похожей на красочный комикс. Заканчивается она целой серией рисунков, тут мы видим птицу кецаль, обсидиановый наконечник для стрел, маисовые лепешки и сосуды с краской, — все это объединено в живые сцены среди экзотических рек, цветов и сверкающих символических солнц. Дебора Лэттимор стремилась завоевать самую взыскательную аудиторию — маленьких читателей. И ей это несомненно удалось.

**МОРОЖЕНОЕ.** Текст и фотографии Уильяма Джасперсона  
ICE CREAM, written and photographed by William Jaspersen. Macmillan Publishing Company (\$ 13.95)

**ВЕЛИКОЛЕПНО** иллюстрированная книга Уильяма Джасперсона, живущего в шт. Вермонт, расскажет юному читателю об известной далеко за пределами этого штата фирме Ben & Jerry. На титульном листе помещена фотография двух школьников, поглощающих изумительное мороженое, которое производит эта фирма. 40 страниц текста и 70 фотографий дают возможность проследить всю безупречно чистую технологическую цепочку изготовления этого чуда. Попутно мы знакомимся с основателями фирмы, а также со многими ее специалистами.

Сначала сепаратор выделяет из цельного молока жирные сливки. Затем в них добавляют сахар, который

привозят из далеких тропических стран, где выращивают сахарный тростник. С помощью простых схем автор объясняет работу машин, пастеризующих, гомогенизирующих, формирующих и автоматически упаковывающих мороженое. Все эти операции достаточно просты, а вот главная тайна — технология заморозки — так и не раскрывается, вероятно, потому, что ее вполне можно было бы воспроизвести и в домашних условиях.

В свое время восхитительное хрустящее мороженое получали, сбрасывая несколько раз коробки с брусками обыкновенного мороженого на пол с лестницы. В наши дни технология ушла далеко вперед, и теперь коробки многократно сбрасывают на пол с высоты человеческого роста. Все эти операции прodelываются с полумягким мороженым, которое затем проводит три часа в высокой морозильной камере, поднимаясь по спирали и постепенно затвердевая. После этого продукт готов к отправке в магазины.

**Ирма Крисчен.** ПОВАРЕННАЯ КНИГА ОСТРОВА ПИТКЭРН  
PITCAIRN ISLAND COOKBOOK, by Irma Christian. Irma Christian Publisher, Pitcairn Island (\$ 10)

**ГОРИСТЫЙ** остров Питкэрн, размерами едва превосходящий нью-йоркский Центральный парк, затерян в океанских просторах. Более полутора тысяч километров отделяют его от острова Пасхи и 600—700 км — от ближайших атоллов французской Полинезии.

23 января жители Питкэрна отмечают свой ежегодный праздник. Почти 200 лет назад команда английских моряков прибыла на этот необитаемый остров со своими женами-таитянками и решила остаться на нем навсегда. Каждый год 23 января в бухте Баунти сжигается уменьшенная копия корабля английского Королевства флота «Баунти», на котором приплыли моряки. В следующем, 1990 году, в этот день будет отмечаться двухсотлетие со дня сожжения настоящего судна его командой, порвавшей таким образом свою последнюю связь с внешним миром.

Эта прелестная небольшая книжечка познакомит читателей с жизнью пятидесяти современных обитателей Питкэрна. Ирма Крисчен и ее подруги как бы вводят нас в круг своей домашней жизни. Мы присутствуем при праздновании дня рождения, с его обильным первым блюдом, приготовленным из овошей. Узнаем мы и о прошедшем испытании временем праздничном блюде островов Тихого океана: тертый картофель, бананы,

ямс, аррорут и тыква заворачиваются в большой лист банана и пекутся в духовке. Затем следует «парад сладостей» — на столе появляются мороженое, фрукты и пудинги. Согласно британской традиции, этот уставленный сладостями стол называется просто «чаем». Почти все островитяне выращивают сахарный тростник на приусадебных участках, но им приходится ввозить некоторые деликатесы, например масло и консервированную говядину. Вель основным продуктом на Питкэрне остается рыба. Хотя кое-где в горах бродят козы и овцы и практически в каждом доме держат кур, для разведения крупного рогатого скота места не хватает.

Автор и издатель Ирма Крисчен предстает перед нами на одной из иллюстраций с микрофоном и телеграфным ключом в руке (она радиооператор). В книге мы познакомимся и с некоторыми другими островитянами, с кооперативным магазином, картой острова, с его колодцами, собирающими дождевую воду, садами и хлебным деревом. Размеры Питкэрна таковы, что человеческая жизнь и в просторстве, и во времени легко обозрима. Читая эту книгу, начинаешь понимать многое — насколько земля, где мы живем, определяет всю нашу жизнь; как велико влияние истории; в чем заключается природа человеческого сообщества.

**Мишель Байам.** ОРУЖИЕ И ДОСПЕХИ.  
ARMS AND ARMOR, by Michael Byam. Alfred A. Knopf, Inc. (\$ 13.99)

**ЭТУ КНИГУ,** содержащую прекрасные цветные фотографии на 27 разворотах, можно сравнить с музеем. На фотографиях представлена краткая история оружия, доспехов и соответствующих украшений. На первых снимках мы видим оружие первобытного человека, например топор из кремня. На каждом развороте есть небольшой пояснительный текст, а фотографии сопровождаются подрисовочными подписями. Есть в книге и рисунки из старинных книг, так что в достоверности информации сомневаться не приходится. Отдельные развороты посвящены оружию Индии, Японии и североамериканских индейцев. Пожалуй, лишь замысловатый арбалет не описан так подробно, как он того заслуживает. В книге представлено только личное оружие и доспехи, пушек и другого крупного оружия в ней нет. На снимках мы увидим томагавк, боевой цеп, кольчугу, кивер, кирасу, короткоствольные пистолеты и еще сотни две других предметов вместе с их кратким описанием.

## В поисках теории

**В** ПОСЛЕДНЕЕ время в широкой печати не раз можно было видеть крупные заголовки: «Новая теория объясняет, как действует высокотемпературный сверхпроводник!» Этот газетный штамп появляется на страницах газет всякий раз после очередного визита репортера в какой-нибудь научно-исследовательский институт. Однако многие теоретики выразят сомнение в наличии такой теории, хотя и отметят, что та теория, о которой говорится в публикации, представляет определенный интерес, но она не бесспорна, как и все другие, предложенные до сих пор.

Действительно, уже на протяжении почти трех лет, с тех пор как удалось получить новый класс керамических материалов, содержащих оксид меди, которые становятся сверхпроводниками при необычно высоких температурах, ученые пытаются дать теоретическое объяснение этому явлению. Как заявил Т. Джебол из Станфордского университета, эти попытки заставили пересмотреть многие основные представления физики твердого тела. «Несколько лет назад, — сказал Джебол, — почти все нам казалось понятным».

Обычные сверхпроводники, как пояснил Джебол, — это металлы, которые хорошо проводят электрический ток даже при температурах выше критической (при которой они становятся сверхпроводниками). Такие металлы имеют избыток свободных электронов, движение которых изотропно, т. е. они перемещаются в различных направлениях. Сверхпроводимость наступает тогда, когда при очень низких температурах свободные электроны, обмениваясь фононами (квантами звука), связываются в пары, что препятствует рассеянию электронов.

По-видимому, в новых керамических сверхпроводниках электроны связаны в такие пары, но механизм связывания намного сильнее, чем фонное взаимодействие. Испытания показали также, что в этих материалах электроны проводимости движутся не изотропно, как в металлах, а преимущественно вдоль слоев оксида меди, которые перемежаются слоями из других элементов. При температурах выше критической такие керамики проводят электрический ток подобно «плохо проводящим металлам», как выразился один из теоретиков; кроме того, даже при очень незначительном изменении соотноше-

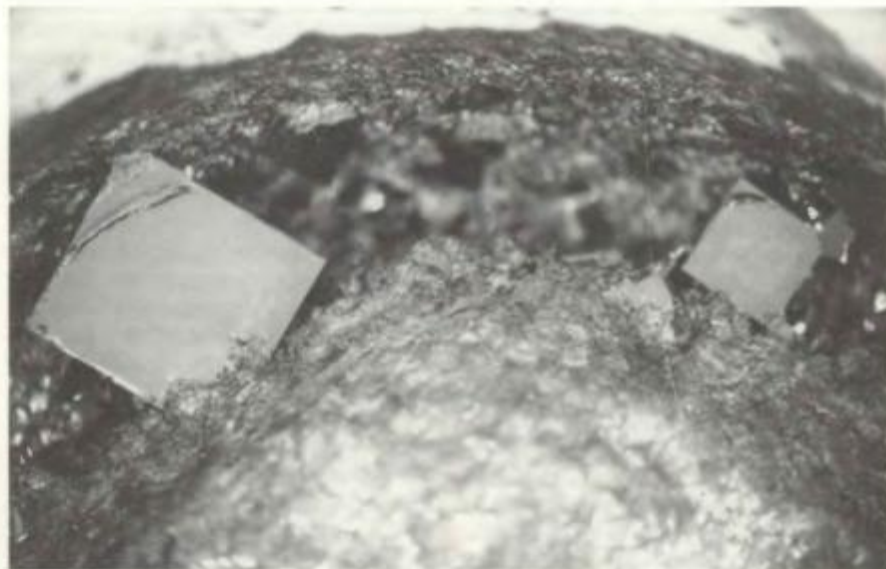
ния элементов они начинают вести себя как полупроводники или даже как диэлектрики, в которых электроны жестко связаны.

Это последнее свойство, как отмечает Джебол, напоминает более знакомое явление из физики твердого тела: некоторые диэлектрические материалы при допировании незначительным количеством других элементов становятся хорошими проводниками. Взглянув по-новому на это явление, говорит Джебол, физикам, возможно, удастся проникнуть в тайну высокотемпературной сверхпроводимости. К этому мнению присоединяется и Ф. Андерсон из Принстонского университета, удостоенный в 1977 г. Нобелевской премии за работы в области физики твердого тела. Он полагает, что тот же механизм, который «припиливает» электроны в керамиках в их непроводящей фазе, может связывать электроны в пары в сверхпроводящих фазах.

Предположение Андерсона о механизме высокотемпературной сверхпроводимости находит более солидную поддержку, чем большинство других. То, что в его теории является, вероятно, фундаментальным, — ключевая роль такого свойства, как спин, который заставляет заряженные частицы вести себя подобно крошечным магнитам, — подтверждено экспериментами, проведенными Р. Бирженом из Массачусетского технологического института (МТИ) и Г. Шира-

ном из Брукхейвенской национальной лаборатории. После исследования монокристаллов сверхпроводника из оксида меди с помощью нейтронных пучков эти ученые установили, что как ионы меди, так и положительно заряженные дырки, связанные с ионами кислорода, имеют спины, ориентированные по сложной спирали. Нет никаких свидетельств в пользу того, что это явление непосредственно связано со сверхпроводимостью. Тем не менее, как сказал П. Ли из МТИ, увеличивающийся поток данных заставляет предположить, что «любая теория, не учитывающая роль спина, не будет исчерпывающей».

Можно ли с помощью какой-то одной теории объяснить сверхпроводимость всех новых материалов? А их уже насчитывается несколько десятков — от первого смешанного оксида лантана, бария и меди, открытого специалистами фирмы IBM и проявляющего сверхпроводимость при температуре 28 К, до смешанного оксида талия, бария, кальция и меди, проявляющего сверхпроводимость при 125 К. Этот перечень стал еще более неоднородным, когда весной прошлого года он пополнился еще одним материалом — смешанным оксидом бария, калия и висмута, созданным на фирме AT&T Bell Laboratories, и обладающим сверхпроводимостью при 30 К. В отличие от всех других соединений этот материал не содержит меди, имеет изотропную, а не слоистую структуру и не проявляет локализации спина. В полной теории, считает Джебол, возможно, придется учесть



МОНОКРИСТАЛЛЫ высокотемпературного сверхпроводника шириной 1 мм из смешанного оксида иттрия, бария и меди выращены Л. Шнимейером

из AT&T Bell Laboratories. Специалисты исследуют эти кристаллы, чтобы выяснить механизм высокотемпературной сверхпроводимости.

многие различные механизмы образования электронных пар. По-видимому, сверхпроводимость «подобна испадающему с горы потоку воды, — говорит он, — имеется много путей, по которым он может стекать».

По этой причине, как и по ряду других, большинство исследователей выражают сомнение в том, может ли какая-либо теория установить верхний предел критической температуры для сверхпроводников. Недавно одна из таких попыток привлекла широкое внимание. Газета «New York Times» поместила на первой странице статью, которая была посвящена предположению, сделанному специалистами Калифорнийского технологического института, о том, что критические температуры никогда не могут быть выше 250 К (это намного ниже комнатной температуры). «К моей работе это не имеет никакого отношения», — сказал Р. Кава, исследователь-экспериментатор из AT&T Bell Laboratories. Он считает, что сверхпроводимость достигается при комнатной температуре. «Всякий, кто устанавливает верхний температурный предел, говорит лишь о границе, где его идеи перестают быть эффективными».

### Воспоминания о матери

**Д**ЛЯ МНОГИХ больных, нуждающихся в пересадке почки, невозможно найти подходящего, т. е. совместимого, донора. Результаты недавно проведенных исследований обнадеживают страдающих почечными заболеваниями тем, что отряд потенциальных доноров может быть увеличен.

Круг доноров ограничен способностью иммунной системы атаковать чужеродные ткани, которые она распознает как «не свои». Основной иммунологический признак, на который реагирует иммунная система реципиента при трансплантации чужеродной ткани, — это белки клеточной поверхности, известные под названием антигенов гистосовместимости класса I. Их гены наследуются поровну от каждого родителя. Поскольку в человеческой популяции могут присутствовать десятки различных антигенов класса I, для трансплантации трудно найти донора, у которого все эти антигены были бы идентичны антигенам реципиента. Полное совпадение не всегда жизненно важно, но при пересадке почки оно необходимо, как считается, в 15% случаев — у тех больных, чья иммунная система sensibilizирована, что бывает как побочный эффект в результате повтор-

ных переливаний крови или ранее произошедшего отторжения трансплантата. У таких больных образуются антитела против большинства антигенов класса I, отличающихся от их собственных.

Ф. Клаас, Дж. Ван Род и их коллеги из Лейденского университета (Нидерланды) проверяли сыворотку крови у нуждающихся в пересадке почки больных с sensibilizированной иммунной системой, чтобы определить, воспримет ли организм трансплантат с близким, но все же не совсем «своим» набором антигенов класса I. В статье, опубликованной в журнале «Science», исследователи пишут, что для большинства пациентов найдено не менее одного чужого антигена, не вызывающего иммунный ответ. Были проведены трансплантации, и большинство их оказались успешными.

Позже выяснилось, что эти несовпадающие антигены, к которым больные были толерантны, в 15 из 26 изученных случаев являлись антигенами, присутствовавшими у матерей больных, но не унаследованными. Аналогичного сходства с антигенами отцовского организма не было. Клаас и Ван Род полагают, что во время беременности клетки материнского организма проникают в кровотоки плода, развивающаяся иммунная система которого «научается» не реагировать на их антигены класса I, как если бы они были его собственными. По-видимому, «память» иммунной системы на материнские антигены сохраняется и во взрослом организме.

Это открытие, если оно подтвердится в более развернутых исследованиях, может дать многое для развития практики клинической трансплантации почек, — так утверждает Р. Гласкок из Медицинской школы Калифорнийского университета в Лос-Анджелесе. По предварительным данным Клааса и Ван Рода, можно предполагать, что 30—40% больных с sensibilizированной иммунной системой, которые сейчас не имеют практически никаких шансов на подходящий донорский орган, смогут получить «несовпадающие» органы, несущие материнские антигены. Возможно, такой подход облегчит поиск доноров и других органов.

### Чтобы атмосфера была чище

**Б**ЫТЬ МОЖЕТ, когда-нибудь использование нетрадиционных видов горючего поможет решить многие проблемы, связанные с дефицитом энергоресурсов и загрязнением окружающей среды. Однако первый же закон, стимулирующий переход на

нетрадиционные виды горючего, был встречен критикой. В октябре прошлого года президент Рейган одобрил закон, позволяющий автомобильным фирмам отходить от стандарта по нормам расхода горючего, если фирмы будут выпускать машины, работающие как на спиртовом моторном топливе, так и на бензине. Хотя многие эксперты по охране окружающей среды одобряют идею использования спиртового горючего, они в то же время сомневаются, что новый закон будет содействовать уменьшению загрязнения среды или ослаблению зависимости США от импорта нефти из других стран.

Подходящее спиртовое горючее для автомобилей — это метанол, обычно получаемый из природного газа. (Метанол по меньшей мере вдвое дешевле этанола, часто подмешиваемого в бензин для увеличения октанового числа горючего.) В Калифорнии уже выпущено 550 экспериментальных автомобилей, большинство из которых работает на горючей смеси М85, состоящей на 85% метанола и на 15% из бензина; в Нью-Йорке курсируют 6 автобусов, которые работают на чистом метаноле. «Универсальные» транспортные средства, производство которых стимулируется новым законом, будут работать на любой смеси бензина и спирта.

Споры вокруг вопроса о переходе на новые виды горючего сосредоточены на том, какие загрязняющие вещества окажутся в выхлопных газах и сколько будет стоить горючее. Сторонники использования чистого метанола и смеси М85 указывают, что образующиеся при сжигании этого горючего углеводороды химически менее активны и поэтому дают меньше вредного озона, чем углеводороды, образующиеся при сжигании бензина. Результаты исследования, проведенного фирмой Ford в 20 крупных городах, показали, что максимальную концентрацию озона можно снизить на 3—13%, если все автомобили перевести на смесь М85. В отличие от дизельного топлива метанол при сгорании дает очень мало твердых частиц и поэтому является более чистым горючим для тяжелых грузовиков. Тем не менее при сгорании метанола в атмосферу выбрасывается формальдегид, который, как подозревают, является канцерогеном, а при сгорании бензина этого вещества образуется очень мало.

Чистый метанол дает меньше углеводородов, чем смесь М85, и все же его нельзя назвать безопасным. Он токсичен, хотя не имеет ни цвета, ни запаха и сгорает почти при невидимом пламени. Кроме того, работаю-

щий на метаноле двигатель трудно завести в холодную погоду, поскольку пары этого горючего имеют низкое давление. Учитывая эти недостатки, комитет по энергетике шт. Калифорния решил отказаться от реализации рассчитанной на 8 лет программы перевода транспортных средств на метанол и заменить его смесью М85.

По словам Ч. Имбрехта, председателя упомянутого комитета, вопрос об автомобилях, способных работать либо на смеси М85, либо на чистом метаноле, рождает проблему «курицы и яйца»: пока нет работающих на метаноле автомобилей, заправочные станции не собираются переделывать свои резервуары для хранения горючего; в то же время, в отсутствие станций для заправки автомашин метанолом, покупатели не желают приобретать автомобили, работающие на этом горючем. Выпуск «универсальных» автомобилей — один из путей решения этой дилеммы, указывает Имбрехт; водители могут покупать смесь М85, когда она есть на станциях, а когда ее нет, они могут заправляться бензином. (В начале прошлого года две фирмы, ARCO и Chevron, согласились открыть не менее 25 колонок для заправки автомобилей смесью М85 на заправочных станциях Калифорнии.)

Убедить потребителей покупать метанол будет все же не легко. В октябре прошлого года смесь М85 продавалась примерно по 22 центра за литр, т. е. по цене, сравнимой с ценой неэтилированного бензина, несмотря на то что расход этого горючего вдвое больше. Сторонники метанола полагают, что по мере увеличения поступления горючего цена на него будет снижаться. Они также указывают, что октановое число метанола намного выше, и это должно сделать его более привлекательным для владельцев мощных и дорогих автомобилей.

Однако противники «универсальных» автомобилей говорят, что водители, использующие смесь из равных количеств бензина и метанола, будут скорее отравлять окружающую среду, чем помогать сохранить ее чистой. При смешивании большого количества бензина с метанолом, по их мнению, возрастает давление паров горючего, поэтому в атмосферу выбрасываются высокоактивные углеводороды, что приводит к образованию большего количества озона, чем при использовании бензина. «Если работающие на метаноле автомобили будут иметь хорошие характеристики, то использование этого горючего нужно будет сделать обязательным», — говорит К. Дитлоу, исполнительный директор центра безопасности движения.

Нью-Йоркское отделение Агентства по охране окружающей среды (АООС) склонно согласиться с этим. Прошлым летом это отделение обратилось в автомобильные фирмы различных стран мира с вопросом: согласны ли они принять участие в программе, предусматривающей переход к производству автомобилей, работающих только на чистом метаноле. Нью-Йоркское отделение АООС считает, что оно могло бы установить колонки для заправки метанолом на действующих станциях, принадлежащих городу, и договориться с владельцами частных станций, чтобы те сделали то же самое.

Другой вопрос — откуда брать метанол. Его производство из угля или биомассы обходится вдвое дороже, чем из природного газа. Хотя США располагают богатыми запасами природного газа, его все же дешевле доставлять из некоторых развивающихся стран. Эксперты считают, что, даже если использование метанола не приведет в целом к сокращению импорта горючих материалов в США, оно может ослабить зависимость страны от нефтяных картелей.

Противники нового закона заявляют, что его принятие, как это ни парадоксально, может привести к увеличению потребления бензина из-за того, что производители «универсальных» автомобилей получают послабления в соблюдении действующих стандартов по экономии горючего. Эксперты по охране окружающей среды, утверждают, что введение норм на расход бензина помогло сократить потребление этого горючего и тем самым уменьшить выбросы вредных веществ в атмосферу. Послабления в этой области, добавляет Дитлоу, позволят фирмам выпускать автомобили, расходующие больше бензина.

### Высокая экономия

**Ж**ЕНЩИНА, решившая лишь один-единственный раз вступить в половые отношения с тем, чтобы производить на свет детей всю оставшуюся жизнь, согласитесь, покажется нам несколько холодной представительницей своего пола, хотя и эффективной матерью. А ведь у муравьев и прочих общественных перепончатокрылых (пчелы, осы) дело обстоит именно так: спаривание у них происходит всего один раз. Меньше чем за час самке необходимо накопить такой запас спермы, которого ей хватит до конца жизни.

Насколько экономично она распоряжается этим запасом спермы? У. Чинкель и С. Портер из Университета шт. Флорида, статья которых



**ЦАРИЦА МУРАВЬЯ *Solenopsis invicta*** оплодотворяется только один раз в жизни, но необычайно эффективно использует сперму: она тратит всего лишь около трех сперматозоидов на каждого потомка, считая достигших зрелости. (Фото У. Чинкеля.)

опубликована в "Annals of Entomological Society of America" установили, что у огненных муравьев *Solenopsis invicta* царица расходует около трех сперматозоидов на каждую рабочую особь в своем потомстве. Даже для насекомых это поразительный показатель: пчелиная матка тратит, например, от 20 до 30 сперматозоидов на одно яйцо. У млекопитающих расход спермы вообще астрономический: у человека при эякуляции всякий раз выделяется от 200 до 600 млн. сперматозоидов, в одном эякуляте жеребца содержится 4—9 млрд. сперматозоидов, у кабана — 20 млрд.

Известно, что у *Solenopsis invicta* спаривание происходит однократно во время брачного лета. Чинкель и Портер собрали только что осемененных самок и подсчитали количество сперматозоидов в их сперматеках (расположенных в половых путях специальных «мешочках», в которых хранится сперма). В среднем в сперматеке содержится 7 млн. сперматозоидов. Общее число рабочих в потомстве одной самки за семилетний срок ее существования составляет около 2,6 млн. Таким образом, на каждого потомка царица тратит в среднем 2,6 сперматозоида. Чинкель считает, что эффективность использования спермы, возможно, еще более высока, так как, оценивая количество рабочих особей в потомстве одной царицы, они с Портером не учитывали

смертность на преимагинальных («не-взрослых») стадиях. Если на каком-либо этапе развития до достижения зрелости смертность велика, то этот показатель будет еще ниже — всего лишь 1—2 сперматозоида на яйцо.

Известно ли столь экономное использование спермы у каких-либо еще животных? Нематода *Caenorhabditis elegans* производит только по одному сперматозоиду на яйцо, однако это животное гермафродит и, следовательно, гаметы обоих типов образуются у него одновременно и в одном месте. Как удается царице муравья столь эффективно регулировать расход запаса спермы — пока неясно. «До сих пор на это не обращали особого внимания», — говорит Чинкель.

### Моделирование экономики по законам физики

ЛЕТОМ прошлого года несколько экономистов собрались под сводами бывшего монастыря неподалеку от центра Санта-Фе (шт. Нью-Мексико). На протяжении десяти дней они обсуждали, как изменяются со временем белковые структуры и почему при насыпании сверху песка на боках кучи образуются разного размера «лавины», которые скатываются вниз. В то же время группа специалистов в области естественных наук — физики, кибернетики и даже один биолог — пыталась проанализировать действующие на фондовой бирже механизмы и причины, по которым одни страны развиваются быстрее других.

Уже после того как большинство ученых покинуло Санта-Фе, оставшаяся группа примерно из 20 человек продолжала заниматься поисками закономерностей в различных науках, которые можно было бы заимствовать для анализа экономической деятельности. Некоторые предложили решительно отказаться от экономических догм, другие заняли более осторожную позицию. «Мы не намерены противостоят тем, кто придерживается традиционных экономических взглядов», — заявил Б. Артур, экономист из Станфордского университета. — Однако, видно настало время порвать с ними». По его словам, привычный взгляд на экономику как на систему, поддающуюся прогнозированию, оказался весьма плодотворным, но теперь для обеспечения дальнейших успехов в этой области необходимо частично или полностью отказаться от прежних представлений.

Отход от традиционных принципов в экономике впервые был предпринят одним из банков. В 1986 г. Дж. Рид, председатель правления банка Citicorp, обнаружил на своем рабочем столе неоплаченные и, судя по всему, без надежды

на оплату счета по займам на 15 млрд. долл., которые в свое время начиная с конца 70-х годов банк предоставил ряду развивающихся стран. Такое положение Рид в основном расценил как результат неправильной экономической информации. В то время экономические модели указывали на устойчивое развитие экономики этих стран и это давало основание надеяться, что займы будут возмещены с процентами. Однако спустя 10 лет уже никакие модели не могли указать Риду, что огромные суммы, которые задолжали развивающиеся страны, будут возвращены. Это побудило главу банка, который сам имеет ученую степень в области металлургии, обратиться к специалистам точных наук. Он поставил перед ними задачу — разработать новую модель, отражающую механизм развития мировой экономики. Ученым была предоставлена полная свобода действий, и требовалось, чтобы их модель не была слишком ортодоксальной.

«Эпизодические вторжения физиков в экономику чаще всего, хотя и не всегда, не давали сколько-нибудь заметных результатов», — заявил К. Эрроу, лауреат Нобелевской премии в области экономики. Экономисты в свою очередь заимствовали некоторые математические методы из области естественных наук. Тем не менее и Эрроу, и Ф. Андерсон, лауреат Нобелевской премии в области физики, сочли предложение Рида заманчивым. Десятидневный семинар, участники которого были отобраны обоими этими учеными, предоставил возможность экономистам и представителям естественных наук встретиться за одним столом и обменяться идеями и методами. Впервые они собрались в 1987 г. в Санта-Фе и второй раз в 1988 г.; к этому же времени относится и начало реализации целевой научно-исследовательской программы по экономике.

Деятельность группы пока не увенчалась разработкой каких-либо новых моделей, которые дали бы возможность Риду принять очередное решение, однако Citicorp проявляет терпение. «Решение проблем с долговыми обязательствами развивающихся стран займет не менее 15 лет», — считает Юджин Сингер, вице-президент банка. Исследователи предпочли сосредоточиться на более фундаментальных вопросах и выяснить, действительно ли экономика стремится к достижению «точек равновесия», как считалось на протяжении десятилетий; может ли экономика развиваться по законам развития экологической системы, эволюция которой определяется сложным взаимодействием сосуществующих в ней организмов и факторов среды; является ли нелинейное развитие важной характеристикой экономики?

Динамическое равновесие, лежащее в основе традиционных экономических моделей, определяется как подвижная точка, в которой производимая товарная масса удовлетворяет спрос потребителей. В общетеоретическом плане концепция равновесия подкупает своей простотой. Она, например, предполагает, что повышение цен приводит к падению спроса, а это, в свою очередь, способствует снижению цен. Под действием этих уравновешивающих сил и стабилизируется состояние системы в целом.

И тем не менее, несмотря на то что экономисты усложнили используемые математические методы, разработанные ими модели расходятся с действительностью. В рамках теории равновесия экономистам приходится учитывать непрерывные и нерегулярные колебания в экономике, в частности такие, как потрясения на фондовой бирже в 1987 г. Вопреки теории, техника часто приводит к расширению, а не сужению пропасти между богатыми и бедными странами. Кроме того, хотя экономисты и могут математически доказать существование точки равновесия, рассчитать ее точное положение зачастую невозможно. С философской точки зрения, такая сложность приводит к тупиковой ситуации. В самом деле, если экономисты не могут найти решение проблемы, то как это может угодить потребителям и производителям? И тем не менее, по словам Эрроу, несмотря на многочисленные попытки, еще никому не удалось вместо концепций равновесия предложить какое-либо другое более последовательное и цельное решение.

Ученые, принявшие участие в конференции в Санта-Фе, теперь подвергают критике разработанную там модель развивающейся экономики. В нашем постоянно изменяющемся мире с непредсказуемым будущим его обитатели в стремлении выжить с каждым днем меняют свое поведение, пытаются приспособиться к среде. В то же время модели равновесия основаны на допущении, что потребители и производители все время действуют оптимально в соответствии с собственной оценкой обстановки. Сосуществующие стороны постепенно адаптируются к изменяющимся внешним условиям, одновременно оказывая на нее обратное воздействие.

Специалисты намерены проверить свою идею с использованием теорий машинного обучения, которые разработаны Дж. Холландом, специалистом по вычислительной технике из Мичиганского университета. Его система «классификаторов» будет имитировать в миниатюре фондовую биржу, где взаимодействуют «агенты» (совокупность правил), осуществ-

влияющие куплю-продажу акций. Классификатор генерирует новые правила путем комбинирования успешных правил и исключения тех, которые не приводят к успеху. Такая методика вычислений получила название генетического алгоритма. Холланд и Артур будут определять, какие правила в разных условиях дают необходимые результаты. «Мы надеемся показать, что на основе простейших правил рынок сумеет самоорганизоваться в очень сложную психологическую систему», — заявляет Артур. Такие результаты продемонстрируют, что динамика курса акций отражает не только финансовые параметры, например процентные ставки и дивиденды. Такой вывод, возможно, и не удивит многих биржевых маклеров, однако он свидетельствует об отходе от традиционной экономической теории.

Другие специалисты надеются понять проблемы экономики на основе «самоорганизующейся критичности» — концепции, которая впервые была выдвинута П. Баком, физиком из Брукхейвенской национальной лаборатории. Когда система такого рода подобно куче песка достигает порогового состояния, она через «большие и малые лавины» претерпевает самореорганизацию и принимает статистически предсказуемую форму. Такова точка зрения Р. Палмера, физика из Университета Льюка. Андерсон и Палмер считают, что эта концепция неплохо отражает механизм внедрения научно-технических достижений в различные отрасли экономики. Анализируя данные по развитию промышленности и росту объемов производства, они надеются найти структуры, статистически аналогичные характеру изменения параметров поведения других самоорганизующихся систем.

Экономисты уже давно исследуют другие системы с нелинейным поведением, в которых небольшие изменения первоначальных условий приводят к существенно различающимся результатам. Участники конференции в Санта-Фе заняты разработкой многих идей такого рода. Они, в частности, изучают такую ситуацию, когда изделие, которое имеет рыночный успех, в техническом плане не является лучшим. Такому успеху может способствовать удачный выбор первых потребителей, что благоприятно сказывается на последующем сбыте изделия и привлечении других покупателей. Или, скажем, случай, когда появление новой технологии в той или иной стране может зависеть от того, насколько долго использовалась до этого аналогичная технология, а так же от затрат на внедрение новой тех-

ники. Например, в какой-нибудь развивающейся стране изменение методов сельскохозяйственного производства может привести к такой потребности в удобрениях, что она окажется вынужденной создать собственную химическую промышленность.

Несомненно, что при наличии множества идей из разных областей может возникнуть больше новых проблем, чем готовых решений. В 1987 г. участники конференции в Санта-Фе оживленно говорили о возможности описания беспорядочных процессов на фондовой бирже с помощью теории хаоса, одного из разделов нелинейной динамики. В настоящее время, однако, многие пришли к убеждению, что, хотя эта теория и способна описать деятельность индивидуума или поведение микроэкономической системы, более масштабная макроэкономическая система характеризуется циклическим поведением, на которое

большое влияние оказывают «шумы», вносимые такими неэкономическими факторами, как политика или климат.

Ученые обращают также внимание на то, что любая физическая модель, прежде чем она будет применена для адекватного описания экономической деятельности, должна быть существенно трансформирована. «Обсуждение этой проблемы с физиками может помочь нам, — говорит Т. Кео, экономист из Университета шт. Миннесота, — но вслед за этим предстоит большая и сложная работа». Тем не менее, считает Эрроу, конференции в Санта-Фе могут открыть новые возможности, стимулируя новые разработки на стыке различных областей и побуждая экономистов отказаться от косного механизма равновесия и перейти к «нащупыванию» адекватных процессов из области эволюции экологических систем.

## Внимание читателей!

Н. Грин, У. Стаут,  
Д. Тейлор  
**БИОЛОГИЯ**

В 3-х томах  
Перевод с английского

Написанный английскими авторами современный учебник общей биологии для высшей школы.

Содержание. Т.1 — систематика вирусов, бактерий, растений и животных; основы биохимии и гистологии, типы питания. Т.2 — клеточные механизмы использования энергии; количественные аспекты экологии и принципы проведения экологических исследований; основы физиологии растений и животных. Т.3 — проблемы репродукции и биологии развития, основы генетики, теория эволюции.

Из рецензий: «В отечественной учебной литературе ничего подобного не появлялось...

Весь материал изложен на весьма высоком уровне, простота изложения и удачное расположение тем делают его доступным для неподготовленного читателя. Великолепны рисунки и схемы (среди 900 страниц текста трудной найти страницу без иллюстраций) (д.б.н. Б.М. Медников). «Выпуск этого руководства будет способствовать подъему общей биологической культуры, как это сделали в свое время издания книги «Биология» Вилли и Детье» (чл.-корр. АН СССР А.В. Яблоков).

Для студентов-биологов, преподавателей биологии в школе, биологов всех специальностей.

1990, 125 л. Цена 9 р. 90 к.  
за комплект.

На книги, выходящие в 1990 г.,  
магазины научно-технической литературы принимают заказы  
с апреля — мая 1989 г.

Издательство заказы не принимает



Тропические леса:  
меньше, меньше,  
меньше...



НОРМАН МАЙЕРС

**М**Ы ЯВЛЯЕМСЯ свидетелями поразительного биологического явления в истории Земли. Единственный вид — человек — уничтожает генетический фонд планеты быстрее, чем он когда-либо сокращался в прошлом, за исключением, быть может, тех немногих случаев геологических катаклизмов, когда происходило массовое вымирание видов. К середине следующего века биосфера, по всей вероятности, лишится как минимум 1/4, скорее всего — 1/3, а может быть, и половины или даже более из нынеживущих видов. И это произойдет всего за несколько десятилетий, что в масштабах эволюции лишь мгновение.

Каковы число и распределение видов, составляющих биологическое разнообразие планеты? Судя по всему, в настоящее время существуют миллионы видов, хотя описаны только 1,7 млн. По оценкам специалистов, число видов не менее 5 млн. Однако последние данные позволяют предполагать, что число видов одних только насекомых в тропических лесах может достигать 30 млн. Кроме того, известно, что распределение видов по планете далеко не равномерно. По крайней мере 2/3, а возможно, и 90% их сосредоточены в тропиках.

В обеднении биот есть существенный аспект. Многие виды теряют целые «подразделения» — расы, популяции, — что резко сказывается на видовой генетической изменчивости. Даже если эти виды не находятся под угрозой в смысле сокращения общей численности, многие из них (например, рис, пшеница, рожь) терпят ущерб от катастрофического падения генетической изменчивости.

Как быстро исчезают виды? «Фоновая» скорость вымираний на протяжении последних примерно 600 млн. лет (со времен появления многоклеточных организмов) составляет в среднем приближении 1 вид в год. А сейчас вследствие деятельности человека скорость вымирания живых организмов возросла не менее чем в 1000 раз, и в будущем может еще увеличиться.

Обеднение биоты наблюдается во многих районах, но нигде оно не происходит так быстро, как в тропических лесах. Хотя эти леса занимают только 6% поверхности суши, они служат местообитанием по меньшей мере 50% всех существующих на планете видов. К началу грядущего столетия вряд ли многое останется от этого грандиозного биома. Непосредственная причина сведения тропических лесов — рост числа мелких фермеров, возделывающих лесные земли. Примером может служить ситуация в бразильском штате Рондонья, расположенном в южной части Амазонии. В 1975 г. численность населения здесь была 111 тыс. человек, а ныне превышает миллион. По данным на 1975 г., земледельцами было расчищено 1250 км<sup>2</sup> тропического леса, а к 1987 г. оказалось сведено почти 60 тыс. км<sup>2</sup> лесов и в три раза больше повреждено.

Разумеется, можно разработать меры, повышающие выживаемость видов на осваиваемых человеком территориях. Можно также расширить деятельность по размножению в неволе видов, находящихся под угрозой.

Попытки сохранить местообитания, свойственные дикой природе, путем создания национальных парков и других резерватов, могут оказаться бесполезными из-за измененной климата. Так, уже ясно, что в Амазонии, даже если оберегать существенную часть тропического леса, в недалеком будущем произойдет общая потеря влаги регионом и это пагубно скажется на состоянии сохранившегося леса. Не позже чем к концу первой четверти XXI в. следует ожидать потепление климата, обусловленное накоплением газов, участвующих в парниковом эффекте. При этом зоны растительности начнут «мигрировать» в направлении от экватора к полюсам, что отразится на состоянии многих охраняемых территорий.

Однако неминуемое массовое вымирание видов — это еще не все. Более долговременные и в конечном счете более серьезные последствия вытекают из нарушения самого хода эволюции. После массовых вымираний нужно какое-то время, чтобы возникли новые виды, столь же многочисленные и разнообразные, как те, что вымерли. Обычно такой период занимает несколько миллионов лет. Но в сложившейся ситуации эволюционные последствия будут скорее всего более тяжелыми. Широкомасштабное сокращение численности и вымирание наверняка затронут большинство, если не все, категории видов и для компенсации этого потребуется гораздо больше времени, может быть, многие миллионы лет.

Массовая гибель видов, несомненно, будет иметь прямые экономические последствия и некоторые из них вселяют тревогу. В 1970 г. кукурузные поля от Великих озер до Мексиканского залива были поражены грибковым заболеванием. Из-за этого урожай кукурузы снизился на 15%, цены на нее возросли на 20%, а убытки составили более 2 млрд. долл. Ситуацию удалось выправить благодаря тому, что нашлось посадочный материал устойчивого к данному заболеванию сорта, являющегося потомком разновидностей, произрастающих в одном из естественных местообитаний кукурузы в Мексике.

Велик вклад диких растений в удовлетворение медицинских потребностей человечества. Половина того, что мы покупаем в аптеках, — это биогенная продукция. Стоимость этих природных продуктов в мире в целом составляет около 40 млрд. долл. в год. А сколько еще возможностей скрыто в совокупном геноме биосферы? В той или иной мере исследовались лишь 10% видов растений, и только 1% из них изучен более или менее тщательно.

Наконец, нельзя не упомянуть, что живые организмы в своем разнообразии обеспечивают многие процессы в экологических системах. От них зависит состав атмосферы, регуляция климата, водообмен, формирование почв, циркуляция питательных веществ, переработка отходов, регуляция численности возбудителей заболеваний и вредителей.

Перед лицом этого мрачного будущего появляются признаки, — правда, пока немногочисленные — того, что сонное оцепенение, царившее в обществе, исчезает. В ответ на настоятельное беспокойство граждан правительства многих стран сейчас начинают решать проблему сохранения биологического разнообразия. Ученые, власти и ведущие предприниматели обнаруживают глубокую связь между обеднением биот и проблемами энергетики, экономического роста, народонаселения и изменений климата. Теперь уже недостаточно реагировать на симптомы «болезни» — необходимо обращаться к ее причинам. Это предполагает разработку мероприятий на международном уровне в широком диапазоне экономической деятельности — в сельском хозяйстве, промышленности, технологиях, торговле — с учетом таких факторов, как рост населения и проблемы бедности, в контексте общего прогресса. Таков наилучший и, возможно, единственный путь, который приведет к спасению среды обитания для миллионов видов, в том числе для *Homo sapiens*.



## Вниманию читателей!

### Р. Фоули ЕЩЕ ОДИН УНИКАЛЬНЫЙ ВИД ... ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЭВОЛЮЦИИ ЧЕЛОВЕКА

Перевод с английского

В книге английского автора рассмотрены экологические аспекты проблемы происхождения человека. Проведен анализ тех экологических факторов, которые определили направление естественного отбора среди древних гоминид и их эволюцию. Книга написана строго научно, но остроумно, легко и доступно; благодаря оригинальному подходу она не дублирует имеющиеся издания по палеоантропологии.

Содержание: Краткий обзор эволюции человека. Основные принципы эволюционной экологии. Пути в прошлое (анализ методических подходов). Способы адаптации гоминид как тропических животных; как крупных млекопитающих; как приматов, ведущих наземный образ жизни. Влияние климатических условий и межвидовой конкуренции. Проблемы миграции древних гоминид.

Для зоологов, экологов, педагогов и лиц, занимающихся планированием городских территорий.

1990, 23 л. Цена 2 р. 50 к.

На книги, выходящие в 1990 г., магазины научно-технической литературы будут принимать заказы с апреля-мая 1989 г. Издательство заказы не принимает.



### ПРОБЛЕМА БЫТОВЫХ ОТХОДОВ В США

THE SOLID WASTE HANDBOOK: A PRACTICAL GUIDE. Edited by William D. Robinson. John Wiley & Sons, Inc., 1986.

SOLID WASTE MANAGEMENT AND THE ENVIRONMENT; THE MOUNTING GARBAGE AND TRASH CRISIS. Homer A. Neal and J.R. Schubel. Prentice-Hall, Inc., 1987.

SOLID WASTE DISPOSAL FACILITY CRITERIA. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY in *Federal Register*, Vol. 53, No. 168, pages 33314-33422; August 30, 1988.

REPORT TO CONGRESS; SOLID WASTE DISPOSAL IN THE UNITED STATES. Environmental Protection Agency. U.S. Government Printing Office, in press.

### ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ФАЗА

QUANTAL PHASE FACTORS ACCOMPANYING ADIABATIC CHANGES. M.V. Berry in *Proceedings of the Royal Society of London, Series A*, Vol. 392, No. 1802, pages 45—57; March 8, 1984.

ANGLE VARIABLE HOLONOMY IN THE ADIABATIC EXCURSION OF AN INTEGRABLE HAMILTONIAN. J.H. Hannay in *Journal of Physics A*, Vol. 18, No. 2, pages 221—230; February 1, 1985.

BERRY'S PHASE-TOPOLOGICAL IDEAS FROM ATOMIC, MOLECULAR AND OPTICAL PHYSICS. R. Jackiw in *Comments on Atomic and Molecular Physics*, Vol. 21, No. 2, pages 71—82; March, 1988.

GEOMETRIC PHASES IN PHYSICS. Edited by A. Shapere and F. Wilczek. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., P.O. Box 128, Singapore 9128, in press.

### ПЛАСТИЧНОСТЬ В РАЗВИТИИ МОЗГА

VISUAL NEURAL DEVELOPMENT. J. Anthony Movshon and Richard C. Van Sluyters in *Annual Review of Psychology*, Vol. 32, pages 477—522; 1981.

MODIFICATION OF MICROTUBULE STEADY-STATE DYNAMICS BY PHOSPHORYLATION OF THE MICROTUBULE-ASSOCIATED PROTEINS. Larry Jameson and Michael Caplow in *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Vol. 78, No. 6, pages 3413—3417; June, 1981.

ONTOGENETIC CHANGES IN THE CYCLIC ADENOSINE 3', 5'-MONOPHOSPHATE-STIMULABLE PHOSPHORYLA-

TION OF CAT VISUAL CORTEX PROTEINS, PARTICULARLY OF MICROTUBULE-ASSOCIATED PROTEIN 2 (MAP2); EFFECTS OF NORMAL AND DARK REARING AND OF THE EXPOSURE TO LIGHT. Chiye Aoki and Philip Siekevitz in *Journal of Neuroscience*, Vol. 5, No. 9, pages 2465—2483; September, 1985.

THE ROLE OF NOREPINEPHRINE IN PLASTICITY IN THE VISUAL CORTEX. B. Gordon, E.E. Allen and P.Q. Trombley in *Progress in Neurobiology*, Vol. 30, No. 2-3, pages 171—191, 1988.

### СТРУКТУРНЫЙ ГРУНТ

GEOCRYOLOGY. A.L. Washburn. John Wiley & Sons, Inc., 1980.

A MODEL FOR SORTED PATTERNED GROUND REGULARITY. R.J. Ray, W.B. Krantz, T.N. Caine and R.D. Gunn in *Journal of Glaciology*, Vol. 29, No. 102, pages 317—337; 1983.

GEOMETRICAL ASPECTS OF SORTED PATTERNED GROUND IN RECURRENTLY FROZEN SOIL. Kevin J. Geason, William B. Krantz, Nelson Caine, John H. George and Robert D. Gunn in *Science*, Vol. 232, No. 4747, pages 216—220; April 11, 1986.

### ОПЛОДОТВОРЕНИЕ У МЛЕКОПИТАЮЩИХ

MAMMALIAN SPERM-EGG INTERACTION: IDENTIFICATION OF A GLYCOPROTEIN IN MOUSE EGG ZONAE PELLUCIDAE POSSESSING RECEPTOR ACTIVITY FOR SPERM. Jeffrey D. Bleil and Paul M. Wassarman in *Cell*, Vol. 20, No. 3, pages 873—882, July, 1980.

MECHANISMS AND CONTROL OF ANIMAL FERTILIZATION. Edited by John F. Hartmann. Academic Press, 1983.

O-LINKED OLIGOSACCHARIDES OF MOUSE EGG ZP3 ACCOUNT FOR ITS SPERM RECEPTOR ACTIVITY. Harvey M. Florman and Paul M. Wassarman in *Cell*, Vol. 41, No. 1, pages 313—324; May, 1985.

EARLY EVENTS IN MAMMALIAN FERTILIZATION. Paul M. Wassarman in *Annual Review of Cell Biology*, Vol. 3, pages 109—142; 1987.

THE BIOLOGY AND CHEMISTRY OF FERTILIZATION. Paul M. Wassarman in *Science*, Vol. 235, No. 4788, pages 553—560; January 30, 1987.

### ЛАЗЕРЫ МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

DEMONSTRATION OF A SOFT X-RAY AMPLIFIER. D.L. Matthews et al. in *Physical Review Letters*, Vol. 54, No. 2, pages 110—114; January 14, 1985.

## Вниманию читателей!

Дж. Теппермен,  
Г. Теппермен

### ФИЗИОЛОГИЯ ОБМЕНА ВЕЩЕСТВ И ЭНДОКРИННОЙ СИСТЕМЫ

Перевод с английского

Книга американских авторов представляет собой учебное пособие по физиологии эндокринной системы. Рассмотрены как общие вопросы функционирования желез внутренней секреции и механизма действия гормонов, так и специальные: нейроэндокринология, эндокринология репродукции, гормоны надпочечников, щитовидной и поджелудочной желез, регуляция энергетического и кальциевого обмена. Особое внимание уделено клиническим вопросам.

Из рецензии: «В отличие от многих монографий, построенных по классическому стереотипу — описание клиники отдельных эндокринных расстройств, рекомендации по лечению и лишь в последнюю очередь физиология системы, — в основу данной книги положены обобщающие концепции, позволяющие связать представления о специфической роли эндокринных желез с общей физиологией поддержания гомеостаза».

Для физиологов, биохимиков, эндокринологов, студентов-медиков и биологов.

1990, 46 л. Цена 4 р. 20 к.

На книги, выходящие в 1990 г., магазины научно-технической литературы будут принимать заказы с апреля-мая 1989 г. Издательство заказы не принимает.



EXPLODING-FOIL TECHNIQUE FOR ACHIEVING A SOFT X-RAY LASER. M.D. Rosen et al. in *Physical Review Letters*, Vol. 54, No. 2, pages 106—109; January 14, 1985.

LABORATORY PRODUCTION OF X-RAY LASERS. M.H. Key in *Nature*, Vol. 316, No. 6026, pages 314—318; July 25, 1985.

INTERNATIONAL COLLOQUIUM ON X-RAY LASERS. Edited by P. Jaeglé and A. Sureau in *Journal de Physique*, Vol. 47, Fasc. 10, Colloque C6; October, 1986.

THE GENERATION OF COHERENT XUV AND SOFT-X-RAY RADIATION. Edited by Dennis L. Matthews and Richard R. Freeman in *Journal of the Optical Society of America B*, Vol. 4, pages 530—618; April, 1987.

РЕНТГЕНОВСКАЯ ОПТИКА. Под редакцией Н. Г. Басова и А. Н. Ораевского. Труды ФИАН, том 196. — М.: Наука, 1989.

### СИЛА ТЯЖЕСТИ И КРОВООБРАЩЕНИЕ У ЗМЕЙ

THE BIOLOGY OF SEA SNAKES. Edited by W.A. Dunson. University Park Press, 1975.

BLOOD PRESSURE IN SNAKES FROM DIFFERENT HABITATS. Roger S. Seymour and Harvey B. Lillywhite in *Nature*, Vol. 264, No. 5587, pages 664—666; December 16, 1976.

SNAKES: ECOLOGY AND EVOLUTIONARY BIOLOGY. Edited by Richard A. Seigel, J.T. Collins and S.S. Novak. Macmillan Publishing Co., 1987.

CIRCULATORY ADAPTATIONS OF SNAKES TO GRAVITY. Harvey B. Lillywhite in *American Zoologist*, Vol. 27, No. 1, pages 81—95; 1987.

SCALING OF CARDIOVASCULAR PHYSIOLOGY IN SNAKES. Roger S. Seymour in *American Zoologist*, Vol. 27, No. 1 pages 97—109; 1987.

### ПЕРУАНСКИЕ КАНАЛЫ ДОИНКСКОГО ПЕРИОДА

OPEN-CHANNEL HYDRAULICS. Ven Te Chow. McGraw-Hill Book Company, 1959.

LIFE, LAND AND WATER IN ANCIENT PERU. Paul Kosok. Long Island University Press, 1965.

HYDRAULIC ENGINEERING ASPECTS OF THE CHIMU CHICAMA-MOCHE INTERVALLEY CANAL. Charles R. Ortloff, Michael E. Moseley and Robert A. Feldman in *American Antiquity*, Vol. 47, No. 3, pages 572—595; July, 1982.

THE CHICAMA-MOCHE INTERVALLEY CANAL: SOCIAL EXPLANATIONS AND PHYSICAL PARADIGMS. Charles R. Ortloff, Michael E. Moseley and Robert A. Feldman in *American Antiquity*, Vol. 48, No. 2, pages 375—389; April, 1983.

HYDRAULIC ENGINEERING AND HISTORICAL ASPECTS OF THE PRE-COLUMBIAN INTRAVALLEY CANAL SYSTEMS OF THE MOCHE VALLEY, Peru. Charles R. Ortloff, Robert A. Feldman and Michael E. Moseley in *Journal of Field Archaeology*, Vol. 12, No. 1, pages 77—98; Spring, 1985.

### ЗАНИМАТЕЛЬНЫЙ КОМПЬЮТЕР

REFLECTIONS ON A CHRISTMAS-TREE BAUBLE. M.V. Berry in *Physics Education*, Vol. 7, No. 1, pages 1—6; 1972.

### НАУКА ВОКРУГ НАС

THE FRACTAL GEOMETRY OF NATURE. Benoit B. Mandelbrot. W.H. Freeman and Company, 1982.

Леонард М. Сандер. ФРАКТАЛЬНЫЙ РОСТ. — В мире науки, 1987, № 3.

## В МИРЕ НАУКИ

Подписано в печать 18.01.89.  
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. 15,19.

Усл. кр.-отт. 47,36.

Изд. № 25/6780. Заказ 81.

Тираж 26950 экз. Цена 2 р.

Издательство «Мир»

Набрано в Межиздательском

фотоаборном центре

издательства «Мир»

Типография В/О «Внешторгиздат»

Государственного комитета СССР

по делам издательств,

полиграфии и книжной торговли.

127576, Москва, Илимская, 7



# Вниманию читателей!

М. Озима

## ГЛОБАЛЬНАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ЗЕМЛИ

Перевод с английского



**В** книге известного японского геохимика отражены новейшие достижения в изучении происхождения Солнечной системы и ранней истории Земли, основанные на инструментальных геохимических и изотопных методах изучения вещества. Рассматриваются представления о составе Земли и ее оболочек, о происхождении слоистой структуры и о временных интервалах процессов эволюции, опре-

деленных методами радиоизотопного датирования. Анализируются современные данные о составе и свойствах метеоритов и крупных планет земной группы. Освещается проблема происхождения и эволюции атмосферы и океанов и доказывается их вторичное образование в процессе дифференциации первозданного вещества Земли. Излагаются основы учения о спрединге океанского дна, о дрейфе континентов и о погружении океанической коры в верхнюю мантию.

1990 г., 12 л. Цена 2 р. 70 к.

На книги, выходящие в 1990 г.,  
магазины научно-технической литературы принимают заказы  
с апреля — мая 1989 г.

Издательство заказы не принимает



*В следующем номере:*

---



ПЕРЕМЕШИВАНИЕ ЖИДКОСТЕЙ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНСУЛЬТАТИВНАЯ  
СЛУЖБА ДЛЯ ПРЕЗИДЕНТА

МЕХАНИЗМ АКТИВАЦИИ ГЕНОВ

ГЛУБОКИЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

ПОТРЕБЛЕНИЕ УГЛЕВОДОВ И НАСТРОЕНИЕ

ОХОТА ЗА ПРОКОНСУЛОМ

ПОИСК КРАТЧАЙШИХ СЕТЕЙ

АНДРЕ-МАРИ АМПЕР — ОСНОВОПОЛОЖНИК  
ФИЛОСОФИИ НАУКИ

ОКРАСКА НЕБА И РАССЕЯНИЕ СВЕТА

ПСИХОЛОГИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ: ТЕМА И ВАРИАЦИИ