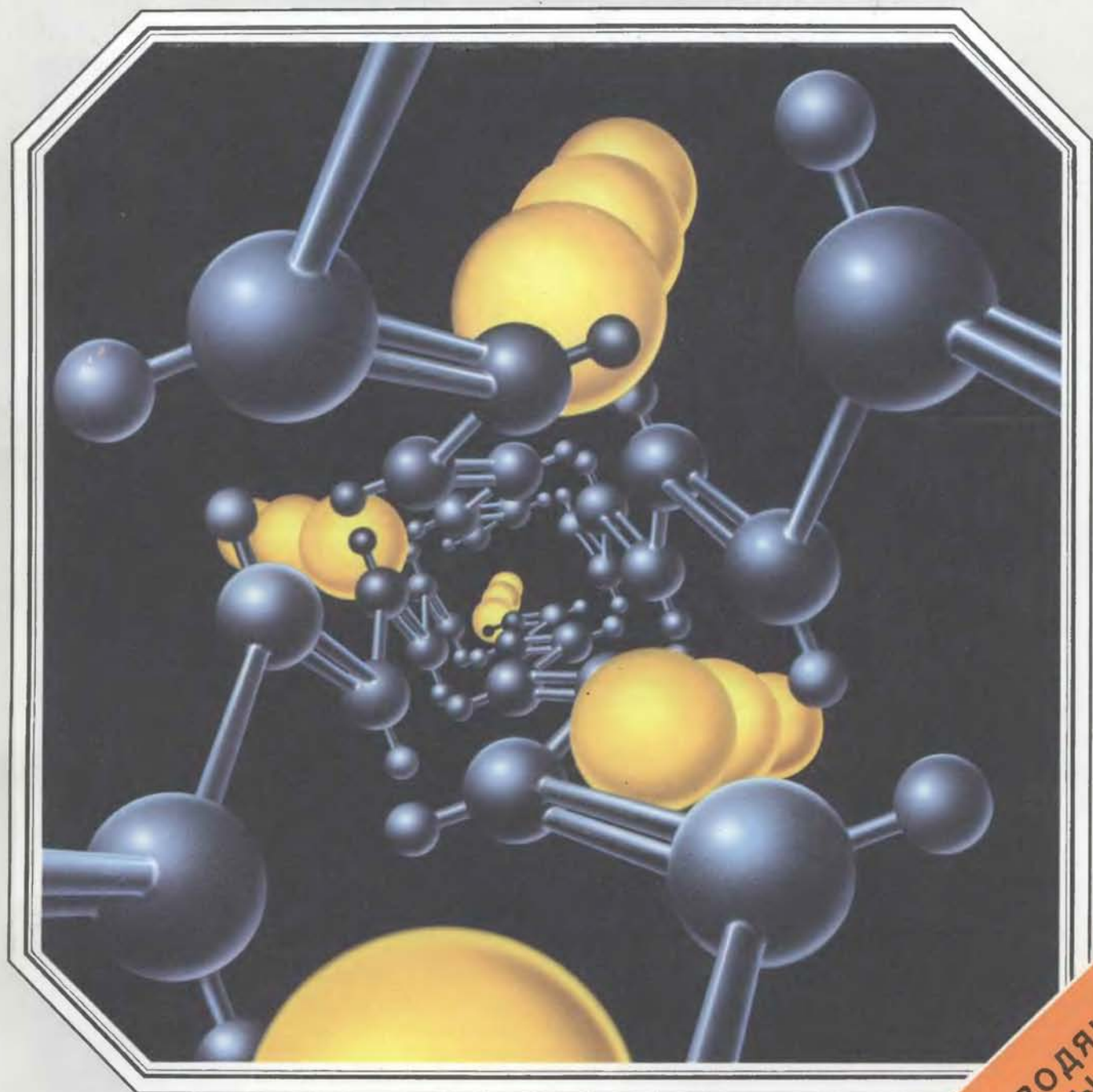


В МИРЕ НАУКИ

SCIENTIFIC
AMERICAN

Издание на русском языке



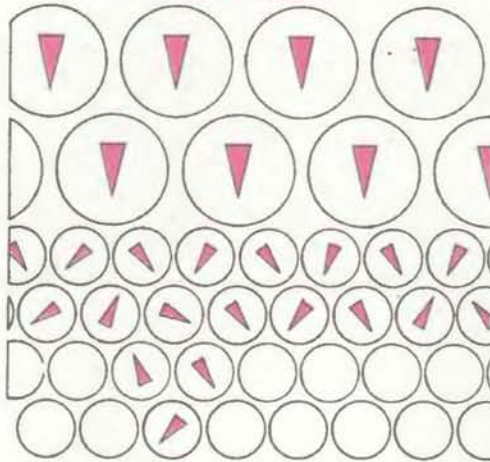
Апрель **4** 1988

ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИЕ
ПОЛИМЕРЫ

Вниманию читателей!

П. Эткинс
ПОРЯДОК И БЕСПОРЯДОК В ПРИРОДЕ
 Перевод с английского

П. Эткинс
**ПОРЯДОК
 И БЕСПОРЯДОК
 В ПРИРОДЕ**



Книга П. Эткинса посвящена термодинамике (прежде всего ее второму началу), которая редко становится предметом популяризации. Показывая процесс развития и становления этой науки, автор с глубоким уважением вспоминает ее создателей — Джоуля, Клаузиуса, Больцмана и многих других выдающихся ученых, чьи имена вошли в золотой фонд науки. Возникшая в начале XIX в., термодинамика до недавнего времени находила довольно ограниченное применение — главным образом для описания технических устройств типа тепловых двигателей, турбин и т. п. — и представляла интерес лишь для узкого круга специалистов. Однако успехи физики низких температур, открытие таких явлений, как сверхпроводимость и сверхтекучесть, выдвинули термодинамику в число ведущих дисциплин, показали фундаментальный характер ее законов. Сейчас не вызывает сомнений, что диапазон действия второго начала термодинамики поистине безграничен; этот закон позволяет объяснить все многообразие окружающего нас мира — от энергетических установок до биологических систем и астрофизических объектов.

Адресуя книгу читателям-неспециалистам, автор старается избежать математических выкладок, искусно приклекая простые и наглядные модели; повествование ведется свободно и увлекательно, но в то же время на высоком профессиональном уровне.

Книга предназначена для широкого круга читателей — от школьников старших классов до преподавателей и научных работников.

КНИГА принадлежит перу известного английского специалиста в области физической химии, профессора Оксфордского университета. Она выпущена в 1984 г. американским издательством "Freeman and Co." в Библиотечной серии журнала "Scientific American", которая предназначена для ознакомления массового читателя с достижениями современной науки.

Издательство «Мир» уже выпустило две книги из этой серии: С. Вайнберг «Открытие субатомных частиц» (1986) и К. Де Дюва «Путешествие в мир живой клетки» (1987). В 1988 г. выходит в свет книга Д. Лейзера «Создавая картину Вселенной».

1989, 19 л. Цена 1 р. 80 к.



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

№ 4 · АПРЕЛЬ 1988

В номере:

СТАТЬИ

(Scientific American, February 1988, Vol. 258, No. 2)



6 Картирование хромосом при помощи ДНК-маркеров *Рей Уайт, Жан-Марк Лалуэль*

Изменчивые последовательности ДНК в хромосомах человека используются как генетические маркеры. Отдельные маркеры служат для поиска дефектных генов, совокупность маркеров составляет систему ориентиров хромосомных карт



16 Дефект вселенского зеркала *Роберт К. Адэр*

По современным представлениям, Вселенная была бы лишена вещества и не могла бы существовать без небольшого нарушения симметрии при отражении в «зеркале», называемом CP-инвариантностью. Какие силы в природе вызывают это искажение?



24 ГАМК-эргические нейроны *Дэвид А. Готтлиб*

Нервные клетки посылают друг другу не только возбуждающие сигналы, но и тормозные. Тормозная активность, которая часто осуществляется с помощью γ -аминомасляной кислоты, участвует в формировании нейронных сетей, лежащих в основе всей нервной деятельности



32 Как развивался климат на планетах земной группы *Джеймс Ф. Кастинг, Оуэн Б. Тун, Джеймс Б. Поллак*

Планеты с умеренным климатом, напоминающим земной, когда-то считались редкостью в нашей Галактике. Современные математические модели наводят на мысль, что если за пределами Солнечной системы существуют планеты, то многие из них могут быть обитаемыми



42 Приспосабливающийся опоссум

Стивен Н. Остад

Виргинский опоссум быстро приспосабливается к изменяющейся среде. Успех этого вида, возможно, отчасти обусловлен эффективной стратегией размножения, в том числе способностью регулировать соотношение полов в потомстве



50 Электропроводящие полимеры

Ричард Б. Канер, Элан Г. Макдайрмид

Привлекательные свойства пластмасс хорошо известны — они дешевы, долговечны, легки и универсальны, но их электропроводность обычно во внимание не принимается. Полимеры нового поколения нарушают это традиционное представление



58 Рамануджан и число π

Джонатан М. Борвейн, Питер Б. Борвейн

Около 75 лет назад гениальный индийский математик придумал невероятно эффективные способы вычисления числа π . Созданные сейчас на той же основе алгоритмы для компьютеров позволяют найти миллионы десятичных знаков числа π .



68 Бубонная чума

Колин Макэведи

Это бактериальное заболевание, переносимое блохами, которые паразитируют на крысах, поражает людей в течение более 1000 лет. Факторы, ответственные за чередующиеся подъемы и спады этой болезни, пока до конца не известны

РУБРИКИ

4 Об авторах

5 50 и 100 лет назад

40, 48, 66, 74,

80, 85 Наука и общество

76 Наука вокруг нас

81 Занимательный компьютер

86 Книги

91 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
David L. Cooke, Jr.; Ari W. Epstein
Gregory R. Greenwell
John Horgan, June Kinoshita
Philip Morrison (BOOK EDITOR)
Ricki L. Rusting, 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. Кудряков
Т. А. Румянцева А. М. Смотров
А. Ю. Краснопевцев

ЛИТЕРАТУРНЫЕ РЕДАКТОРЫ
М. М. Попова
М. В. Суорова

ХУДОЖЕСТВЕННЫЙ РЕДАКТОР
С. А. Стулов

ЗАВЕДУЮЩАЯ РЕДАКЦИЕЙ
Т. Д. Франк-Каменецкая

РУКОВОДИТЕЛЬ ГРУППЫ ФОТОНАБОРА
В. С. Галкин

ТЕХНИЧЕСКИЙ РЕДАКТОР
С. К. Аносов

КОРРЕКТОР
Н. А. Вавилова

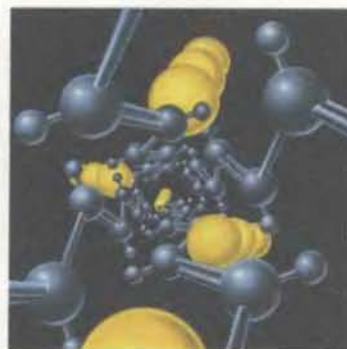
ОФОРМЛЕНИЕ ОБЛОЖКИ РУССКОГО ИЗДАНИЯ
М. Г. Жуков

ШРИФТОВЫЕ РАБОТЫ
В. В. Ефимов

АДРЕС РЕДАКЦИИ
129820, Москва, ГСП, 1-й Рижский пер., 2
ТЕЛЕФОН РЕДАКЦИИ
286.2588

© перевод на русский язык и оформление, «Мир», 1988

На обложке



ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИЕ ПОЛИМЕРЫ

На обложке изображена модель допированного иодом полиацетилен — полимера, электропроводность которого (на единицу объема) лучше, чем у меди (см. статью Р. Канера и Э. Макдайрида «Электропроводящие полимеры» на с. 50). Каждые три примесные атома (желтые) расположены между четырьмя полиацетиленовыми цепями, в которых атомы углерода с присоединенными к ним атомами водорода связаны чередующимися одинарными и двойными связями. Недопированный полиацетилен, как и большинство других полимеров, является диэлектриком.

Иллюстрации

ОБЛОЖКА: George V. Kelvin

СТР.	АВТОР/ИСТОЧНИК	СТР.	АВТОР/ИСТОЧНИК	СТР.	АВТОР/ИСТОЧНИК
7	The Bettmann Archive	43	James Kilkelly, с разрешения Savannah River Ecology Plant	70	The Granger Collection
8-13	Joan Starwood	44-47	Patricia J. Wynne	71, 72	Bob Conrad
14	Edward Bell	51	James Kilkelly	76	Al Satterwhite, The Image Bank
17-22	Jerome Kuhl	52, 53	Ian Worpole	77-79	Michael Goodman
25	Garland R. Marshall	54	Tokyo Institute of Technology	82	Andrew Christie
26, 27	Alan D. Iselin	55	James Kilkelly	83	David Wiseman (вверху), Richard Dawkins (внизу)
28	David L. Gottlieb	59	John Moss, с разрешения The Royal Society of London	84	Richard Dawkins
29-31	Alan D. Iselin	60	Michael Goodman		
32	National Aeronautics and Space Administration	61, 62	Edward Bell		
33	National Aeronautics and Space Administration (слева), The Hale Observatories (справа)	63	Edward Bell (вверху), Laurie Grace (внизу)		
34-36	George V. Kelvin	64	Edward Bell		
37	National Aeronautics and Space Administration	65	John Moss, с разрешения The Royal Society of London		
38, 39	George V. Kelvin	68, 69	Scala/Art Resource		

Об авторах

Ray White, Jean-Marc Lalouel (РЭЙ УАЙТ, ЖАН-МАРК ЛАЛУЭЛЬ «Картирование хромосом при помощи ДНК-маркеров»). Уайт получил степень доктора философии в области молекулярной биологии в Массачусетском технологическом институте в 1971 г., после чего занимался биохимическими исследованиями в Стэнфордском университете. Работал в Медицинской школе Массачусетского университета в Вустере, затем перешел в Университет шт. Юта в Солт-Лейк-Сити, где в настоящее время ведет исследовательскую работу в Медицинском институте Говарда Хьюза, является профессором кафедры генетики человека Медицинской школы и директором университетского центра по изучению муковисцидоза. Лалуэль вырос в Африке. Он получил степень доктора медицины и докторскую степень в области количественной генетики в Парижском университете, где прошел также курс психиатрии. Четыре года, будучи профессором, возглавлял кафедру биологии человека в этом университете, затем стал сотрудником Университета шт. Юта в Солт-Лейк-Сити, где сейчас ведет исследовательскую работу в Медицинском институте Говарда Хьюза и является профессором кафедры генетики человека в Медицинской школе.

Robert K. Adair (РОБЕРТ К. АДЭР «Дефект вселенского зеркала») — заместитель директора по вопросам ядерной физики и физики высоких энергий Брукхейвенской национальной лаборатории. В 1951 г. получил степень доктора физики в Висконсинском университете, где преподавал до 1953 г. Затем в течение шести лет работал в Брукхейвенской лаборатории и в 1959 г. перешел в Йельский университет. Более 30 лет Адэр был там профессором, деканом физического факультета и руководителем отдела физических исследований. С 1978 по 1983 г. он являлся редактором журнала «Physical Review Letters». В 1987 г. возвратился в Брукхейвенскую национальную лабораторию.

David I. Gottlieb (ДЭВИД А. ГОТТЛИБ «ГАМК-эргические нейроны») получил степень бакалавра в 1964 г. в Университете шт. Нью-Йорк в Бингемтоне. В 1972 г. ему была присвоена докторская степень в области нейробиологии в Университете Вашингтона в Сент-Луисе, после чего он там занимался исследовательской работой на кафедре биологической химии. С 1976 г. Готтлиб сотрудник Меди-

цинской школы этого университета; в настоящее время профессор.

James F. Kasting, Owen B. Toon, James V. Pollack (ДЖЕЙМС Ф. КАСТИНГ, ОУЭН Б. ТУН, ДЖЕЙМС Б. ПОЛЛАК «Как эволюционировал климат на планетах земной группы») работают в Эймском центре Национального управления по аэронавтике и исследованию космического пространства. Кастинг — научный сотрудник. Получил степень бакалавра в области химии и физики в Гарвардском колледже в 1975 г. и докторскую степень по атмосферным наукам в Мичиганском университете в 1979 г. Тун стал работать в Эймском центре сразу после получения степени доктора философии в Корнеллском университете в 1975 г. Он один из создателей концепции «ядерной зимы» и автор гипотезы, согласно которой облака из капелек азотной кислоты, формирующиеся в стратосфере над Антарктикой, частично ответственны за образование озонной дыры. Поллак — научный сотрудник. Он имеет степень магистра в области физики, полученную в 1962 г. в Калифорнийском университете в Беркли, и докторскую степень в области астрономии, полученную в 1965 г. в Гарвардском университете.

Steven N. Austad (СТИВЕН Н. ОСТАД «Приспосабливающийся опоссум») начинал как специалист по английскому языку (в этой области он имеет степень бакалавра, присвоенную в 1969 г. в Калифорнийском университете в Лос-Анджелесе) и работал в Голливуде. Заинтересовался поведением животных и в 1976 г. получил степень бакалавра в области биологии в Университете шт. Калифорния в Нортридже, а в 1981 г. степень доктора философии в области эволюционной экологии в Университете Пардю. Сотрудничал по приглашению в Университете Пардю и в Университете шт. Нью-Мексико. С 1986 г. работает в Гарвардском университете; в настоящее время ассистент, занимается эволюционной биологией. Жена Остада ветеринар, и дома у них, по его словам, полно больных и выздоравливающих животных, в том числе есть такса с вживленным водителем ритма в сердце.

Richard B. Kaner, Alan G. MacDiarmid (РИЧАРД Б. КАНЕР, ЭЛАН Г. МАКДАЙРМИД «Электропроводящие полимеры») работали вместе, когда Канер был аспирантом в исследовательской группе Макдайрмида. В

настоящее время Канер доцент химии в Калифорнийском университете в Лос-Анджелесе. Степень доктора в области неорганической химии получил в 1984 г. в Пенсильванском университете, а затем продолжил обучение в Калифорнийском университете в Беркли. На должности доцента Канер работает с 1987 г. Его научные интересы сосредоточены на химии твердого тела. Макдайрмид — профессор химии в Пенсильванском университете. Родился в Новой Зеландии, там же в 1948 г. получил степень бакалавра; степень доктора химии ему присвоена в 1955 г. Кембриджским университетом. После этого Макдайрмид преподавал в Университете Сейнт-Эндрюса и оттуда в 1964 г. перешел на нынешнее место работы. Макдайрмид и его коллеги первыми начали исследования в области синтеза, допирования и изучения свойств электропроводящего полиацетилена.

Jonathan M. Borwein, Peter V. Borwein (ДЖОНАТАН М. БОРВЕЙН, ПИТЕР В. БОРВЕЙН («Рамануджан и число π »)) — братья, уроженцы Сент-Андруса (Шотландия). Старший, Джонатан Борвейн, — профессор математики в Университете Далхузи в Новой Шотландии (Канада). Получил степень бакалавра в 1971 г. в Университете Западного Онтарио, где их отец до сих пор возглавляет кафедру математики. Степень доктора математики получил в 1974 г. в Оксфорде, где был стипендиатом Родса от Онтарио, и сразу после этого занял место на факультете в Далхузи. Преподавал также в Университете Карнеги—Меллона и занимался исследовательской работой в университетах Кембриджа, Лиможа и Монреаля по их приглашению. Питер Борвейн — доцент математики в Далхузи. Получил степень бакалавра в Университете Западного Онтарио (1974 г.) и степень доктора философии в Университете Британской Колумбии (1979 г.) Младший Борвейн в 1979—1980 гг. работал в Оксфорде научным сотрудником НАТО, затем стал работать в Далхузи.

Colin McEvedy (КОЛИН МАКЭВЕДИ «Бубонная чума») — консультант по психиатрии в Больнице Св. Бернарда на окраине Лондона. Сын хирурга; стал врачом, окончив в 1955 г. Оксфордский университет. Во время военной службы в ВВС Великобритании работал в Институте авиационной медицины, а затем специализировался в области психиатрии в Больнице Модсли и Мидлсексской больнице. В 1971 г. получил степень доктора медицины в Оксфордском университете.

SCIENTIFIC AMERICAN

ФЕВРАЛЬ 1938 г. На сравнительно небольшом участке известнякового ложа реки Пургатори, в юго-восточной части шт. Колорадо, обнаружены прекрасно сохранившиеся следы плотоядных и растительноядных динозавров, несомненно относящиеся к юрской эпохе. Наряду с огромными круглыми отпечатками, оставленными четвероногими рептилиями, до наших дней дошли многочисленные следы трехпалой стопы двуногих динозавров. Все эти следы, возможно, были оставлены в один и тот же день (а может быть, и час) много десятков миллионов лет назад.

Когда природа дает сбой и насылет холода в те районы, где обычно бывает тепло, фермерам, выращивающим фрукты, приходится специально обогревать свои бесценные плодовые деревья. Во Флориде и Калифорнии в этих целях издревле использовались те же сосуды, что применяются для окулировки деревьев. В наше время их вытесняют специальные нагреватели, в которых топливом служит нефть, и мощные вентиляторы, разгоняющие теплый воздух по большой площади.

После 26 лет упорных трудов ученые сумели получить в чистом виде витамин, предотвращающий болезнь бери-бери, установить его химическую структуру и синтезировать его. Синтез витамина обходится гораздо дешевле, чем выделение его из отрубей.

Тайны эндокринной системы раскрыты далеко не полностью, однако мы уже можем многое сказать о работе составляющих ее небольших по размерам органов, выделяющих определенные вещества непосредственно в кровь. Известно, что физическое развитие человека, его умственная деятельность и эмоциональное состояние во многом зависят от функционирования нескольких желез, общий вес которых не превышает 400 г.

Еще до конца нынешнего столетия человечеству, по всей видимости, придется в корне пересмотреть свое отношение к насекомым: вместо безжалостного тотального их уничтожения человек начнет прилагать усилия к тому, чтобы спасти некоторые виды. Все это явится следствием чрез-

вычайно высокой эффективности современных методов борьбы с насекомыми, таких, например, как распыление ядов с помощью аэропланов (в этом случае зараженным оказывается участок в несколько квадратных километров), когда уничтожаются не только вредные для человека насекомые, но и безвредные или даже полезные виды.

SCIENTIFIC AMERICAN

ФЕВРАЛЬ 1888 г. При осуществлении своего нового проекта — строительства канала через [Панамский] перешеек — неумолимый Лессепс был вынужден временно изменить свои планы. Обнаружив, что его капиталы почти полностью истощены, в то время как работа еще далека от завершения, он принял решение строить канал пока что со шлюзами. Создание серии железных шлюзов Лессепс поручил Эйфелю, автору проекта 250-метровой башни, сооружаемой в Париже для предстоящей Всемирной выставки. Шлюзы будут расположены в нескольких местах по длине канала и помогут переправлять суда через приподнятые участки местности. Однако Лессепс считает этот проект лишь временным и не собирается отказываться от первоначального варианта — бесшлюзового канала.

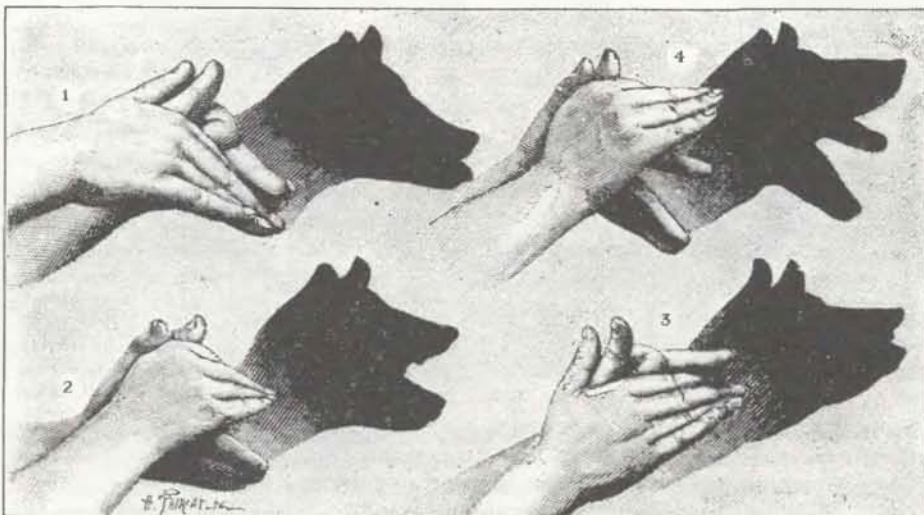
Если влагу, выдыхаемую людьми в комнате и осаждающуюся на холодном оконном стекле, собрать и раскалить, то запах, напоминающий запах паленых волос, обнаружит присутст-

вие в ней органических веществ. А если позволить этой влаге осесть на оконное стекло в течение нескольких дней, то при исследовании ее под микроскопом в ней можно обнаружить крошечные живые организмы.

В последнее время работы по созданию паровых машин для обычных дорог приняли новое направление. Место громоздких тихоходных машин, используемых в основном для перевозки грузов, стали занимать небольшие «самодвижущиеся» транспортные средства. Легкие и быстрые, они могут использоваться и для перевозки пассажиров, и для увеселительных поездок.

Расстояния до звезд можно определять так же, как измеряют расстояния до Солнца и планет — по величине параллакса. Наблюдения при этом ведутся из одной точки земной поверхности с интервалом в полгода. Иными словами, точками наблюдения служат не два разных места на земном шаре, а концы диаметра земной орбиты, равного 300 млн. км. Даже при такой огромной базе параллакс столь незначителен, что может быть зарегистрирован лишь при самых тщательных наблюдениях с помощью самых тонких приборов. Измерения показали, что ближайшей к Земле является звезда Альфа Центавра.

Идея проецирования теней от различных предметов на плоскую поверхность уходит корнями в глубокое прошлое. Невозможно точно установить, когда человеку пришло в голову забавлять детей по вечерам причудливыми изображениями животных, образуемыми тенями рук. За последние несколько лет мастерство создания подобных изображений настолько возросло, что простое развлечение превратилось в подлинное искусство.



Собака понюхала кусок мяса (1), схватила его (2), проглотила (3) и с наслаждением зевнула (4)

Картирование хромосом при помощи ДНК-маркеров

Изменчивые последовательности ДНК в хромосомах человека используются как генетические маркеры. Отдельные маркеры служат для поиска дефектных генов, совокупность маркеров составляет систему ориентиров хромосомных карт

РЕЙ УАЙТ, ЖАН-МАРК ЛАЛУЭЛЬ

ДОПУСТИМ известно, что какая-то болезнь передается в семьях по классическим менделевским правилам наследования. Где-то среди 100 тыс. генов, расположенных на 23 парах хромосом, имеется один дефектный ген. Симптомы и течение болезни описаны скрупулезнейшим образом, но ее биохимия остается загадкой и даже оценка предрасположения к заболеванию ведется по существу наугад. Такова ситуация отнюдь не для нескольких редких недугов, а для большинства из 3 тыс. известных генетических болезней, включая такие «семейные проклятия», как болезнь Хантингтона и муковисцидоз. Как же искать причины болезни, методы диагностики и, наконец, лечения?

Сейчас стало возможным начинать поиск непосредственно с дефектного гена. При этом нужно обследовать весьма обширную «территорию»: хромосомы человека состоят из линейных молекул двунитевой ДНК общей длиной около 3 млрд. пар оснований. Типичный ген, т. е. полная единица генетической информации, напротив, сравнительно мал: содержит порядка 10 тыс. пар оснований. И тем не менее, обнаружив корреляцию в наследовании определенной последовательности ДНК — «маркера» — с наследованием болезни, удается локализовать мутантный ген в пределах 1—2 млрд. пар оснований, т. е. менее чем в тысячной части генома. Такой степени точности достаточно для того, чтобы к гену можно было применить молекулярные методы клонирования ДНК и определить его активность. Обнаружение тесно сцепленного с заболеванием генетического маркера означает также, что можно установить характер наследования гена, обуславливающего заболевание. Это открывает пути для создания простых методов выявления носителей и будущих жертв болезни.

Основная стратегия здесь — анализ

сцепления; это испытанный инструмент классической генетики. В нашей лаборатории в Университете шт. Юта и во многих других лабораториях он обрел второе дыхание благодаря методам молекулярной биологии, которые сделали возможным использование гораздо более многочисленных маркеров — вариантов полиморфизма длины рестриционных фрагментов (ПДРФ). Сегодня анализ сцепления уже выявил маркеры ПДРФ для ряда генов, имеющих отношение к определенным болезням; в скором времени список болезней, которые можно будет исследовать этим методом, значительно расширится*. Есть и более общая цель. Анализируя наследование сразу многих маркеров ПДРФ в здоровых семьях, мы и другие исследователи начали сопоставлять их положения относительно друг друга и картировать их на физической структуре хромосом. Задачей является создание полной карты маркеров, т. е. порядка расположения точек отсчета, которые покрывают весь геном, что позволяет локализовать ген заболевания с несравненно большей эффективностью, чем при использовании отдельных маркеров.

ОСНОВОЙ анализа сцепления являются закономерности наследования генов. Обычная человеческая клетка содержит 23 пары гомологичных (т. е. содержащих один и тот же набор генов) хромосом; в паре одна хромосома унаследована от матери, другая — от отца. При мейозе (серии клеточных делений, которая приводит к возникновению половых клеток — сперматозоидов или яйцеклеток) гомологичные хромосомы в клетке-предшественнике удваиваются, а затем распределяются по четырем клеткам, каждая из которых по-

лучает 23 одиночные хромосомы. Однако родительские хромосомы передаются не в интактном виде. В процессе мейоза гомологичные хромосомы множественно рекомбинируют: они «перекрещиваются» и обмениваются сегментами равной длины (см. иллюстрацию на с. 9). В результате каждая одиночная хромосома в половой клетке обычно является комбинацией сегментов из двух родительских хромосом. Рекомбинация и есть тот феномен, который позволяет судить о сцеплении между маркером и заболеванием.

Обнаружить рекомбинацию и использовать ее при анализе сцепления удается благодаря многочисленным отличиям между гомологичными хромосомами. Часто они несут различные аллели (варианты) как многих парных генов, так и бессмысленных последовательностей ДНК, находящихся внутри и между генами. Рекомбинантные хромосомы, которые попадают в половые клетки, представляют собой новые комбинации этих аллелей. Аллель какого-нибудь локуса на одной хромосоме и аллель иного локуса из другой, гомологичной, хромосомы могут объединиться и передаваться совместно. В то же время аллели двух локусов на одной хромосоме могут разделиться, в результате чего унаследуются только один из них.

Чем ближе друг к другу расположены два локуса на одной и той же родительской хромосоме, тем реже их аллели разделяются при обмене ДНК между гомологичными хромосомами в ходе мейоза. Таким образом, расстояние между нужным геном, например мутантным аллелем, приводящим к заболеванию, и маркером можно оценить по корреляции в характере наследования этих аллелей. Если у членов семьи с наследственным заболеванием почти всегда присутствует один и тот же вариант маркера, то мутантный ген и маркер должны располагаться рядом в одной и той же

* См. краткий обзор «Новый метод выявления дефектных генов», «В мире науки», 1987, № 11, с. 96—98. — *Прим. ред.*

хромосоме. В этом случае говорят, что маркер и ген, связанный с заболеванием, сцеплены.

Другие маркеры, которые расположены дальше от гена, связанного с заболеванием, будут рекомбинировать с этим геном чаще, так что с любым из этих маркерных аллелей болезнь будет наследоваться с меньшей вероятностью. В крайнем случае, когда маркер и ген находятся в одной хромосоме очень далеко друг от друга, частота рекомбинации достигнет 50%, т. е. маркер и ген не сцеплены: данный маркерный аллель с равной вероятностью передается и не передается вместе с болезнью. Такая же картина наблюдается, если маркер и мутантный аллель находятся на разных хромосомах.

ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ корреляции в наследовании маркера и болезни необходимо, чтобы выполнялись два условия. Во-первых, нужен способ легко обнаруживать маркер. Во-вторых, маркер должен существовать в популяции в виде набора различающихся вариантов. Сцепление можно выявить только в том случае, если человек, несущий мутантный и нормальный аллели гена, обуславливающего заболевание, имеет также два

различных варианта маркера. Если же два маркерных аллеля неотличимы, в потомстве нельзя будет выявить рекомбинацию между маркером и геном, связанным с болезнью, т. е. не будет способа отличить сцепленный маркер от несцепленного.

Еще несколько лет назад в распоряжении исследователей было лишь ограниченное число маркеров, удовлетворяющих обоим критериям. Гены, кодирующие определенные ферменты, антигены групп крови (белки, которые определяют группу крови) и некоторые другие белки, существуют во множестве аллельных вариантов, что приводит к белковому полиморфизму — различным вариантам белка, кодируемого данным геном; эти различия нередко можно выявить. Было известно всего 25—30 таких маркерных систем разной степени значимости, и затрагивали они только малые участки нескольких хромосом. Из-за недостатка маркеров большая часть человеческого генома оставалась недоступной для анализа сцепления.

С появлением технологии рекомбинантной ДНК в 1970-х годах картирование по сцеплению превратилось в практичный и мощный инструмент генетики человека. Можно даже

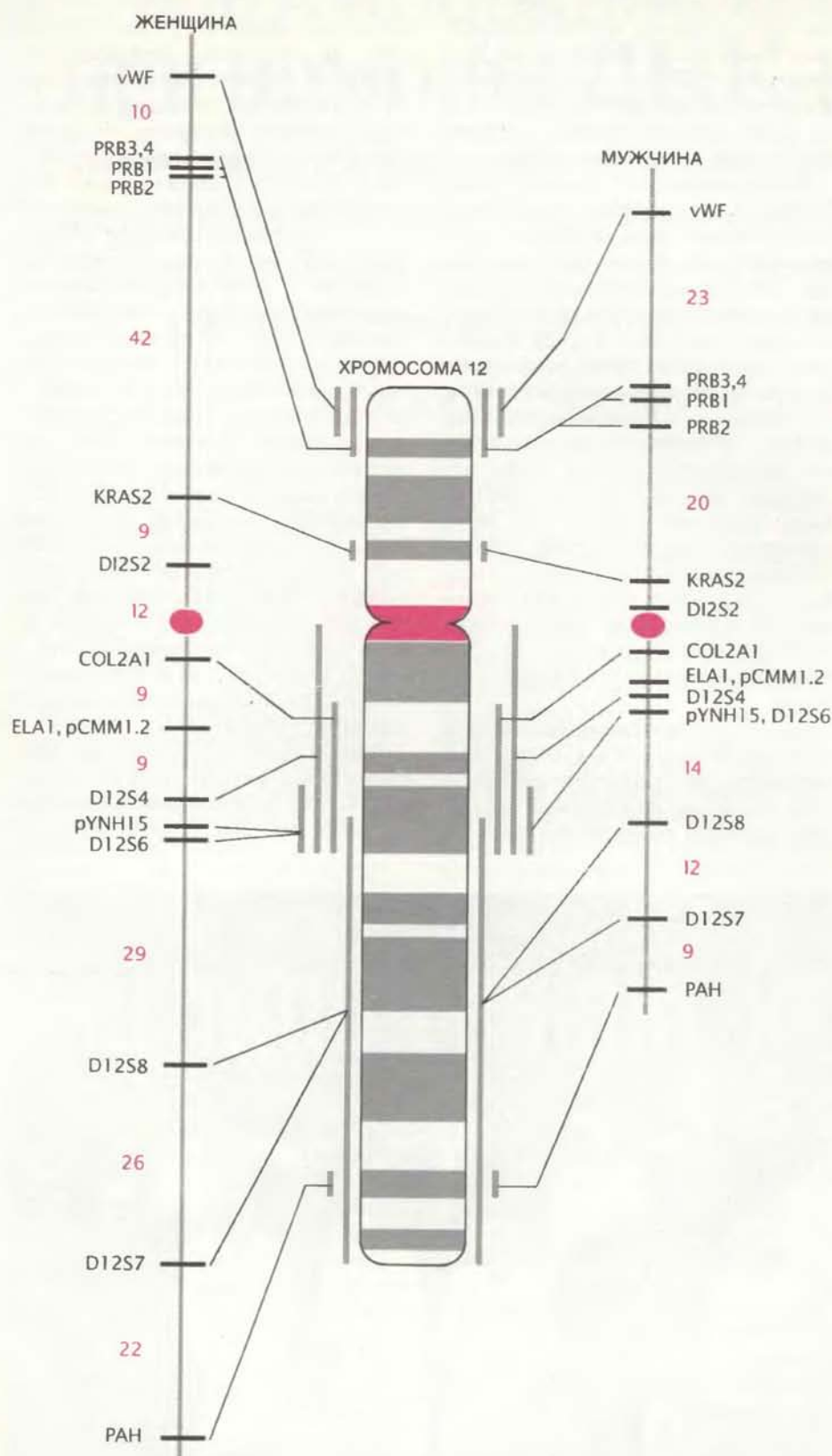
сказать, когда это превращение произошло: в апреле 1978 г. на конференции по генетике, организованной Университетом шт. Юта, на которой Д. Ботстейн из Массачусетского технологического института, Р. Дейвис из Станфордского университета и М. Скольник из Университета шт. Юта высказали соображения в пользу того, что последовательности ДНК сами по себе могут служить многочисленными и легко обнаруживаемыми маркерами. Осознав потенциальную важность нового подхода, один из авторов этой статьи, а именно Уайт, вскоре решил проверить эту идею, и его лаборатория занялась разработкой маркеров на основе ДНК, с помощью которых можно было бы выявлять сцепление в любом месте генома человека. Ботстейн, Уайт, Скольник и Дейвис опубликовали свою первую статью, детализирующую этот подход, в 1980 г. Тем временем многие другие исследователи начали искать маркеры в человеческой ДНК и строить гипотезы об их применении. Стало ясно, что пришло время для реализации этого подхода.

Новый подход к анализу сцепления эффективен потому, что в последовательностях ДНК в норме наблюдается очень высокий уровень полимор-



БОЛЬШАЯ СЕМЬЯ с бабушками, дедушками и внуками — идеальный объект для изучения генетического сцепления. При анализе сцепления относительное положение сайтов на хромосомах определяется по частотам, с которыми варианты этих сайтов совместно передаются от родителей к детям. Анализируя характер наследования генетического

заболевания и подходящих генетических маркеров в семьях с изучаемым заболеванием, можно выяснить хромосомную локализацию обуславливающего его гена. По корреляциям в наследовании маркеров в здоровых семьях можно построить генетическую карту хромосом.



КАРТА ХРОМОСОМЫ 12, построенная по данным о наследовании ДНК-маркеров. В маркерных участках между гомологичными хромосомами часто имеются различия, которые можно выявить. Составляя карту, маркеры располагают наиболее статистически вероятным образом, разделяя расстояниями, отражающими частоту их рекомбинации, т. е. обмена участками между гомологичными хромосомами в ходе мейоза при образовании половых клеток. Частота рекомбинации двух маркеров растет с увеличением физического расстояния между ними, но на эту зависимость влияют несколько факторов, в частности пол. Например, для хромосомы 12 суммарная частота рекомбинации выше, если данная хромосома унаследована от женщины, чем если она принадлежала мужчине; поэтому генетическая карта женской хромосомы 12 длиннее. Локализация нескольких маркеров на этой хромосоме приблизительно установлена.

физма. У человека разница между гомологичными хромосомами составляет в среднем одну замену на каждые 200—500 пар оснований. Если идентифицировать эти аллельные варианты, получится практически неограниченный набор маркеров, разбросанных по всем хромосомам.

Эти маркеры обнаруживают при помощи ферментов, называемых рестрикционными эндонуклеазами; их продуцируют различные виды бактерий. Каждый такой фермент присоединяется к ДНК всюду, где находится определенная короткая последовательность нуклеотидов, и разрезает молекулу в определенном месте внутри этой последовательности. Изменения в нуклеотидной последовательности ДНК, которые приводят к возникновению или уничтожению сайта рестрикции, сказываются на длине образующихся фрагментов ДНК. Эти различия и создают полиморфизм длины рестрикционных фрагментов.

Полиморфизм длины рестрикционных фрагментов потенциально дает маркер. Однако в суммарной ДНК человека каждый фермент рестрикции находит миллионы «своих» сайтов. Как можно обнаружить один или два различающихся фрагмента среди миллионов? Сначала фрагменты сортируют при помощи электрофореза: смесь фрагментов под действием электрического поля пропускают сквозь гель, в котором их подвижность обратно пропорциональна длине. Мощная и чувствительная методика, названная гибридизацией по Саузерну (по имени разработавшего ее Эдварда М. Саузерна), позволяет выделить нужные фрагменты.

Гибридизация по Саузерну основана на особенностях структуры ДНК. Основания могут спариваться только по определенным правилам, так что в двунитевой молекуле ДНК последовательность одной нити представляет собой точный «слепок» последовательности другой нити. Поэтому участок однострессовой ДНК может служить пробой, обнаруживающей и связывающей комплементарную последовательность в образце двунитевой ДНК; для этого образец подвергают денатурации, нагревая или инкубируя в щелочной среде, чтобы нити ДНК разделились. По методике Саузерна фрагменты ДНК после электрофореза в геле подвергают денатурации, делают с геля отпечаток на фильтре и фильтр инкубируют с ДНК-пробой, меченной радиоактивным изотопом. Проба гибридизуется, т. е. связывается, только с теми фрагментами, которые содержат комплементарную ей последовательность оснований. Местоположение этих фрагментов, оп-

ределяемое их размерами, выявляется при помощи радиоактивной метки.

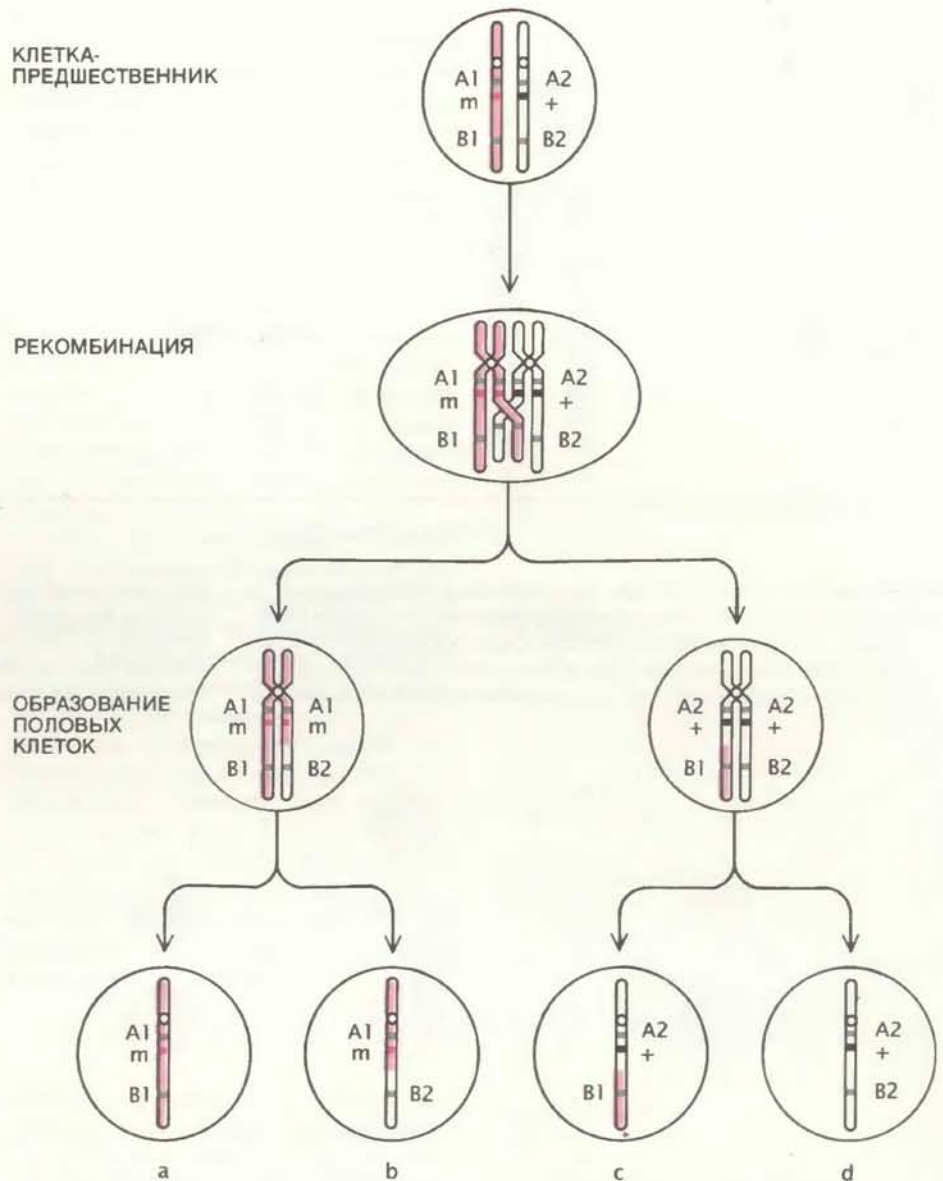
Таким образом, чтобы обнаружить полиморфизм длины рестриционных фрагментов, необходимо прежде всего найти пробу, комплементарную ДНК около сайта разрезания рестриционной эндонуклеазой. Сегмент ДНК выбирается, часто случайным образом, из коллекции («библиотеки») клонированных фрагментов ДНК, составляющих полный геном человека. Этот сегмент подвергают денатурации, метят радиоактивным изотопом и анализируют им по методике Саузерна образцы ДНК, обработанные рестриционным ферментом. Если на отпечатках ДНК различных индивидов радиоактивные полосы появляются в разных местах, то ясно, что для клонированной ДНК характерна изменчивость картины рестрикции, связанная с полиморфизмом ДНК. ДНК-проба и полиморфизм длины рестриционных фрагментов, который она выявляет, в совокупности представляют маркерную систему, дающую точку отсчета в геноме — короткий участок полиморфной ДНК, за наследованием которого можно следить.

Такой генетический маркер, определяемый по полиморфизму длины рестриционных фрагментов, в той или иной форме есть у каждого индивида, здорового или больного. Но если генетическое заболевание в семье передается от поколения к поколению вместе с определенным аллелем ПДРФ, можно предположить, что мутантный ген находится в том же хромосомном районе, что и маркер. В другой семье с данным заболеванием также обнаружится сцепление дефектного гена с этим маркером, хотя специфический вариант маркера, сопровождающий болезнь, может отличаться. Сцепление с произвольным маркером, конечно, ничего не говорит о физической локализации самого гена, но для многих целей (например, для диагностики) физическая локализация и несущественна. Тем не менее проба может также выявить хромосому, несущую маркер и ген, связанный с заболеванием. Если пробу смешать с полным набором человеческих хромосом, она будет гибридизоваться с той хромосомой, которая несет маркерный участок.

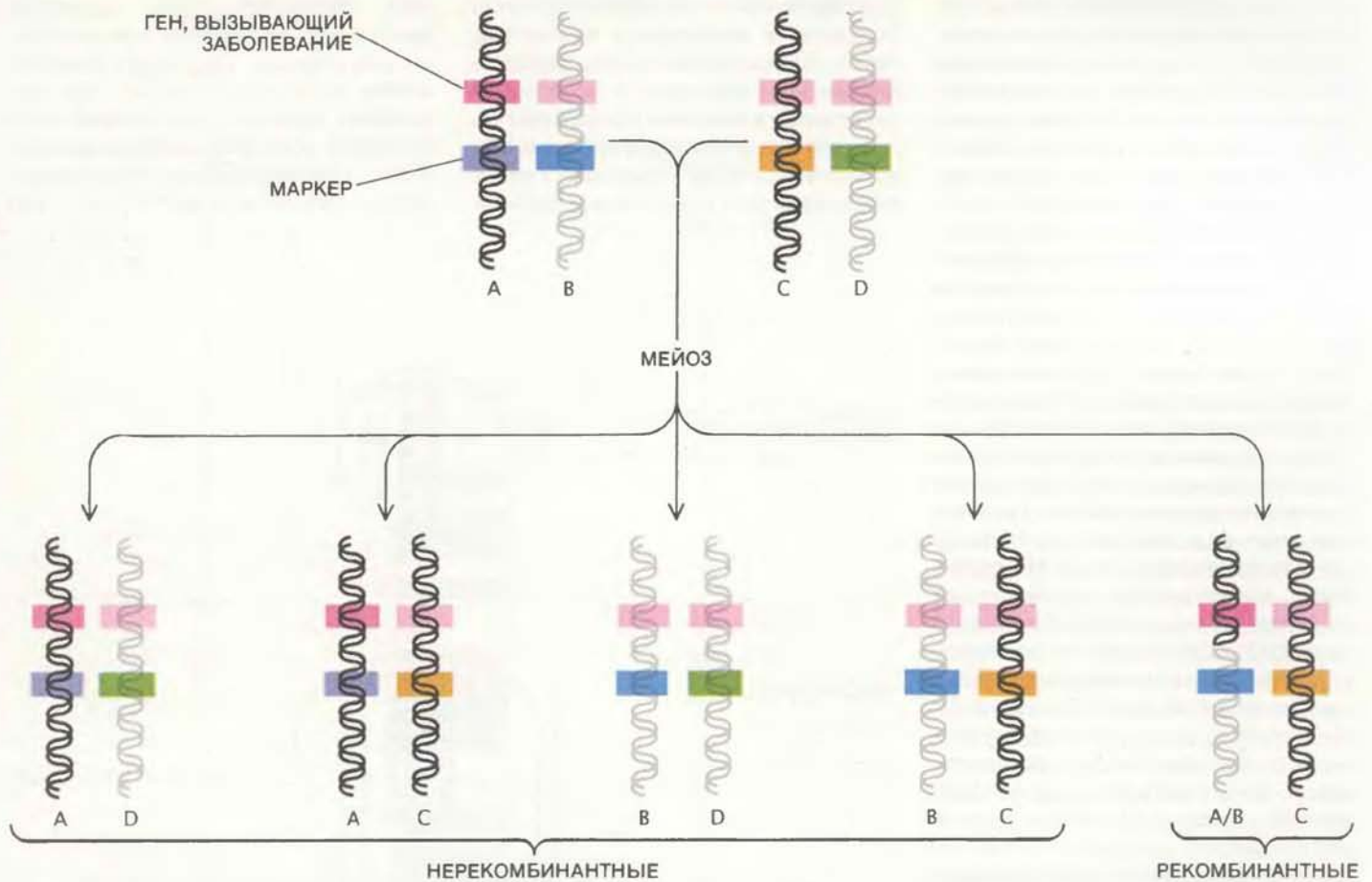
ЦЕННОСТЬ любого маркера зависит по большей части от того, много ли вариантов его сосуществует в популяции: чем их больше, тем выше вероятность, что у индивида, несущего ген, связанный с заболеванием, в маркерном локусе имеются два различных аллеля. Это делает возмож-

ным выявление рекомбинации между болезнью и маркером у потомства. Часто полиморфизм длины рестриционных фрагментов является следствием изменения одной пары оснований или добавления либо выпадения нескольких пар оснований в сайте разрезания рестриционным фермен-

том. Результат таких изменений прост: сайт рестрикции или возникает, или исчезает. Поскольку в данном случае существуют только два возможных варианта, по крайней мере половина всех индивидов, вероятно, будет гомозиготна по маркерному локусу: они должны иметь один и тот

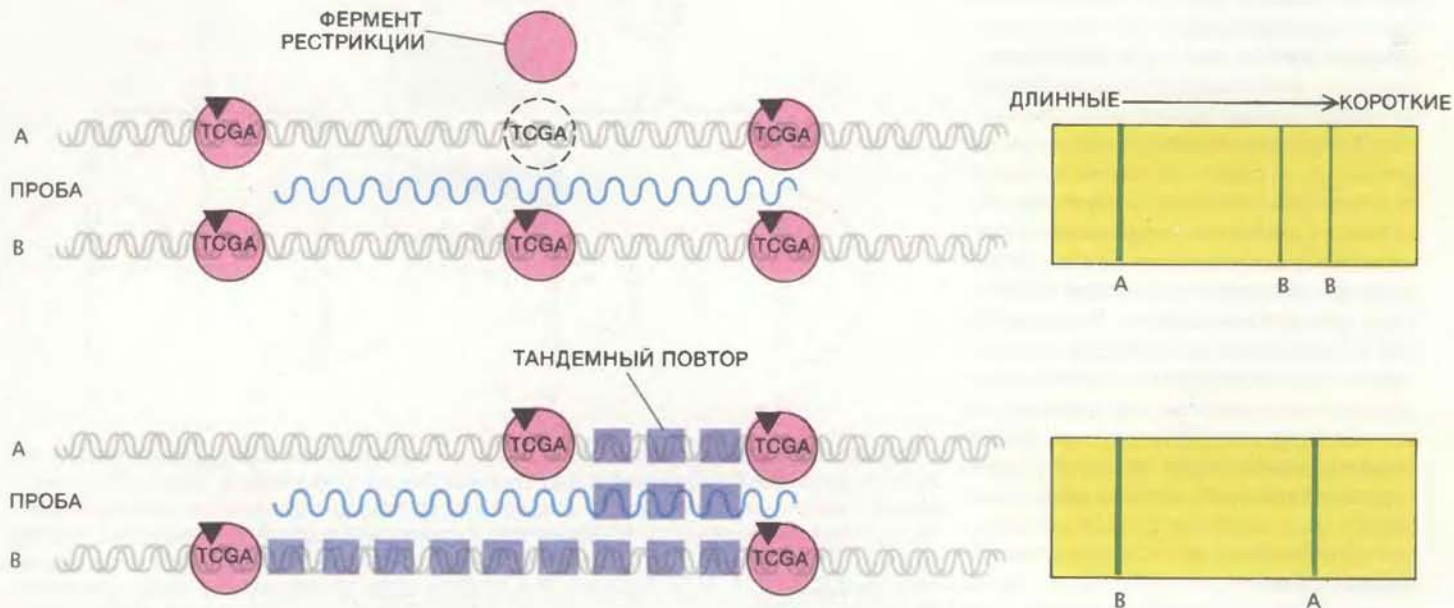


РЕКОМБИНАЦИЯ позволяет обнаружить генетическое сцепление. Здесь показана судьба воображаемой пары гомологичных хромосом в ходе мейоза (процессе клеточного деления, в результате которого образуются половые клетки — сперматозоиды или яйцеклетки). Хромосомы содержат различные аллели двух маркеров — А и В; одна хромосома несет также мутантный аллель гена (*m*), вызывающий заболевание, а в другой хромосоме аллель этого гена нормальный (+). В клетке-предшественнике заболевание сопутствует аллелям А1 и В1. На первой стадии мейоза хромосомы удваиваются. Затем происходит рекомбинация: гомологичные хромосомы обмениваются сегментами равной длины. На рисунке точка разрыва находится между локусами А и В. В результате из четырех образующихся половых клеток две (*a*, *d*) содержат такие же комбинации аллелей, как родительская клетка, а две (*b*, *c*) получают рекомбинантные хромосомы. В клетке *b* мутантный ген по-прежнему сопутствует аллелю 1 локуса А, но, в отличие от исходной ситуации, аллелю 2 локуса В. Низкая частота рекомбинации между геном, вызывающим заболевание, и маркером А показывает, что заболевание и маркер тесно сцеплены.



СЦЕПЛЕНИЕ между геном, вызывающим заболевание, и маркером выявляется при анализе семейной истории заболевания. Здесь показаны генетические особенности гипотетической супружеской пары и их детей. Один из родителей страдает заболеванием, вызываемым мутантным аллелем

(красный), другой здоров и имеет нормальные варианты гена (розовые). Вместе с болезнью дети, как правило, наследуют и характерный маркерный аллель (фиолетовый), так как ген, обуславливающий заболевание, и сцепленный с ним маркер рекомбинируют редко.



ДНК-МАРКЕРЫ можно обнаружить по полиморфизму длины рестриционных фрагментов. ДНК обрабатывают ферментом рестрикции, который расщепляет цепь ДНК всюду, где есть специфическая короткая последовательность нуклеотидов (в данном случае TCGA). В маркерах одного типа (вверху слева) разница между гомологичными хромосомами такова, что в одной из них определенное место рестрикции присутствует, а в другой отсутствует. В результате соответствующие рестриционные фрагменты хромосом

различаются по длине. Их выявляют после электрофореза (вверху справа) при помощи ДНК-пробы, нуклеотидная последовательность которой комплементарна последовательности маркерного участка. Другой тип маркеров (внизу слева) характеризуется изменчивостью числа tandemных повторов (коротких повторяющихся последовательностей ДНК). Длина участка между сайтами рестрикции в гомологичных хромосомах различна, что приводит к различию в картине электрофореза фрагментов (внизу справа).

же вариант на обеих гомологичных хромосомах. (Бывает, что два сайта рестрикции располагаются настолько близко друг к другу, что их можно выявить одной пробой; в этом случае получается четыре аллеля одного маркера.) При другом типе полиморфизма ДНК существует множество различных вариантов ПДРФ. Во многих участках генома одна последовательность, не кодирующая никакой белок, повторена много раз. Происхождение и значение этих так называемых тандемных повторов остается загадкой, однако для картирования по сцеплению они удобны тем, что число повторов в данном локусе может варьировать от нескольких до сотен копий. Соответственно варьируют по длине рестрикционные фрагменты, образующиеся при разрезании ДНК рядом с тандемными повторами (см. нижнюю иллюстрацию на с. 10). Следовательно, в этом случае существуют не два, а много возможных вариантов картины рестрикции. При такой изменчивости во всей популяции велика вероятность того, что у данного индивида на гомологичных хромосомах присутствуют различные варианты ПДРФ.

ПРОБЫ для маркеров, основанных на изменчивости в числе тандемных повторов, можно получать более целенаправленно, чем пробы для обычных маркеров ПДРФ. А. Джеффрейз из Лестерского университета недавно обнаружил, что есть сходство между повторяющимися последовательностями во многих локусах с такой изменчивостью в различных частях генома. Эволюционный смысл этого неясен, но гомология последовательностей означает, что в определенных условиях при помощи пробы, комплементарной одному из этих локусов, можно в библиотеке клонированной ДНК найти пробы, специфичные для других локусов. Из примерно 600 проб, имеющихся на сегодняшний день в нашей лаборатории, около 300 представляют собой последовательности с изменчивостью числа тандемных повторов.

Такие маркеры могут служить элементами общей карты сцепления генома. Их можно использовать также для более насущной задачи — для поиска специфического гена, обуславливающего заболевание. Найти маркер, наследование которого коррелирует с возникновением заболевания, трудно, если хромосомы не картированы. Часто в начале работы ничего не известно о хромосомной локализации гена, связанного с заболеванием, или о каком-либо маркере, характер наследования которого прослежен в

семье с этим заболеванием; в такой ситуации может случиться, что проверяют сцепление с десятками маркеров, на самом деле расположенных в далеких от нужного гена районах хромосом, в то же время оставляя без внимания другие, сцепленные с ним районы. Тем не менее анализ сцепления уже привел к ряду впечатляющих успехов.

Если известно, в какой хромосоме искать, то число маркеров, подлежащих проверке, уменьшается от в среднем нескольких сотен до 5—6. Например, если генетическое заболевание почти всегда поражает мужчин, но наследуется по материнской линии, можно предположить, что причиной является присутствие рецессивного гена в X-хромосоме, определяющей пол. (Мать, носительница болезни, имеет вторую X-хромосому, содержащую нормальную копию гена, что маскирует рецессивный ген. У сына, который унаследовал этот дефектный ген, есть лишь одна X-хромосома, и потому развивается заболевание.) Чтобы обнаружить этот ген, достаточно проверять только те маркеры, которые локализованы на X-хромосоме.

Гены, обуславливающие заболевание, сцепленные с X-хромосомой, были в числе первых, выявленных при помощи анализа полиморфизма длины рестрикционных фрагментов; самым первым обнаружили ген, обуславливающий мышечную дистрофию Дюшенна и, возможно, также мышечную дистрофию Беккера (его картировали К. Дейвис из Оксфордского университета и Р. Уильямсон из Больницы св. Марии в Лондоне). Впоследствии путем анализа сцепления был выявлен ряд заболеваний, связанных с дефектами в аутосомах (неполовых хромосомах; их у челове-

АНАЛИЗ полиморфизма длины рестрикционных фрагментов начинается с образца крови. Из ядер лейкоцитов экстрагируют ДНК и обрабатывают ее рестрикционным ферментом. Получающиеся фрагменты разделяют по размеру путем гель-электрофореза. Полиморфизм обнаруживают при помощи гибридизации по Саузерну. ДНК в геле нагревают, чтобы она денатурировала (т. е. двойная спираль разделилась на две нити) и переносят на нейлоновый фильтр. Фильтр инкубируют с пробой — меченым радиоактивным изотопом сегментом однонитевой ДНК, комплементарным локусу ПДРФ. Проба гибридизуется с фрагментами, соответствующими локусу. Их выявляют благодаря радиоактивной метке, помещая на фильтр рентгеновскую пленку.



ка 22 пары); список таких заболеваний все растет.

Из аутосомных заболеваний первым был картирован ген, вызывающий болезнь Хантингтона («хорею Гентингтона»). К этому привели результаты обследования семей с болезнью Хантингтона, живущих в США и на берегу озера Маракайбо в Венесуэле, проведенное Ф. Гузеллой с коллегами из Медицинской школы Гарвардского университета. Исследователям повезло: они обнаружили маркер, сцепленный с заболеванием, проверив наследование всего восьми маркеров.

С тех пор в нашей и других лабораториях были обнаружены маркеры для генов, вызывающих такие заболевания, как муковисцидоз (врожденный кистозный фиброз, поражающий бронхиальные, поджелудочную и другие железы), периферический нейрофиброматоз, или болезнь Реклингхаузена (характеризуется опухолями кожи и периферических нервов), семейный полипоз кишечника (при этом заболевании образуется множество полипов в толстой кишке и очень высокий риск рака толстой кишки). Интересно, что доказательства сцепления получены даже для семейных форм

болезни Альцгеймера и маниакально-депрессивного психоза.

КАЖДАЯ УДАЧА в картировании открывает путь к идентификации самого гена, обуславливающего заболевание, что в свою очередь создает предпосылки для исследования молекулярных механизмов заболевания. Клонировав ген, можно определить его нуклеотидную последовательность, по ней установить структуру белка, который он кодирует, и выяснить, в чем состоит специфический дефект. Можно синтезировать этот белок, получить у лабораторных животных антитела к нему и, поместив их подходящим образом, выявить распределение белка в тканях, поражаемых при данном заболевании. Эти знания могут дать ключ к лечению.

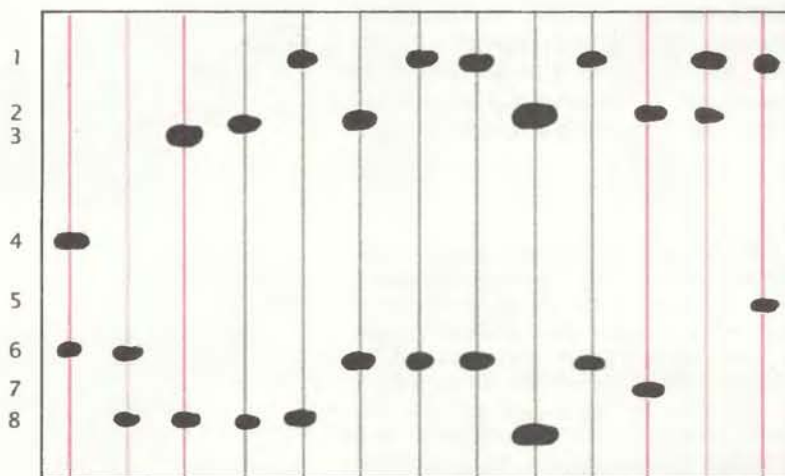
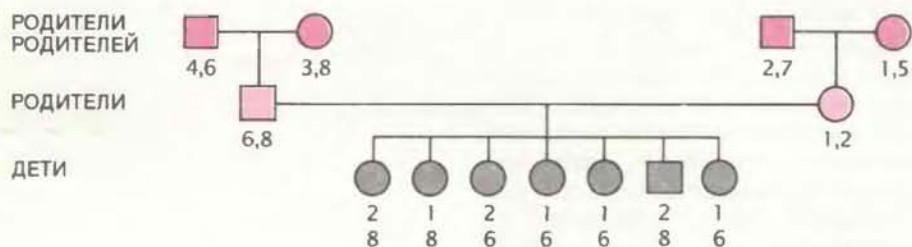
Однако во многих случаях начальные данные о локализации гена слишком неточны, чтобы надеяться выделить ген при помощи современных методов работы с ДНК. К примеру, ген, вызывающий болезнь Хантингтона, рекомбинирует с первым из обнаруженных маркеров с частотой около 5%; это означает, что данный маркер находится на расстоянии не менее

5 млн. пар оснований от гена. Для выявления и клонирования гена желательно, чтобы «подозреваемый» фрагмент ДНК не превышал 1 млн. пар оснований, т. е. нужны маркеры, рекомбинирующие с искомым геном с частотой около 1%. В идеале, кроме того, маркеры должны фланкировать ген, иными словами, проверяемый сегмент ДНК должен располагаться между ними.

Уже найдены тесно сцепленные фланкирующие маркеры для муковисцидоза, периферического нейрофиброматоза и семейного полипоза кишечника; выявлен также новый маркер, тесно сцепленный с болезнью Хантингтона. Поиски генов, ответственных за эти заболевания, сейчас в разгаре. Подходы применяются разные, но общая тактика состоит в том, что из библиотеки клонированных хромосомных сегментов выбирается тот сегмент, который узнается пробами к обоим фланкирующим маркерам. Затем этот сегмент, который предположительно включает маркеры и ген между ними, расщепляют и каждый из фрагментов клонируют и проверяют по биологической активности. В типичном случае фрагмент служит пробой на матричную РНК (наличие которой свидетельствует о том, что ген экспрессируется) в тканях, поражаемых при данном заболевании. Если эта проба выявляет матричную РНК, уникальную для пораженной ткани, то проверяемый фрагмент должен содержать — частично или полностью — ген, вызывающий заболевание.

Наибольшим успехом другой стратегии стало выявление генетического дефекта при мышечной дистрофии Дюшенна. У многих страдающих этой болезнью отсутствуют сегменты в определенном районе X-хромосомы, который по данным Дейвиса и Уильямсона сцеплен с заболеванием. По-видимому, причиной болезни может быть частичная или полная утрата нормального гена. Л. Кюнфель с коллегами из Медицинской школы Гарвардского университета, идентифицировав участок X-хромосомы, отсутствующий у всех больных с мышечной дистрофией Дюшенна, выделили и клонировали искомым ген.

Иногда даже до того, как ген заболевания идентифицирован, анализ сцепления позволяет строить предположения о механизме заболевания. Может оказаться, что сцепленный маркер расположен возле гена с известной функцией; в таком случае имеет смысл предположить, что в этом гене и заключена причина болезни. Например, маркер для периферического нейрофиброматоза находится

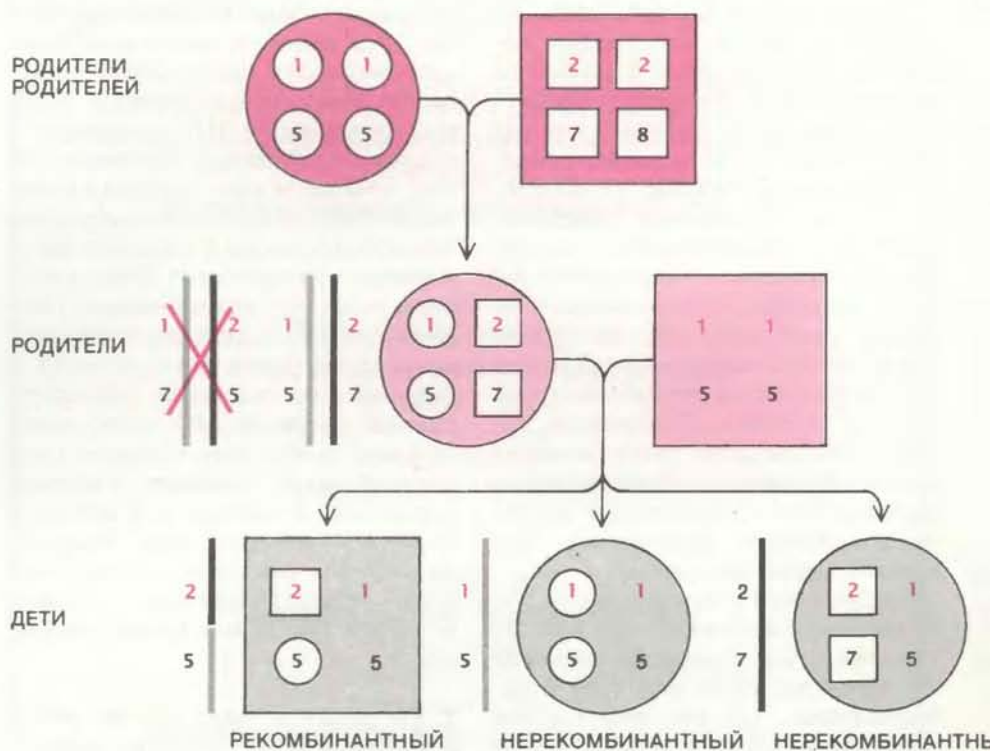


ХАРАКТЕР НАСЛЕДОВАНИЯ полиморфизма длины рестрикционных фрагментов можно определить, сравнивая рестрикционные фрагменты у членов одной семьи. В данном случае анализировали маркер ПДРФ, относящийся к локусам с изменчивостью числа тандемных повторов. Различные аллели таких локусов характеризуются рестрикционными фрагментами определенной длины. В этой семье каждый индивид (мужчины обозначены квадратиками, женщины кружочками) имеет два различных аллеля маркера (по одному в каждой из гомологичных хромосом). Дети получают по одному аллелю от каждого из родителей. Если в семье с генетическим заболеванием какой-то аллель ПДРФ сопутствует этому заболеванию, то вероятно, что маркер и дефектный ген сцеплены.

на хромосоме 17, которая содержит ген, кодирующий клеточный рецептор так называемого фактора роста нервов (этот белок стимулирует рост нервных клеток). Возникло подозрение, что мутация в этом гене может вызывать нейрофиброматоз, однако позднее выяснилось, что он расположен на некотором расстоянии от локуса, обуславливающего заболевание. Теперь следует проверить, не связаны ли с данным заболеванием другие гены хромосомы 17.

ДОСТАТОЧНО тесное сцепление между маркером и заболеванием делает возможным разработку методов для выявления носителей заболевания и для пренатальной диагностики, что насущно необходимо, если учесть, сколь часты и коварны многие генетические заболевания. К примеру, среди тех, кто родился в Северной Европе, каждый двадцатый является носителем гена, обуславливающего муковисцидоз. Поскольку этот ген рецессивен, у носителей симптомы не проявляются. Но если два носителя вступают в брак, то у их детей с вероятностью 1/4 будут дефектны оба аллеля гена, что приведет к развитию заболевания. Болезнь Хантингтона вызывается доминантным геном (т. е. проявляется даже если второй аллель нормальный), но ее симптомы возникают обычно в пожилом возрасте, а к этому времени ничего не подозревавшая жертва уже могла передать болезнь половине своих детей.

Для того чтобы проверять присутствие гена, обуславливающего заболевание, у индивида из группы риска, нужно сначала проанализировать ДНК нескольких других членов его семьи — как здоровых, так и больных — с целью определить, какой маркерный аллель (или аллели — в том случае, когда заболевание «рецессивно», т. е. проявляется при наличии обеих копий гена) наследуется вместе с заболеванием в этой конкретной семье. Если такой сигнальный аллель будет обнаружен, проверяемому следует принять во внимание, что, становясь отцом (или матерью), он рискует передать потомству генетическое заболевание. Поскольку возможно брать образцы ДНК плода вскоре после зачатия, реально также диагностировать заболевание у будущего ребенка еще до его рождения, что позволяет родителям обоснованно решить, не стоит ли прервать беременность. Важно отметить, что в семьях с риском определенных генетических заболеваний пренатальная диагностика на деле повышает рождаемость, поскольку многие супруги вообще бы не заводили детей, если бы не было воз-



ПРОБЛЕМА «ФАЗЫ» при генетическом картировании, т. е. определение того, как аллели двух маркеров распределены по гомологичным хромосомам, можно решить, анализируя данные о наследовании этих аллелей в трех поколениях одной семьи. Пока не установлена фаза маркеров (цветные и черные цифры) у родителей, нельзя однозначно интерпретировать рекомбинацию у детей. Анализируя ДНК в данном случае родителей матери, можно выяснить, какая пара аллелей пришла от каждого из них. Так как мать должна была получить аллели 1 и 5 вместе с хромосомой, унаследованной от своей матери, аллели 2 и 7 должны находиться в гомологичной хромосоме, полученной ею от своего отца. Другая комбинация аллелей таким образом исключается, и у первого ребенка однозначно идентифицируются рекомбинационные события, произошедшие в материнской хромосоме.

возможности убедиться в здоровье ребенка до его рождения.

ПАРАЛЛЕЛЬНО поиску специфического сцепления участков ДНК при различных заболеваниях шло построение карт сцепления, которые показывают порядок расположения в хромосомах как выделенных маркеров, так и охарактеризованных генов. Создание карт сцепления — это более обстоятельный и систематический подход к поиску мутантных генов. Если есть полная карта сцепления, то при определении локализации гена, связанного с заболеванием, можно выбрать и проверить набор маркеров, расположенных в хромосомах на одинаковых больших расстояниях друг от друга. Затем, когда будет обнаружено сцепление, свидетельствующее о локализации гена в определенном сегменте хромосомы, проверяются маркеры, отмеченные на мелкомасштабной карте этого района, с целью найти тесное сцепление, необходимое для дальнейших исследований на молекулярном уровне.

«Сканирование» генома по сцепле-

нию ускорит не только поиски дефектов в отдельных генах, но также выяснение генетической основы заболеваний, вызываемых не одним, а несколькими аномальными генами. Кроме того, карты сцепления в конечном счете делают возможной проверку многих участков хромосом одновременно, что позволит установить, являются ли генетическими такие заболевания, как диабет, ишемическая болезнь сердца и некоторые виды рака, к которым, по-видимому, существует наследственное предрасположение. В результате можно найти гены, которые определяют предрасположение к этим заболеваниям.

Создание такой карты расширяет стратегию анализа сцепления: теперь можно искать сцепление не между маркерным участком ДНК и заболеванием, а между выбранными маркерами ДНК. Если аллели различных маркеров имеют тенденцию наследоваться совместно, это говорит о локализации маркеров в одной хромосоме, а частота, с которой маркеры рекомбинируют, отражает «генетическое расстояние» между ними.

Хотя в принципе картировать по сцеплению просто, это требует обширной «бухгалтерии» и сложного аналитического аппарата. Крупномасштабная карта сцепления генома, достаточная, чтобы установить локализацию гена в пределах 10—20 млн. пар оснований, должна содержать около 100—200 равномерно распределенных маркеров. Однако чтобы нашлись маркеры, расположенные на равном расстоянии друг от друга, нужно картировать гораздо большее число маркеров, распределенных случайным образом. Необходимо собрать образцы ДНК сотен людей из десятков больших семей и во всех проанализировать полиморфизм длины рестрикционных фрагментов для каждого маркерного локуса.

Анализ этого огромного множества данных усложняется тем обстоятельством, что у каждого индивида примерно две трети маркеров неинформативны, так как имеются два идентичных аллеля и потому невозможно обнаружить сцепление между маркером и любым другим локусом в потомстве. Более того, в том случае, когда сцепление двух маркеров проявляется, часто нельзя определить «фазу», т. е. установить, как аллели распределены по двум гомологичным хромосомам. А без знания того, какие аллели находятся в одной хромосоме у родителя, нельзя однозначно интерпретировать рекомбинацию между маркерами у потомка.

Эти ограничения сводятся к минимуму, когда полученные данные охватывают обширную родословную. Авторам этой статьи выпала счастливая возможность провести картирование на основе прекрасного материала. В одной из таких работ мы использова-

ли данные о более 50 проживающих в шт. Юта семьях с восемью и более детьми. Все эти люди любезно согласились дать образцы крови, из которых мы выделили ДНК для анализа и получили постоянные клеточные линии. Благодаря многодетности семей можно было проследить судьбу родительских хромосом в большом числе мейозов, что позволяет более точно оценить частоту рекомбинации. Кроме того, почти во всех обследованных нами семьях были живы дедушки и бабушки и по отцовской, и по материнской линии; их ДНК часто помогала определить фазу маркеров у родителей (пусть, например, известно, что аллель 1 маркера А и аллель 3 маркера В имеются у деда, тогда, если маркеры сцеплены, его сын или дочь — один из родителей — должен нести оба этих аллеля в одной хромосоме).

НО ДАЖЕ в таких случаях неизбежная ограниченность данных ведет к тому, что карта строится по вероятностному принципу. Статистические методы позволяют оценить наиболее вероятную частоту рекомбинации, т. е. генетическое расстояние, между любыми двумя маркерами по наблюдаемой картине наследования. Если наблюдаемая частота рекомбинации составляет 50%, значит маркеры не сцеплены. Меньшая частота, скажем 10%, если она достоверна статистически, свидетельствует о сцеплении. В самом начале наших работ по картированию Лалуэль (работавший тогда в Парижском университете) понял, что задача потребует специальных статистических методов и компьютерных программ. Он и его коллега М. Латро составили алго-

ритмы и программы, способные работать с огромными базами данных, и при этом проводить анализ характера наследования одновременно многих маркеров.

Выявив какой-то набор сцепленных маркеров, необходимо определить порядок их расположения в хромосоме. В принципе можно рассчитать вероятность наблюдаемой картины наследования при всех мыслимых комбинациях и выбрать самый вероятный порядок расположения. Однако число возможных комбинаций всего для 15 сцепленных маркерных локусов получается огромным — $6,5 \cdot 10^{11}$. На практике можно быстро отбросить целые «семейства» невероятных комбинаций, рассматривая локусы подгруппами, скажем по три локуса одновременно.

Поясним это рассуждение на примере. Предположим, что в большой семье определенные аллели сцепленных маркеров А, В и С, как правило, передаются совместно, группой: наследование происходит по принципу «все или ничего». Но у одного из детей вместе с исходными аллелями А и С присутствует иной, чем обычно, аллель локуса В, а у другого ребенка исходный аллель В объединен с иными аллелями А и С. В такой ситуации порядок А—В—С наименее вероятен, поскольку он предполагает, что в обоих случаях произошли два акта рекомбинации: как между А и В, так и между В и С (при двух других вариантах расположения, А—С—В и В—А—С, наблюдаемую картину наследования можно объяснить одним актом рекомбинации).

Мы создали компьютерные системы, которые используют такую стратегию для установления порядка расположения произвольного числа сцепленных маркеров. Когда для группы сцепленных маркеров известен наиболее вероятный порядок расположения, можно определить их хромосомную локализацию, например, проводя гибридизацию ДНК одного из маркеров с набором интактных хромосом. Таким образом, из групп сцепления собирается карта хромосом.

Генетические расстояния на хромосомной карте сцепления связаны с физическими расстояниями (числом пар оснований), но эта связь никоим образом не прямая. Так, мы обнаружили, что частота рекомбинации для данной пары маркеров нередко значительно различается у разных полов. Другими словами, вероятность того, что два маркера в хромосоме, наследуемой от матери, рекомбинируют, может быть совершенно иной, чем в такой же хромосоме, наследуемой от отца. Например, в хромосоме 13

ЗАБОЛЕВАНИЕ	ХРОМОСОМА	ДАТА ПЕРВОЙ ПУБЛИКАЦИИ
БОЛЕЗНЬ ХАНТИНГТОНА	4	1983
МЫШЕЧНАЯ ДИСТРОФИЯ ДЮШЕННА	X (ГЕН КЛОНИРОВАН)	1983
ПОЛИКИСТОЗ ПОЧЕК	16	1985
МУКОВИСЦИДОЗ	7	1985
ХРОНИЧЕСКИЙ ГРАНУЛЕМАТОЗ ПЕРИФЕРИЧЕСКИЙ	X (ГЕН КЛОНИРОВАН)	1985
НЕЙРОФИБРОМАТОЗ ЦЕНТРАЛЬНЫЙ	17	1987
НЕЙРОФИБРОМАТОЗ СЕМЕЙНЫЙ ПОЛИПОЗ	22	1987
КИШЕЧНИКА	5	1987
МНОЖЕСТВЕННАЯ НЕОПЛАЗИЯ ЭНДОКРИННОЙ СИСТЕМЫ IIa	10	1987

БОЛЕЗНИ, перечисленные в этой таблице, — лишь часть списка генетических заболеваний, для которых при помощи анализа сцепления определена хромосомная локализация дефектного гена. Здесь указано в какой хромосоме содержится ген и сцепленный с ним маркер и когда были впервые опубликованы данные о сцеплении. Тесное сцепление делает маркер удобным для диагностики заболевания у членов пораженных семей. Очень тесное сцепление открывает путь к идентификации и клонированию гена, вызывающего заболевание.

частоты рекомбинации в несколько раз выше у женщин. В хромосоме 11 для одного участка ситуация обратная, а в соседней с ним области частоты рекомбинации у обоих полов сходны. Молекулярная основа этих интригующих различий загадочна; что касается практического их значения, то мы составили для всех хромосом по две карты — по одной для каждого пола, — на которых один и тот же порядок расположения маркеров, но различные генетические расстояния.

МЫ ЗАВЕРШИЛИ предварительное картирование большинства хромосом человека. Другая группа исследователей недавно опубликовала сходную подборку предварительных карт, но основанную на данных о меньшем числе семей. Отметим, что составление карт сцепления изначально имеет характер совместного предприятия: все исследователи ищут ориентиры на одной и той же «территории». Маркеры, обнаруженные и изученные в одной лаборатории, часто дополняют маркеры, найденные в другой лаборатории, в некоторых случаях заполняя бреши между группами сцепления.

Основа для кооперации была заложена Ж. Доссе в Центре по изучению полиморфизма человека в Париже. Эта организация взяла на себя сбор, хранение и распространение ДНК 40 семей. Коллекция в основном составлена из образцов ДНК тех семей, которые мы изучали в шт. Юта, но включает также ДНК семей, исследованных другими учеными. Лаборатории всего мира (в том числе наша группа) получают полные наборы ДНК из этой коллекции. В свою очередь исследователи сообщают в центр о найденных маркерах и картинах наследования, так что полученные данные доступны всем, что закладывает фундамент для составления единой генетической карты.

В ближайшие несколько лет, видимо, будет завершено создание карты высокого разрешения, что означает превращение генома человека из тегга incognita в размежеванное поле. Можно ожидать, что такая карта позволит установить точную локализацию большинства охарактеризованных генетических болезней. Полная карта сцепления послужит, кроме того, бесценным лоцманом в другом крупномасштабном исследовании генома, которое пока еще только планируется: определении полной нуклеотидной последовательности ДНК человека. Наверное, сначала будут секвенированы маленькие «островки», а затем маркеры сцепления в этих островках помогут найти их место в геноме.

Книги издательства „Мир“

Снэйт В.
Алгебраический кобордизм и К-теория

1983. 1 р. 70.

Хейер Х.
Вероятностные меры на локально компактных группах

1981. 4 р. 20 к.

Хелгасон С.
Преобразование Радона

1983. 1 р. 10 к.

Шмидт В.
Диофантовы приближения

1983. 1 р. 80 к.

Идзуми И., Таи А.
Сtereo-дифференцирующие реакции. Природа асимметрических реакций

1979. 3 р. 60 к.



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

121019 Москва,
просп. Калинина, 26, п/я 42, магазин № 200 «Московский Дом книги»
103050 Москва,
ул. Петровка, 15, магазин № 8 «Техническая книга»
117334 Москва,
Ленинский проспект, 40, магазин № 115 «Дом научно-технической книги»
191040 Ленинград,
Пушкинская ул., 2, магазин № 5 «Техническая книга»
Книга будет выслана наложенным платежом (без залатка)



Дефект вселенского зеркала

По современным представлениям, Вселенная была бы лишена вещества и не могла бы существовать без небольшого нарушения симметрии при отражении в «зеркале», называемом CP-инвариантностью.

Какие силы в природе вызывают это искажение?

РОБЕРТ К. АДЭР

ПОЧЕМУ во Вселенной есть вещество? Наблюдения говорят, что между веществом и антивеществом имеется приближенная симметрия. Если бы эта симметрия оказалась точной, то Вселенная выглядела бы просто и элегантно. Однако она была бы пустой: в ней не нашлось бы места для вещества и живых существ, поэтому некому было бы созерцать эту элегантность. Согласно современным представлениям, существование Вселенной обеспечивается некоторыми искажениями симметрии при отражении во «вселенском зеркале», которое мы назовем *CP*-зеркалом. *CP*-симметрия означает, что явления в природе остаются теми же, если заменить вещество на антивещество (операция *C*; от англ. charge — заряд) и рассмотреть эти явления в обычном зеркале (операция *P*; от англ. parity — четность).

Вселенная родилась в огненной вспышке, в процессе так называемого Большого взрыва. По-видимому, до одной миллионной доли секунды после этого события вещества и антивещества было поровну. Во Вселенной имелось примерно равное число частиц и античастиц, которые находились в термодинамическом равновесии при огромных давлении и температуре. (Напомним, что у каждой частицы имеется античастица с той же массой, но противоположными электрическими свойствами: например, у электрона есть античастица — позитрон.) Затем по мере расширения и охлаждения Вселенной большинство частиц встретилось со своими античастицами и произошла их аннигиляция — взаимное уничтожение. Если бы *CP*-симметрия была точной, то в результате осталось бы совсем немного частиц и античастиц, которые избежали аннигиляции. Поскольку симметрия была слегка нарушена, возник избыток электронов и протонов по сравнению с их античастицами (примерно по одной частице на каждый миллиард), чтобы, когда «пробил час», образовывать галактики, звез-

ды, планеты и нас с вами.

Нарушение *CP*-симметрии впервые было открыто почти четверть века назад, но с тех пор мы узнали о нем ненамного больше, несмотря на интенсивные теоретические и экспериментальные исследования и важность самого явления для разрешения загадок нашего бытия. Однако в последние годы появились новые теоретические идеи, которые стимулировали последующие эксперименты. Ожидается, что они прольют свет на природу дефекта *CP*-зеркала. Один из них выполнен моими коллегами и мной в Брукхейвенской национальной лаборатории. Эти эксперименты были задуманы для изучения природы сил, ответственных за нарушение *CP*-симметрии. Они должны ответить на вопрос, вызывается ли асимметрия двумя актами слабого взаимодействия (миллислабые силы) или одним актом сверхслабого взаимодействия (суперслабые силы) между элементарными частицами.

ВООБЩЕ симметрия играет важную роль во Вселенной. Только при понимании этой роли можно в должной мере оценить значение небольшого нарушения симметрии при отражении в *CP*-зеркале. В настоящее время большинство физиков полагают, что есть «великое» уравнение, которое должно определять свойства элементарных частиц и их взаимодействий и отражать фундаментальные симметрии Вселенной. И хотя мы не знаем пока детальной структуры этого уравнения, известны и могут быть без труда поняты многие его важные симметрии.

В начале нашего столетия Эмми Нётер из Геттингенского университета показала, что симметрии этого фундаментального уравнения обычно связаны с законами сохранения. Так, из наблюдения, что импульс, энергия и угловой момент сохраняются, следует, что великое уравнение не позволяет выделить какие-то точки и на-

правления в пространстве или какие-нибудь моменты времени. Естественно возникает вопрос, а не существуют ли еще какие-то другие симметрии. В частности, позволяет ли это уравнение установить различия между «правым» и «левым», т. е. между предметом и его зеркальным отображением? Отличает ли уравнение частицы от античастицы?

Ответы на эти вопросы могут быть получены экспериментальным путем. Я проиллюстрирую метод исследования фундаментальных симметрий с помощью отважной Алисы, героини сказки Льюиса Кэрролла (настоящее имя Чарлз Латуидж Доджсон). И начнем мы с изучения симметрии относительно отражения в обычном зеркале, которое можно назвать *P*-зеркалом. Может ли Алиса, пробудившись от сна в сказке Кэрролла, сказать, где она находится: у себя дома или в Зазеркалье? Ей это удастся сделать, если она обнаружит какой-нибудь фундаментальный процесс или объект, который «предпочитает» одно направление винта другому. Так, винт с правой резьбой дома будет винтом с левой резьбой в Зазеркалье.

До 1956 г. физики должны были отвечать, что Алиса не сумеет отличить реальный мир от Зазеркалья. Дело в том, что тогда полагали, будто ни одно из фундаментальных взаимодействий — ни гравитация, ни электромагнетизм, ни сильные взаимодействия (ответственные за ядерные силы), ни слабые взаимодействия (приводящие к распадам некоторых частиц) — «не отдает предпочтения» одному винту перед другим. Иными словами, все верили в симметрию *P*-зеркала, т. е. в то, что результат какой-то реакции с элементарными частицами и результат ее зеркального отображения неразличимы.

ЗАТЕМ Р. Далитц, работающий в Корнеллском университете, показал, что свойства распада *K*-мезона, обусловленного слабым взаимо-

действием, как будто не согласуются с точкой зрения, что природа не различает «правого» и «левого». В попытках понять это Т. Ли и Ч. Янг в 1956 г. доказали, что не возникнет никаких противоречий, если предположить, что слабые взаимодействия могут «определить» направление резьбы на винте. В сущности, теория Ли и Янга, за которую они были удостоены в 1957 г. Нобелевской премии, показала, что P -зеркало при отражении процессов слабого взаимодействия может вносить искажения. В декабре 1956 г. Ц. Ву из Колумбийского университета, Э. Эмблер из Национального бюро стандартов США и их коллеги выполнили эксперимент, предложенный Ли и Янгом. Этот эксперимент убедительно продемонстрировал, что слабые взаимодействия действительно определяют направление винта и что природа различает «правое» и «левое».

Соответственно, проделав эксперимент в духе Ву и Эмблера, Алиса

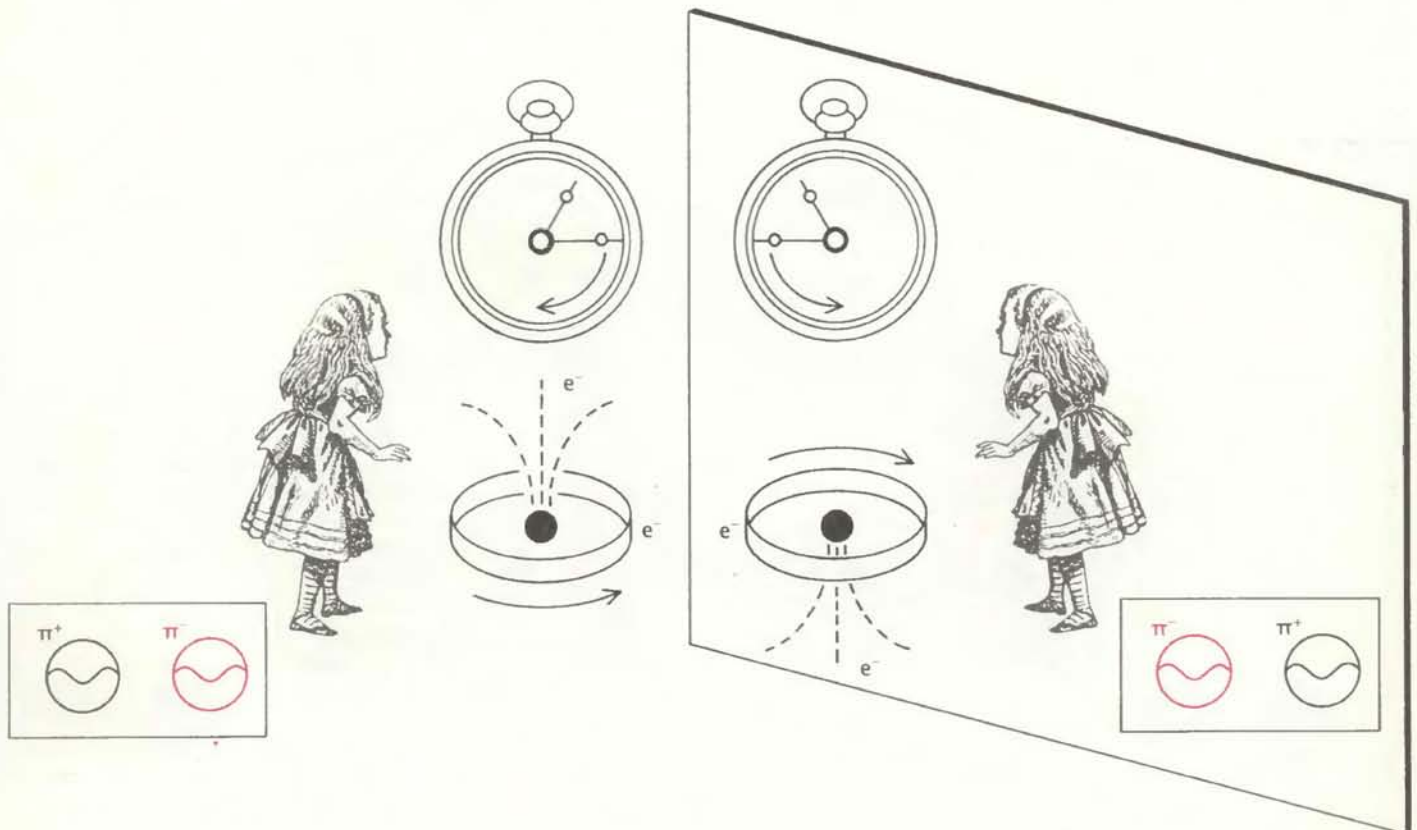
сможет отличить свой мир от Зазеркалья. Она берет цилиндр из кобальта-60 (этот изотоп вследствие слабого взаимодействия распадается с испусканием электронов) и помещает в магнитное поле, которое создается электронами, вращающимися против часовой стрелки по проволочному кольцу (см. левую половину рисунка внизу). Из элементарных законов физики следует, что в этом случае магнитное поле направлено вниз. Далее, ядра всех атомов вращаются и поэтому обладают неким угловым моментом — спином; они подобны небольшим магнетикам. В магнитном поле спины всех ядер кобальта ориентируются в одном направлении вдоль поля.

В своей домашней лаборатории Алиса находит, что испускаемые кобальтом электроны летят вверх, в направлении, противоположном спинам ядер. В Зазеркалье Алиса (см. правую половину рисунка внизу) выполняет тот же эксперимент. Там

электроны в кольце движутся по часовой стрелке, поэтому магнитное поле направлено вверх. Соответственно спины ядер также ориентированы вверх, а испущенные электроны должны лететь вниз. Это означает, что реальный и «зазеркальный» миры не являются точными отображениями друг друга. Симметрия P -зеркала нарушается слабыми взаимодействиями.

ЕСЛИ БЫ Чарлз Доджсон родился столетием позже, он мог бы придумать другое зеркало и новые приключения Алисы. Возможно, она прошла бы сквозь C -зеркало, превращающее частицы в античастицы.

В конце 20-х годов английский физик П. Дирак, первым предсказавший существование античастиц, показал, что при электромагнитных взаимодействиях вещество и антивещество ведут себя одинаково. Позже было обнаружено, что гравитация и ядерные силы также одинаково действуют на вещество и антивещество. Если



СЦЕНАРИЙ С ПРИКЛЮЧЕНИЯМИ АЛИСЫ позволяет понять действие законов симметрии в природе. Здесь показана проверка симметрии при отражении в обычном зеркале, которое можно назвать P -зеркалом (от англ. parity — четность). Может ли Алиса определить, где она находится: в своем обычном мире (слева) или в Зазеркалье (справа)? Для этого она берет цилиндр из кобальта-60 (который распадается, испуская электроны) и помещает его в магнитное поле. Поле порождается электронами, текущими по проволочному кольцу против часовой стрелки. Магнитное поле направлено вниз, и в этом же направлении оно ориентирует спины (угловые моменты) ядер кобальта. Испущенные электроны вылетают вверх. В «зазеркальном» мире

электроны вращаются в проволочном кольце по часовой стрелке, поэтому магнитное поле направлено вверх. Спины «зазеркальных» ядер направлены также вверх и потому электроны испускаются вниз. Поскольку испущенные электроны в обоих случаях летят в разные стороны, зеркальная симметрия не является точной: симметрия P -зеркала нарушена. P -зеркало сохраняет индивидуальность частиц и античастиц (см. вставки на рисунках). Античастица (в данном случае отрицательно заряженный π^- -мезон) имеет ту же массу, что и соответствующая частица (положительно заряженный π^+ -мезон), но противоположный электрический заряд.

бы эта симметрия была присуща всем взаимодействиям, Алиса не смогла бы выполнить такие наблюдения, которые подсказали бы ей, что она прошла сквозь C -зеркало.

Экспериментальные и теоретические исследования, связанные с открытием нарушения P -симметрии, показали также, что слабые взаимодействия отличают вещество от антивещества. C -симметрия тоже оказалась нарушенной. В частности, ядра антикобальта испускают позитроны предпочтительно в направлении своих спинов.

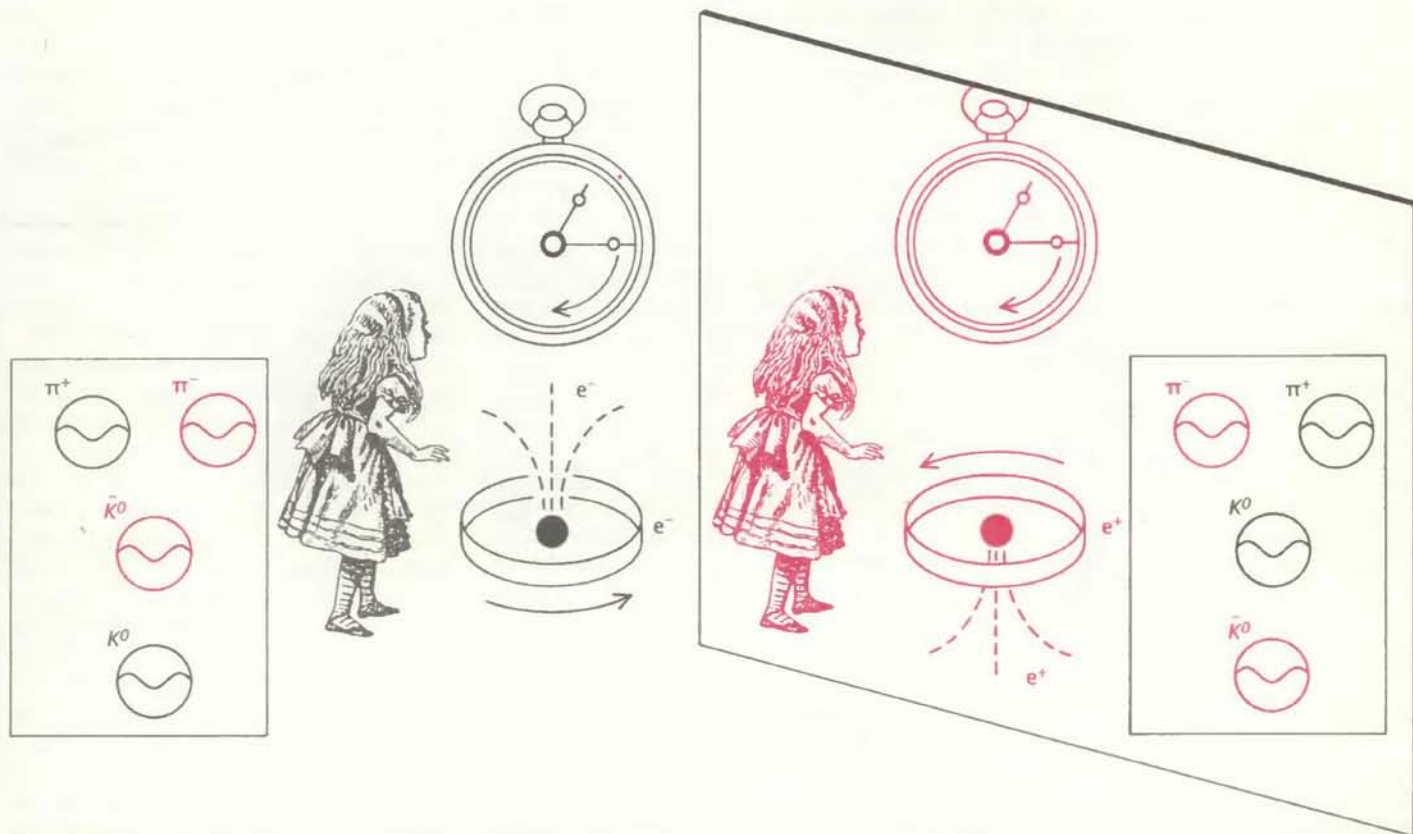
Алиса может обнаружить, прошла ли она сквозь C -зеркало, наблюдая либо за направлением вылета электронов из ядер кобальта, либо за направлением вылета позитронов из ядер антикобальта. И опять, в обычном мире, у Алисы дома, электроны вращаются по проволочному кольцу против часовой стрелки и порождают магнитное поле, направленное вниз; ядра кобальта ориентируются так, что их спины направлены вниз, а ис-

пускаемые ими электроны летят вверх (см. левую половину рисунка внизу). В антимире, наблюдаемом в C -зеркале, позитроны в проволочном кольце движутся по часовой стрелке, но из-за смены знака заряда частиц магнитное поле будет направлено вверх. Магнитные свойства ядер антикобальта противоположны свойствам ядер кобальта; поэтому спины ядер антикобальта будут ориентированы вниз. В итоге испущенные позитроны вылетают в направлении ядерных спинов, т. е. вниз (см. правую половину рисунка внизу). Поскольку испущенные позитроны летят в противоположном электронам направлении, Алиса поймет, что сквозь C -зеркало она проникла в антимир.

ВЫШЕ я упоминал о том важном значении, которое придают физики открытию симметрий в природе. Можно представить, как многие из них были обескуражены нарушением симметрии в P -зеркале. Я вспоминаю

собственное ощущение, как все, что я знал раньше, перестало быть бесспорным. Твердая почва, на которой я стоял, стала вдруг зыбучим песком. После же сделанного наблюдения, что асимметрия P -зеркала всегда сопровождается компенсирующей асимметрией C -зеркала, и поэтому все остается симметричным относительно отражения в комбинированном CP -зеркале, и для меня, и для других физиков Вселенная вновь обрела утраченный был порядок. Иными словами, если Алиса пройдет сквозь CP -зеркало, то обнаружит те же результаты, как если бы осталась дома (см. рисунок на с. 19). В течение семи лет поддерживалась точка зрения, согласно которой фундаментальные силы абсолютно симметричны относительно операции CP .

Затем в 1964 г. Дж. Кронин и В. Фитч из Принстонского университета показали в экспериментах, проведенных в Брукхейвенской национальной лаборатории, что происходит небольшое нарушение CP -



C -ЗЕРКАЛО заменяет частицы на античастицы, и наоборот, но сохраняет относительные ориентации объектов, которые «отражает» (C означает операцию зарядового сопряжения). Вращающиеся против часовой стрелки электроны порождают магнитное поле, направленное вниз. Ядра кобальта испускают электроны вверх (слева). В антимире, видимом сквозь C -зеркало (справа), позитроны (античастицы электронов) также вращаются против часовой стрелки, поскольку C -зеркало изменяет только заряд частиц; магнитное поле направлено вверх. Магнитные

свойства ядер антикобальта противоположны свойствам обычных ядер, поэтому их ядерные спины направлены вниз, так что испускаемые позитроны вылетают также вниз. Таким образом, направление вылета позитронов в антимире противоположно направлению вылета электронов в обычном мире, т. е. симметрия C -зеркала нарушена. Вставки на рисунках показывают, что C -зеркало изменяет заряды π^+ - и π^- -мезонов и превращает K^0 -мезон в его античастицу — K^0 -мезон.

симметрии. Ниже мы обсудим их эксперимент, а пока рассмотрим близкий результат, который легче понять. Если Алиса ускоряет пучок положительно заряженных K^+ -мезонов до высоких энергий и направляет их на мишень из меди, то рождается пучок нейтральных K -мезонов. Алиса обнаружит, что на некотором расстоянии от мишени нейтральные K -мезоны распадаются, испуская позитроны несколько чаще, чем электроны. В CP -Зазеркалье Алиса ускоряет пучок отрицательно заряженных K^- -мезонов и направляет их на мишень из антимеди. Снова рождаются нейтральные K -мезоны, которые по-прежнему распадаются на позитроны чаще, чем на электроны. Поскольку в обоих случаях позитроны появляются чаще электронов, а распадаются те же нейтральные K -мезоны, CP -симметрия нарушается, и Алиса может определить, осталась ли она в обычном мире или прошла сквозь оба зеркала — P и C .

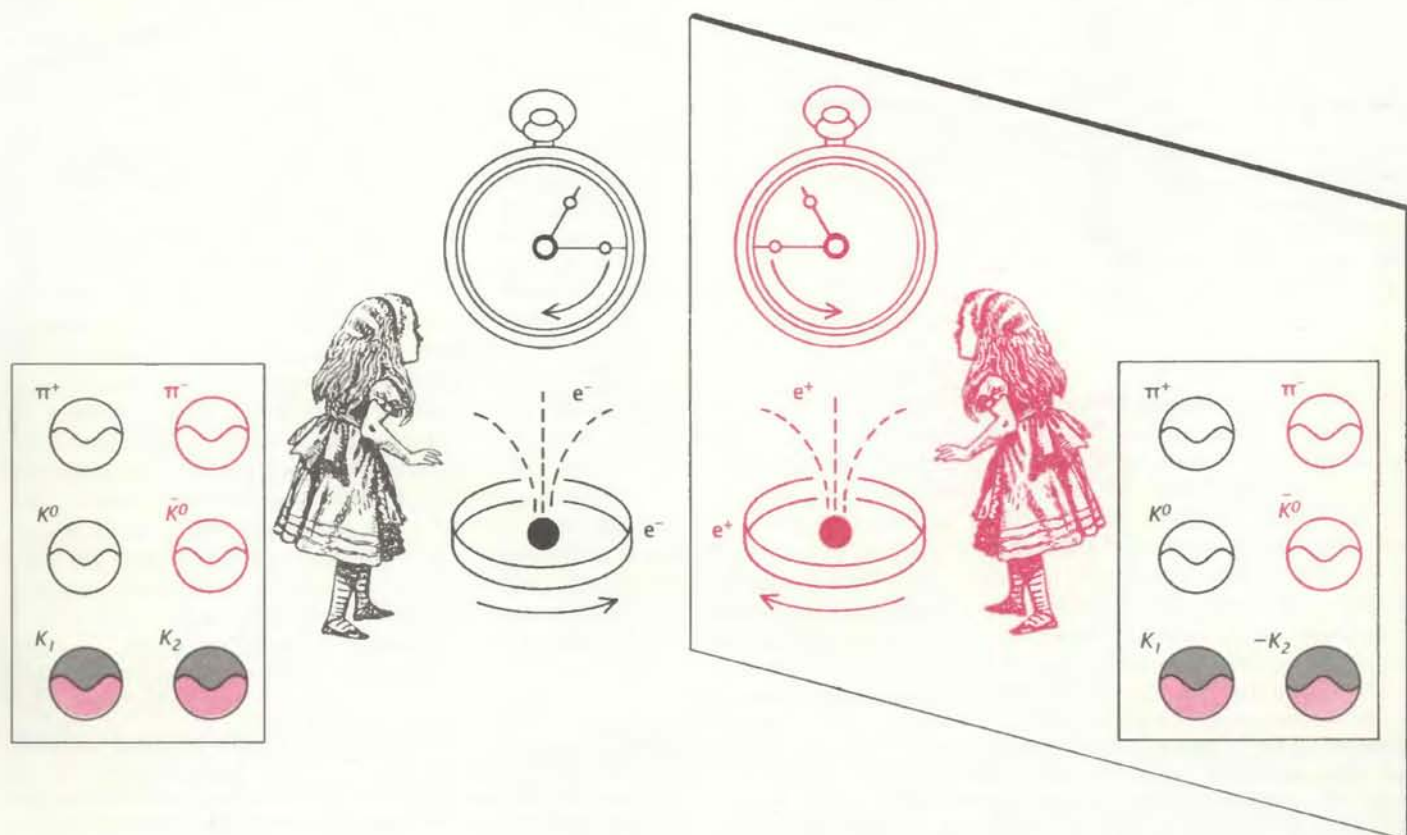
Чтобы сделать это, Алиса исполь-

зует тот факт, что заряженная частица, движущаяся в магнитном поле, отклоняется от своего пути. Алиса будет измерять отклонение позитронов и электронов, испускаемых нейтральными K -мезонами. Дома магнитное поле создается электронами, вращающимися против часовой стрелки и оно направлено вниз. В CP -Зазеркалье магнитное поле создается позитронами, вращающимися по часовой стрелке, следовательно, поле здесь тоже направлено вниз. Алиса обнаружит, что главные продукты распада (позитроны) отклоняются к ней, если она находится дома. В CP -Зазеркалье Алиса обнаружит, что основные продукты распада нейтральных K -мезонов отклоняются от нее (см. рисунок на с. 20). Наблюдая за отклонениями частиц, Алиса может определить, где именно она находится. Этот эксперимент показывает, что не все явления инвариантны относительно комбинации операций отражения в P -зеркале и замены частиц на античастицы, производи-

мой C -зеркалом. Он не только демонстрирует глубокое и фундаментальное различие между веществом и антивеществом, но и аннулирует вывод, следующий из CP -симметрии, что Вселенная не может содержать избытка вещества над антивеществом. Мы до сих пор точно не знаем, как действует механизм, приводящий к избытку вещества, из которого состоит окружающий нас мир и мы сами. Однако из эксперимента Алисы мы узнали, что наше существование не противоречит наблюдаемым на опыте симметриям.

Более полное понимание природы нарушения CP -симметрии требует более глубокого анализа особенностей частиц, в свойствах которых такая асимметрия проявляется. Почему нейтральные K -мезоны ведут себя указанным образом?

ДО СИХ ПОР ради простоты я говорил о нейтральных K -мезонах как об одном виде частиц. В действительности все гораздо сложнее. Так,



КОМБИНИРОВАННОЕ CP -ЗЕРКАЛО, как считали физики до 1964 г., не имеет дефектов. Предполагалось, что асимметрия P -зеркала всегда сопровождается асимметрией C -зеркала, так что симметрия CP -зеркала точна. Другими словами, если Алиса пройдет сквозь CP -зеркало, то результаты любых ее экспериментов будут такими же, как и в обычном мире. Здесь показан особый случай, когда действительно получается тот же результат: как электроны (слева), так и позитроны (справа) вылетают вверх. Вставки внизу демонстрируют изменения различных частиц при отражении в CP -зеркале, в том числе и нейтральных мезонов

K_1 и K_2 , каждый из которых содержит равные количества мезонов K^0 и \bar{K}^0 . (Смешивание частиц — одно из необычных явлений, предсказываемых квантовой механикой.) Каждой частице соответствует волновая функция, свойства которой во многом похожи на свойства волн на воде или световых волн. Волновая функция описывает свойства данной частицы. Волновая функция мезона K_1 симметрична при отражении в CP -зеркале, в то время как волновая функция мезона K_2 антисимметрична (на что указывает знак минус на вставке справа).

существует нейтральный K -мезон, обозначаемый K^0 , у которого есть античастица \bar{K}^0 (черточка над символом K -мезона обозначает античастицу).

Нейтральный K -мезон не обязан быть мезоном K^0 или \bar{K}^0 ; он может быть смесью их обоих. Идея такого смешивания кажется необычной, если представлять частицы как камни или мячики. Но смешивание выглядит менее странным, если трактовать K -мезоны в духе квантовой механики, т. е. представлять их в виде волн де Бройля наподобие световых волн или волн на поверхности воды. Смешивая две различные волны, можно создать новые волны, точно так же можно получить новые нейтральные K -мезоны, смешивая частицы K^0 и \bar{K}^0 .

Несмотря на то что могут быть различные смеси нейтральных K -мезонов, нам вполне достаточно рассмотреть только две из них. Мезон K_1

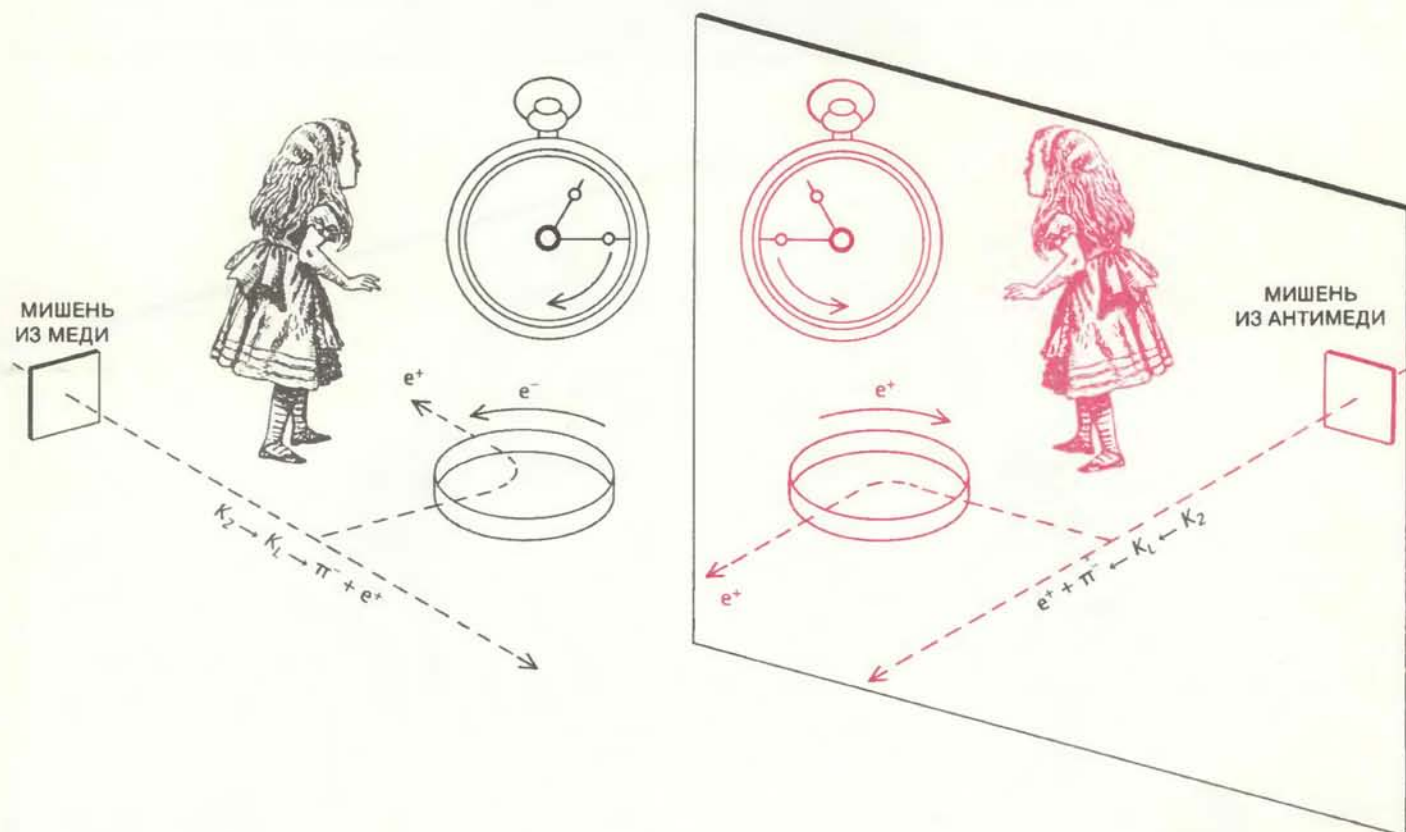
получают, складывая амплитуды волн (волновых функций), соответствующих K^0 и \bar{K}^0 мезонам, т. е. беря их равные количества. Вторым мезон K_2 получают, вычитая амплитуду K^0 из \bar{K}^0 . Грубо говоря, мезоны K_1 и K_2 являются наполовину частицами и наполовину античастицами.

Априори нет оснований считать мезоны K^0 и \bar{K}^0 «чистыми» частицами, а мезоны K_1 и K_2 — смешанными состояниями. С таким же успехом за основные состояния можно взять K_1 и K_2 , а K^0 и \bar{K}^0 рассматривать как смеси. Тогда K^0 -мезон можно представить в виде суммы K_1 и K_2 ($K^0 = K_1 + K_2$), а \bar{K}^0 — в виде их разности ($\bar{K}^0 = K_1 - K_2$).

Когда Алиса бомбардировала свою медную мишень положительно заряженными K^+ -мезонами, рождались нейтральные K^0 -мезоны. Когда же в CP -Зазеркалье она бомбардировала

мишень из антимида отрицательно заряженными K^- -мезонами, рождались нейтральные \bar{K}^0 -мезоны. Я показал, что каждый из этих первоначальных пучков K^0 и \bar{K}^0 -мезонов может рассматриваться как смесь равного количества мезонов K_1 и K_2 . В обоих пучках компонента K_1 довольно быстро распадается на пару частиц, называемых π -мезонами. После этого в пучках остается только компонента K_2 .

Часть пучка K_2 -мезонов, состоящая из K^0 -мезонов, распадается на позитроны, а равная ей часть, состоящая из \bar{K}^0 , — на электроны. Поскольку K_2 состоит из равных количеств K^0 и \bar{K}^0 , не возникает избытка позитронов над электронами. Наблюдения такого распада не позволяют Алисе определить, в каком из миров она находится. Однако нарушение CP -инвариантности создает дефект в зеркалах, в ре-



ДЕФЕКТ В CP -ЗЕРКАЛЕ, демонстрируемый в опытах Алисы. Она ускоряет пучок положительно заряженных K^+ -мезонов и направляет его на мишень из меди (слева). В результате рождается пучок нейтральных K^0 -мезонов. Компонента K_1 мезона K^0 быстро распадается на пары π -мезонов, оставляя только компоненту K_2 . После «путешествия» в течение некоторого времени K_2 превращается в частицу K_L путем присоединения к K_2 небольшого количества компоненты K_1 . Эта комбинация K_L более часто распадается на позитроны, чем на электроны. В CP -Зазеркалье Алиса направляет пучок ускоренных отрицательно заряженных K^- -мезонов на мишень из антимида (справа). В результате рождается пучок нейтральных \bar{K}^0 -мезонов. Снова компонента K_1 мезонов \bar{K}^0 быстро распадается на пары π -мезонов, оставляя только компоненту K_2 . Через некоторое время мезон K_2 превращается в мезон K_L , который в свою

очередь чаще распадается на позитроны, чем на электроны. В обоих случаях начальный пучок нейтральных частиц K_2 распадается на позитроны более часто, чем на электроны, следовательно, CP -симметрия нарушена. Алиса может определить, где она находится, если включит магнитное поле, которое отклонит заряженные частицы, пролетающие сквозь него, под прямым углом. В реальном мире это поле снова создается электронами, вращающимися против часовой стрелки, т. е. оно по-прежнему направлено вниз. В CP -Зазеркалье позитроны вращаются по часовой стрелке, поэтому создаваемое ими магнитное поле будет направлено также вниз. Алиса обнаружит, что в обычном мире при распаде мезона K_2 позитроны отклоняются к ней, а в CP -Зазеркалье они отклоняются от нее. Таким образом, наблюдается нарушение симметрии CP -зеркала.

зультате чего к компоненте K_2 «подмешивается» очень небольшая часть K_1 , образуя комбинацию, называемую K_L . Мезон K_L содержит чуть больше мезонов K^0 , чем мезонов \bar{K}^0 , и потому чаще распадается на позитроны, чем на электроны. (Индекс L означает долгоживущий; от англ. long-lived.) Именно это проявление нарушения CP -симметрии использовала Алиса для определения своего местонахождения.

МОЖНО и другим способом пояснить, что добавка части K_1 к K_2 при формировании состояния K_L нарушает CP -инвариантность. Кронин и Фитч наблюдали в 1964 г. распад K_L на два π -мезона. Такой распад возможен из-за присутствия K_1 , так как K_2 фактически никогда не распадается на два π -мезона.

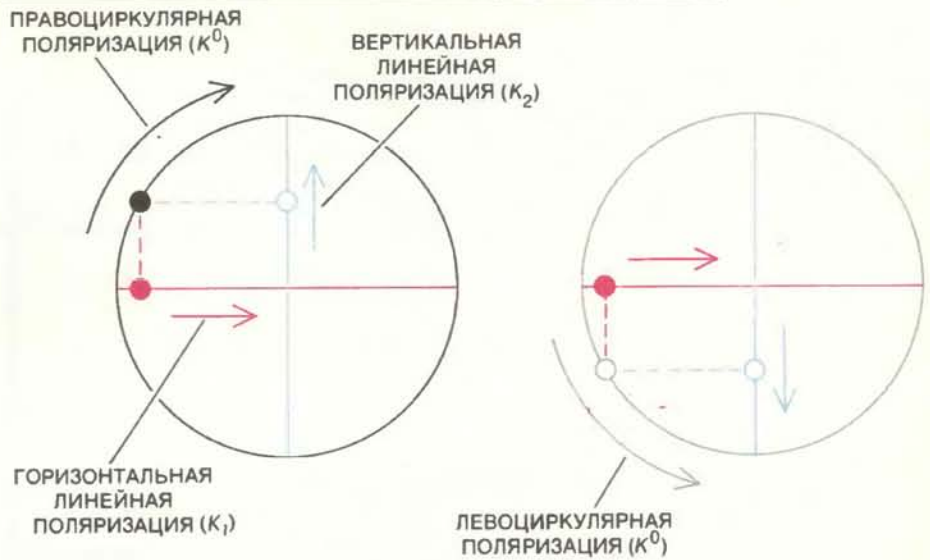
Различие в способах распада мезонов K_1 и K_2 основано на свойствах этих частиц при отражении в CP -зеркале. В случае идеального CP -зеркала амплитуда волны K_1 не изменяется, а амплитуда волны K_2 меняет знак. Амплитуда волны, описывающей два π -мезона, также не меняется. Соответственно K_1 быстро распадается на пары мезонов π^+ и π^- и на пары нейтральных мезонов π^0 , а для K_2 такие распады запрещены. (K_2 может распадаться другими способами, но не так быстро.)

Как и Алиса, Кронин и Фитч начинали с пучка K^0 -мезонов (см. рисунок на с. 22). Снова компонента K_1 пучка быстро распадалась на пары π -мезонов, оставляя только компоненту K_2 . Если бы CP -зеркало было идеальным, то из-за «выживания» только компоненты K_2 не наблюдалось бы распадов на два π -мезона. Однако нарушение CP -симметрии приводит к небольшому увеличению амплитуды K_1 , и из-за этого примерно один из 500 долгоживущих мезонов K_L распадается на пару π -мезонов.

Нарушается ли CP -симметрия для систем, не содержащих K -мезонов? Хотя физики совершенно уверены в том, что дефекты CP -зеркала имеют всеобщий характер, величина таких эффектов настолько мала, что они не наблюдались в других исследованных системах. Возможно, что за нарушение CP -симметрии ответственны новые, очень слабые силы. Какова природа этих сил?

Я отмечал, что нарушение CP -симметрии в системе K -мезонов может быть описано на языке небольшой добавки состояния K_1 к состоянию K_2 . Другими словами, небольшая часть мезона K^0 , входящего в состав K_2 , превращается в мезон K^0 .

Известно, что мезоны состоят из



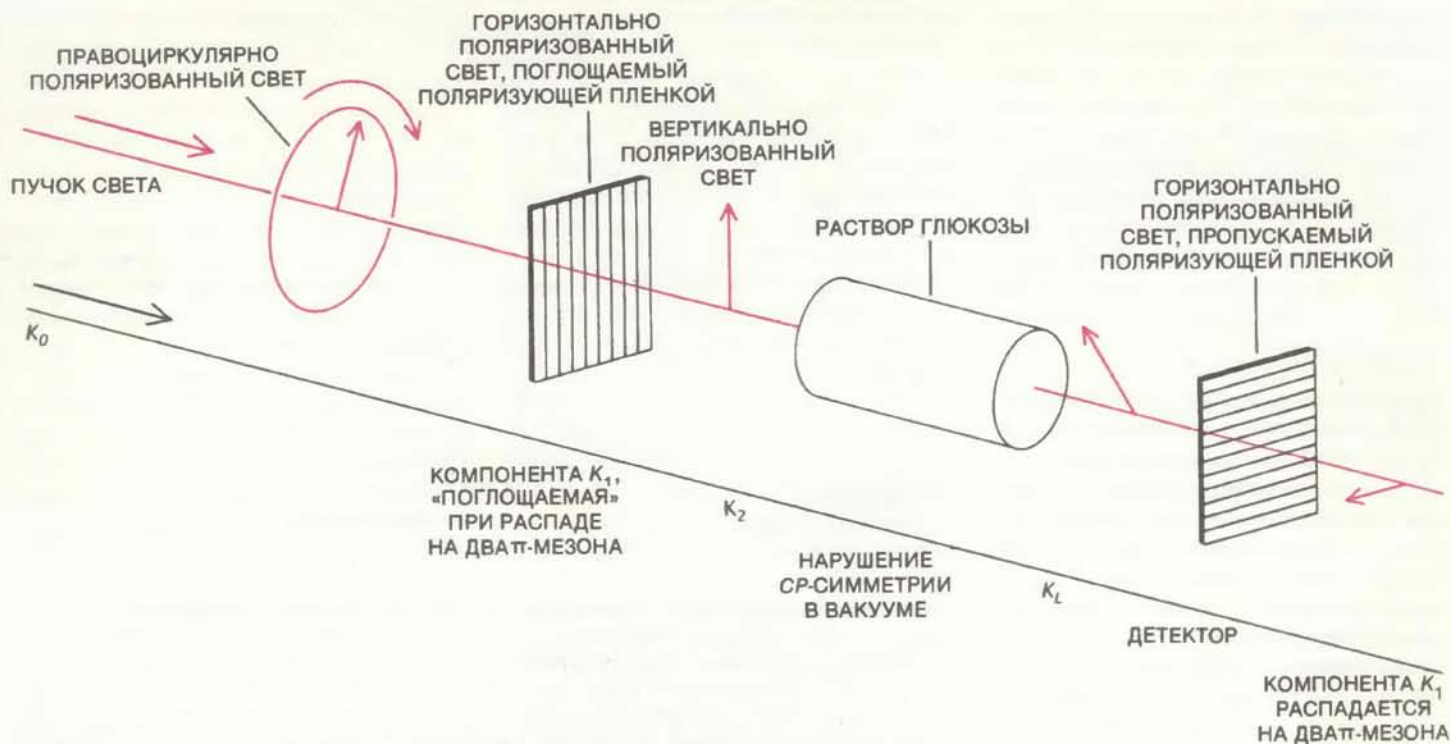
АНАЛОГИЯ между свойствами света и нейтральными K -мезонами может помочь понять явление «смешивания» частиц. Свет может быть поляризован различными способами. Предположим, что световой пучок направлен на нас из плоскости изображения. Если при этом осциллирующие электрические поля пучка направлены налево и направо, то пучок поляризован горизонтально. Будем считать, что такой линейной поляризации света соответствует K_1 -мезон. Если электрические поля пучка осциллируют вверх и вниз в плоскости изображения, то пучок поляризован вертикально; ему будет соответствовать K_2 -мезон. Если направление электрического поля светового пучка описывает окружность, то свет имеет циркулярную (круговую) поляризацию. Круговое движение электрического поля в этом случае подобно движению крыльев гайки типа «барашек», навинчиваемой на болт. Если электрическое поле вращается так же, как крылья гайки с правой резьбой, то свет имеет правоциркулярную поляризацию; такому пучку соответствует K^0 -мезон. Если электрическое поле света вращается подобно крыльям навинчиваемой на болт гайки с левой резьбой, то свет имеет левоциркулярную поляризацию; такому пучку соответствует \bar{K}^0 -мезон. Правоциркулярная поляризация является суммой горизонтальной и вертикальной линейных поляризаций (слева), а левоциркулярная поляризация — их разностью (справа). По развешиваемой аналогии амплитуда волновой функции K^0 -мезона представляет сумму амплитуд K_1 и K_2 (так что в определенном смысле $K^0 = K_1 + K_2$), в то время как амплитуда волновой функции \bar{K}^0 -мезона представляет их разность ($\bar{K}^0 = K_1 - K_2$).

частиц, называемых кварками, а точнее — из кварка и антикварка. Например, K -мезоны состоят из кварков d и s и соответствующих антикварков \bar{d} и \bar{s} . Нейтральный K^0 -мезон состоит из кварков d и s ; мезон \bar{K}^0 — из кварков d и s . Для превращения мезона \bar{K}^0 в мезон K^0 должно произойти два события: антикварк \bar{d} должен превратиться в антикварк \bar{s} , а кварк s — в кварк d . (Заметим, что кварки не превращаются в антикварки.) Такие превращения кварков вызываются, как известно, слабыми взаимодействиями, которые сохраняют CP -симметрию. Поэтому превращения в одном направлении (\bar{K}^0 в K^0) столь же вероятны, как и превращения в обратном направлении (K^0 в \bar{K}^0). В результате никаких превращений не происходит и CP -зеркало не вносит искажений.

ЕСЛИ существуют взаимодействия, не симметричные по отношению к отражению CP , то они могут привести к наблюдаемому наруше-

нию CP -инвариантности. Такие силы должны были бы чаще превращать кварк s в кварк d , чем d в s . Они должны были бы чаще превращать антикварк \bar{d} в антикварк \bar{s} , чем \bar{s} в \bar{d} . Поскольку \bar{K}^0 превращается в K^0 очень редко, такой переход можно интерпретировать как случайное совпадение двух независимых переходов, каждый из которых не так уж редок. Нарушение CP -инвариантности могло бы произойти при совпадении перехода с сохранением CP -симметрии, вызванного слабыми взаимодействиями, и перехода, индуцированного силами, которые не сохраняют CP -симметрию и примерно в 500 раз слабее. Подобные умеренно слабые взаимодействия называют миллислабыми (они примерно в 1000 раз слабее, чем слабые взаимодействия).

Ясно, что семейство K -мезонов представляет собой систему, наиболее приспособленную для особо чувствительных измерений нарушения CP -симметрии. Есть ли в природе



CP-СИММЕТРИЯ нарушается в системе нейтральных K -мезонов и другим способом, который не связан с предположением распада на позитроны (см. рисунок на с. 20). Нарушение вызвано переходом K_2 -мезона, волновая функция которого антисимметрична относительно отражения в *CP*-зеркале, в K_1 -мезон с симметричной волновой функцией. Такое нарушение аналогично взаимодействию света с раствором глюкозы. Аналогия начинается с сопоставления пучка K^0 -мезонов и светового пучка с правоциркулярной поляризацией. Компонента K_1 распадается, оставляя компоненту K_2 . Далее поляризирующая пленка задерживает горизонтально поляризованную компоненту света, пропуская только вертикально поляризованную. При движении

K_2 -мезонов происходит нарушение *CP*-симметрии, так что некоторые из них превращаются в K_1 -мезоны (получившаяся комбинация является мезоном K_L). Аналогично раствор глюкозы вращает плоскость поляризации света, так что небольшая часть его становится горизонтально поляризованной. В результате порождается K_1 -мезон, казалось бы, исчезнувший из пучка. Точно так же возникает горизонтально поляризованный свет, «задержанный» поляризирующей пленкой. «Вращение» в системе K -мезонов, когда *CP*-антисимметричные мезоны K_2 переходят в *CP*-симметричные мезоны K_1 , — пока единственный известный пример нарушения *CP*-симметрии.

другая подобная система? Последние исследования, выполненные в основном на электрон-позитронном ускорителе DESY в Гамбурге, привели к возрастанию интереса к нейтральным B -мезонам, которые имеют важные сходства с K -мезонами. Так, у них похожее строение: B -мезоны состоят из кварков d и \bar{b} или b и \bar{d} . «Прелестный» кварк b похож на «странный» кварк s , если не считать того, что он гораздо массивнее. Поэтому B -мезоны, будучи примерно в 10 раз тяжелее K -мезонов, в остальном очень на них похожи. Однако, по моему мнению, большая масса B -мезонов наряду с другими факторами вряд ли позволит в ближайшее время узнать слишком многое о нарушении *CP*-симметрии из экспериментов с B -мезонами.

Гипотеза о миллислабом взаимодействии привлекательна, но трудность заключается в том, что эти силы могут оказаться недостаточно слабыми. Почему наблюдение нарушения *CP*-симметрии ограничивается системой нейтральных K -мезонов? Можно было бы ожидать, что миллислабые взаимодействия проявят

свое существование где угодно. Но не связан ли дефект *CP*-зеркала с существованием гораздо более слабых сил? Может оказаться, что так оно и есть. Л. Вольфенштейн из Университета Карнеги—Меллона предположил, что вместо совпадения слабого и миллислабого переходов к нарушению *CP*-симметрии приводит чрезвычайно слабое взаимодействие, которое сразу вызывает оба акта превращения. В названии этого взаимодействия употреблен оксиморон «сверхслабое». Обнаружить где-либо сверхслабое взаимодействие, которое в миллиард раз слабее слабого взаимодействия, будет очень трудно.

МИЛЛИСЛАБОЕ и сверхслабое взаимодействия не описываются какой-нибудь одной теорией — скорее такие взаимодействия появляются в ряде теорий. В основном поиски нарушения *CP*-симметрии были ориентированы на эффекты миллислабого взаимодействия. К положительным результатам они не привели, но до недавнего времени конкретные отрицательные результаты эксперимен-

тов не позволяли исключить модели миллислабого взаимодействия. Дело в том, что такие модели не давали какого-нибудь общего предсказания. В настоящее время в теоретических исследованиях выявлены совершенно специфические особенности миллислабых взаимодействий. Эти исследования были выполнены Ф. Гилманом из Станфордского университета и М. Уайзом из Калифорнийского технологического института и затем развивались другими учеными. Согласно их теории, вследствие миллислабых взаимодействий K_2 -мезон не только частично превращается в K_1 -мезон, но и сам получает возможность непосредственно распасться на два π -мезона.

Прямой распад K_2 на пары π -мезонов должен отличаться от распада K_1 на пары π -мезонов, поэтому его можно зарегистрировать. Распад K_1 на заряженные π^+ и π^- -мезоны в два раза более вероятнее распада на нейтральные π^0 -мезоны. Для прямого распада K_2 это соотношение «переверачивается»: в два раза чаще он должен будет распасться на нейтральные π^0 -

мезоны. В отсутствие прямых распадов K_2 -мезона K_L распадается на два π -мезона только из-за наличия в его составе компоненты K_1 . Поэтому в его распадах будет соблюдаться то же соотношение, что и в распадах K_1 . Если к тому же имеются прямые распады компоненты K_2 , то это соотношение изменится. Хотя существуют различные теории нарушения CP -симметрии, почти все они ведут к существенной модификации указанного соотношения 2:1, характерного для распадов «чистого» K_1 -мезона. Величина отклонений от этого соотношения может достигать 30%.

Ранее выполненные эксперименты, по-видимому, исключают эффекты на уровне 30%. Однако в ряде теоретических моделей предсказываются гораздо меньшие отклонения. Недавно были проведены измерения двумя группами ученых. Первая работала в Брукхейвенской национальной лаборатории и состояла из физиков этой лаборатории и Йельского университета; ее возглавляли М. Шмидт, У. Морзе и я. Вторая группа работала в Национальной ускорительной лаборатории им. Э. Ферми. В нее входили физики Чикагского университета, Висконсинского университета и Ядерного исследовательского центра в Сакле (Франция). Эту группу возглавляли Кронин и Б. Винштейн. Из полученных результатов следует, что искомое отклонение не превышает 10%. Это исключает часть интересных моделей миллислабого взаимодействия. В модифицированном эксперименте в Национальной ускорительной лаборатории им. Ферми и в выполняемом сейчас эксперименте в ЦЕРНе (Европейской организации ядерных исследований в Женеве) ученые надеются добиться большей чувствительности. Действительно, группа из ЦЕРНа объявила предварительные результаты, которые свидетельствуют о 2%-ном отклонении от соотношения 2:1, характерного для «чистых» распадов K_1 -мезонов. Ошибки эксперимента достаточно малы, чтобы исключить нулевое отклонение. В следующем году эксперимент будет продолжен с целью уточнения источников погрешностей измерений.

Через несколько лет результаты этих экспериментов должны показать, вызывается ли нарушение CP -симметрии миллислабыми взаимодействиями или отклонения от «чистых» распадов K_1 -мезонов не превышают 1%, и потому действуют сверхслабые силы. Любой из этих результатов установит ограничения на вид «великого» уравнения и приблизит нас к пониманию окружающего мира.

Книги издательства „Мир“

Пич А.
Операторные идеалы

1982. 3 р. 80 к.

Касселс Дж.
Рациональные квадратичные формы

1982. 3 р. 40 к.

Айгнер М.
Комбинаторная теория

1982. 2 р. 60 к.

Клингберг В.
Лекции о замкнутых геодезических

1982. 3 р. 40 к.

Адамс Дж.
Бесконечнократные пространства петель

1982. 1 р. 40 к.

Милн Дж.
Этальные когомологии

1983. 3 р. 80 к.

Г. Грим.
Уширение спектральных линий в плазме

1978. 3 р. 70 к.



ГАМК-эргические нейроны

Нервные клетки посылают друг другу не только возбуждающие сигналы, но и тормозные. Тормозная активность, которая часто осуществляется с помощью γ -аминомасляной кислоты, участвует в формировании нейронных сетей, лежащих в основе всей нервной деятельности

ДЕЙВИД А. ГОТТЛИБ

АКТИВНОСТЬ нервной системы обычно представляют себе как ту или иную картину возбуждения. Сенсорные стимулы преобразуются в импульсы, которые передаются от одного нейрона (нервной клетки) к другому до тех пор, пока не вызовут в конце концов ответную реакцию. Но в нервной системе есть целый класс операций, которые являются вовсе не возбуждением, а торможением, и операции эти осуществляются особыми тормозными нейронами. Импульсация такого нейрона не возбуждает клетку-мишень, а приглушает или полностью подавляет ее собственную импульсацию. Это сдерживающее влияние тормозная нервная клетка оказывает, выделяя специфическое вещество — тормозный медиатор. Наиболее распространенным тормозным медиатором является аминокислота, носящая название γ -аминомасляная кислота (ГАМК). Нейроны, выделяющие ГАМК, называют ГАМК-эргическими.

Роль ГАМК как тормозного медиатора выявилась в итоге многочисленных экспериментов, начатых еще в 1950-х годах. В последние пять лет в этом направлении достигнуты большие успехи благодаря развитию методов молекулярной биологии. С помощью этих методов удалось многое узнать о ГАМК, о ферменте, обеспечивающем ее синтез, и о рецепторе, с которым она связывается. В то же время яснее становятся и функции тормозных нервных сетей. Такие комплексы нейронов действуют в нервной системе не только как тормоз, предотвращая неуправляемое распространение импульсации, но и помогают «настраивать» специфическую реактивность возбуждающих сетей, передающих и интерпретирующих информацию о внешнем мире. И чем больше становится известно о тормозных сетях, тем более они представляются равнозначными возбуждающим сетям, о которых преимущественно идет речь при рассмотрении активности нервной системы.

В ходе изучения нервной системы основное внимание вначале концентрировалось на возбуждающих путях. К 1940-м годам было известно довольно много о том, как возбуждающий импульс генерируется и передается от нейрона к нейрону. Возбуждающий сигнал распространяется по нейрону как небольшое электрическое возмущение. Внутреннее содержимое нервной клетки исходно, в состоянии покоя заряжено отрицательно по отношению к внешней среде; эта разность потенциалов (потенциал покоя) поддерживается с помощью насосов и каналов в клеточной мембране, которые избирательно распределяют электрически заряженные частицы (такие, как ионы натрия, калия и хлора), в результате чего их концентрация внутри и снаружи клетки различна. При прохождении электрического импульса — так называемого потенциала действия, — каналы открываются и закрываются, позволяя ионам перемещаться, и на короткое время внутреннее содержимое клетки становится положительно заряженным, а затем вновь восстанавливается исходное состояние.

ПОТЕНЦИАЛ действия распространяется от тела нервной клетки по длинному отростку, называемому аксоном. На конце аксона имеется похожая на луковицу структура — синаптическое окончание, образующее одну сторону синапса, т. е. контакта между нервными клетками. Достигнув синапса, потенциал действия вызывает быстрый выброс нейромедиатора из окончания в синаптическую щель (пространство между мембранами контактирующих нейронов). Молекулы медиатора путем диффузии пересекают синаптическую щель и связываются с молекулами рецептора на дендрите (коротком отростке, принимающем сигналы) второго нейрона. Взаимодействие медиатора и рецептора вызывает появление нового электрического сигнала в дендрите. Синапсы так хорошо приспособлены к выполнению своих функций, что весь этот сложный процесс протекает за тысячные доли секунды.

В 50-е годы, однако, стало ясно, что не все синапсы работают таким образом: во многих из них активность постсинаптического нейрона не увеличивается, а подавляется. Разумно было предположить, что тормозный эффект обусловлен специальными медиаторами. Вскоре появились данные, свидетельствующие о том, что таким медиатором служит ГАМК. В начале 1950-х годов Э. Робертс из Университета Вашингтона в Сент-Луисе, Дж. Авапара из Техасского университета и С. Аденфренд из Национального института сердца независимо друг от друга обнаружили, что ГАМК в высоких концентрациях содержится в ткани мозга млекопитающих. В других органах эта аминокислота не обнаруживалась, что указывало на ее особую роль в центральной нервной системе. Однако из-за сложности мозга млекопитающих было трудно установить эту роль.

К счастью, скоро была найдена хорошая модель у более простых организмов — ракообразных. У омаров и langustов мышечные волокна имеют три различных нервных входа. Возбуждающие импульсы приходят к мышечным волокнам по аксонам от центральных ганглиев (нервных узлов, расположенных вдоль средней линии тела); активация возбуждающих нейронов вызывает мышечное сокращение. Другие нейроны соединяют мышечные волокна с центральными ганглиями. По аксонам этих клеток, называемых рецепторами растяжения, в центральный ганглий передается информация о сокращении мышцы. И наконец, существуют тормозные аксоны, связанные и с мышечными волокнами, и с рецепторами растяжения. Импульсация нейронов, которым принадлежат эти аксоны, подавляет активность мышц и рецепторов растяжения.

Имеется несколько групп данных, свидетельствующих о том, что

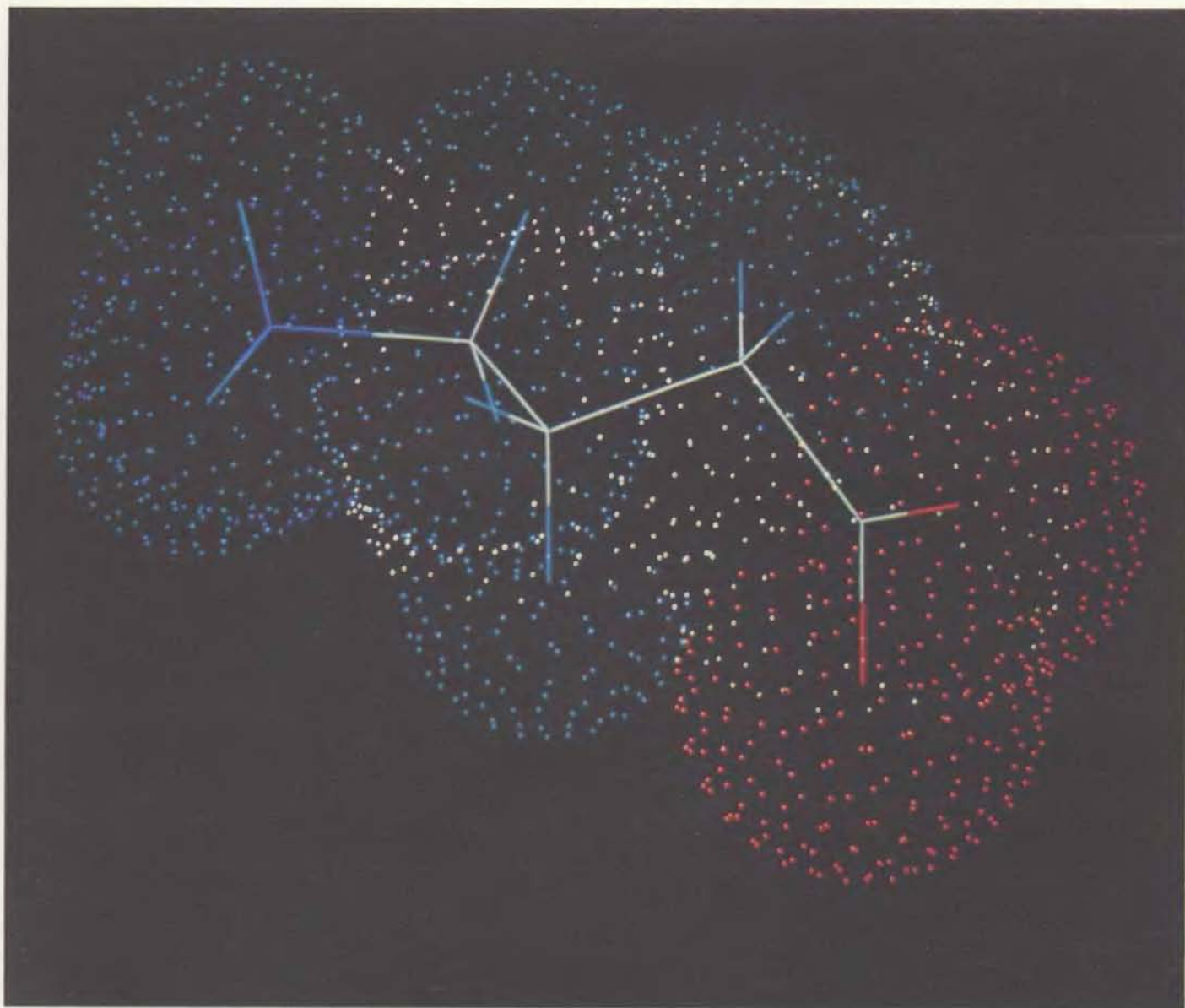
ГАМК — тормозный медиатор этой системы. Э. Флори из Университета Макгилла показал, что, если к препарату изолированного мышечного волокна и нейронов добавить ГАМК, подавляются разряды рецепторов растяжения; другие исследователи продемонстрировали тормозное действие ГАМК на мышечные волокна. Растительный алкалоид, называемый пикротоксином, который блокирует действие ГАМК, обратимо и специфически блокирует также и действие тормозных аксонов. Более того, и ГАМК, и синтезирующий ее фермент глутаматдекарбоксилаза (ГДК) обнаружены в тормозных, но не в возбуждающих аксонах. Распределение фермента было установлено сотрудниками Медицинской школы Гарвардского университета Дж. Дадлом, Д. Поттером и З. Холлом под руководством С. Каффлера и

Э. Крамта. Затем эти исследователи обнаружили, что в изолированном нервно-мышечном препарате ракообразных, помещенном в раствор солей, стимуляция тормозных, но не возбуждающих аксонов вызывала выделение ГАМК в среду. Вместе взятые, эти результаты доказывают, что ГАМК является тормозным медиатором у ракообразных. Аналогичные эксперименты были проделаны для установления природы медиатора в других синапсах, а в конце 1960-х годов исследования вновь сосредоточились на мозге млекопитающих.

МНОЖЕСТВО данных, охватывающих различные области мозга, подтверждает, что ГАМК — тормозный медиатор в центральной нервной системе всех млекопитающих, включая человека. ГАМК-эргические нейроны сравнительно хо-

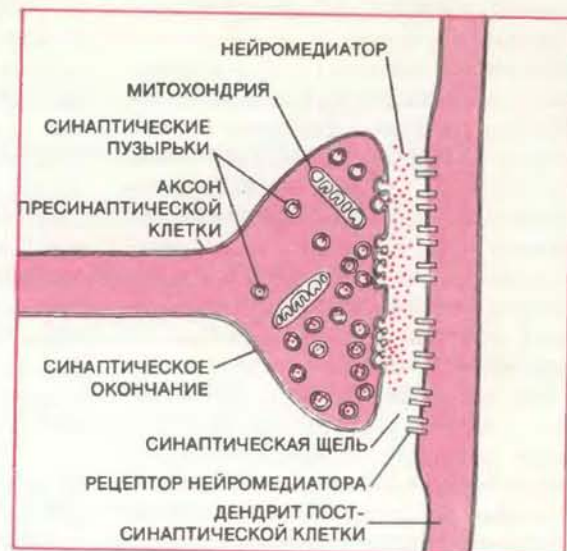
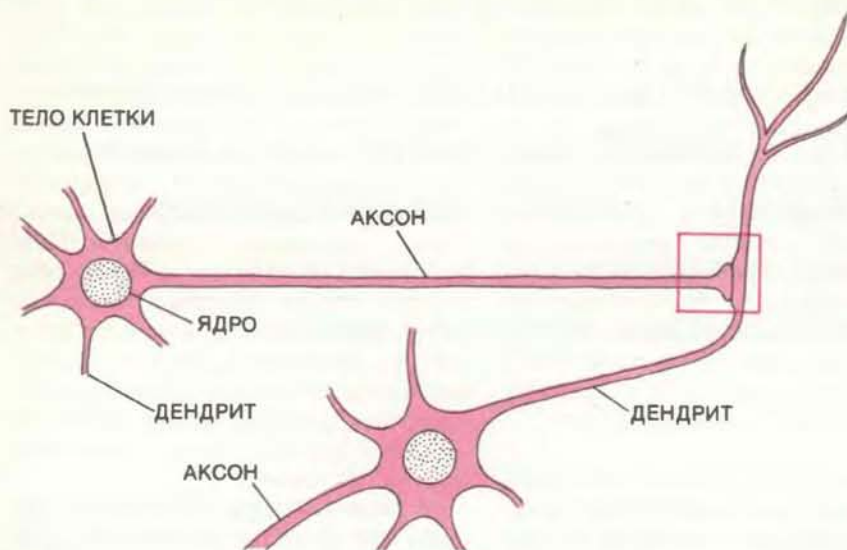
рошо изучены, в частности, в коре (внешнем слое) мозжечка. Эта структура отвечает за тонкую координацию мышечной активности, что осуществляется путем влияния на нейроны в различных мозговых центрах более высоких уровней. Из всех клеток мозжечка только у нейронов одного типа, называемых клетками Пуркинье, аксоны выходят за ее пределы: аксоны клеток Пуркинье заканчиваются в лежащих под корой структурах, называемых глубинными ядрами мозжечка. Благодаря такой организации кора мозжечка может влиять на другие структуры мозга только через клетки Пуркинье.

В начале 60-х годов М. Ито с коллегами из Токийского университета сделали удивительное наблюдение. Они обнаружили, что стимуляция клеток Пуркинье вызывает не увеличение, а уменьшение частоты импульсации в



ГАМК — γ -аминомасляная кислота служит тормозным нейромедиатором: когда один из контактирующих нейронов выделяет это вещество, импульсация другого подавляется. Изображение структуры молекулы получено с помощью компьютера Г. Маршаллом из Медицинской школы Универ-

ситета Вашингтона. Атомная поверхность обозначена облаками точек, межатомные связи — линиями: желто-белые — углерод, сине-зеленые — водород, фиолетово-синие — азот, красные — кислород.



НЕРВНЫЙ СИГНАЛ, или потенциал действия, представляющий собой изменение электрического потенциала на мембране нейрона, распространяется от тела клетки вдоль ее аксона (длинного отростка) и передается другому нейрону через структуру, называемую синапсом, при помощи специального химического вещества — нейромедиатора. На конце аксона имеется луковичеобразная структура —

синаптическое окончание, в котором сосредоточены пузырьки, содержащие нейромедиатор. Когда потенциал действия достигает синапса, нейромедиатор выделяется из окончания, диффундирует через синаптическую щель и связывается с мембраной дендрита (короткого отростка) постсинаптической клетки, что вызывает изменение ее мембранного потенциала, т. е. новый электрический сигнал.

глубинных ядрах мозжечка. Эти исследователи пришли к заключению о тормозном действии клеток Пуркинье. Поскольку эти клетки обеспечивают единственный путь из коры мозжечка к нижележащим ядрам, все ее влияния на остальной мозг осуществляются через торможение.

Вскоре удалось установить, что медиатором, передающим это торможение, является ГАМК. В данном случае была использована та же система доказательств, что и в работах на ракообразных. При воздействии ГАМК на клетки ядер мозжечка их импульсация прекращалась. Такие вещества, как пикротоксин и биккуллин (это вещество тоже блокирует действие ГАМК), подавляли активность синапсов, образуемых клетками Пуркинье. Клетки Пуркинье содержат в высоких концентрациях ГДК и ГАМК. Труднее всего было показать, что ГАМК высвобождается из клеток Пуркинье при их импульсации. Это сделали К. Обата и К. Такеда из Токийского медицинского университета. Они нашли способ определять выделение медиатора в четвертый желудочек — большую, заполненную жидкостью полость, над которой расположены ядра мозжечка, и продемонстрировали, что импульсация клеток Пуркинье действительно сопровождается высвобождением ГАМК.

появилось много работ, воссоздающих картину функционирования «типичного» ГАМК-эргического нейрона. ГАМК-эргические нейроны содержат в высокой концентрации фермент синтеза ГАМК—ГДК. Этот фермент обнаруживается в клетке везде, однако особенно много его в синаптическом окончании. В окончании сосредоточено множество пузырьков, и считается, что запасаемая ГАМК выделяется именно из этих пузырьков, хотя окончательных доказательств тому пока нет*. Во внешней мембране окончания имеются молекулярные насосы, помогающие очистить синаптическую щель от выделившейся ГАМК и, таким образом, подготовить синапс к следующему импульсу.

Для того чтобы вызвать эффект, должно произойти не только выделение ГАМК с пресинаптической стороны, но и связывание ее с рецепторами — специальными молекулами, встроенными в постсинаптическую мембрану. Существуют два типа рецепторов ГАМК, их обозначают ГАМК_A и ГАМК_B. Связывание ГАМК с любым из рецепторов вызывает изменение ионной проницаемости мембраны, но в случае рецепторов А увеличивается проницаемость для ионов хлора, а в случае рецепторов В — для ионов калия. Результат в обоих случаях одинаков: разность по-

тенциалов между внутренней и внешней поверхностями клетки возрастает и, таким образом, снижается вероятность импульсации клетки.

ГАМК-эргические нейроны широко распространены в центральной нервной системе. Почти каждый большой отдел головного и спинного мозга содержит некоторое их количество. Во многих областях доля этих клеток в общей сумме нейронов весьма значительна — от 20 до 40%. Примечательно, что в некоторых областях тормозные нейроны составляют большинство всех имеющихся нервных клеток.

По морфологическим признакам среди ГАМК-эргических нейронов различаются три группы. У нейронов типа I имеется множество отростков, однако в отличие от большинства нервных клеток эти отростки не разделяются отчетливо на дендриты и аксоны. Каждый такой отросток является и передатчиком, и приемником сигналов. Примером могут служить клетки-зерна обонятельной луковицы, которые составляют в этой структуре большинство.

У нейронов типов II и III, напротив, дендриты и аксоны четко разделяются. Все клетки типа II посылают сигналы другим нейронам в сером веществе мозга (которое состоит из тел нервных клеток, нервных волокон и поддерживающей ткани), при этом число клеток, с которыми они образуют контакт, может сильно варьировать. Так, корзинчатая клетка (нейрон типа II в мозжечке) обычно образует синапсы с шестью клетками Пур-

ПОСЛЕ ТОГО как было доказано, что ГАМК служит тормозным медиатором в мозге млекопитающих,

* См. статью: И. Дюнан, М. Израэль. Механизм высвобождения ацетилхолина. «В мире науки», № 6, 1985. — *Прим. ред.*

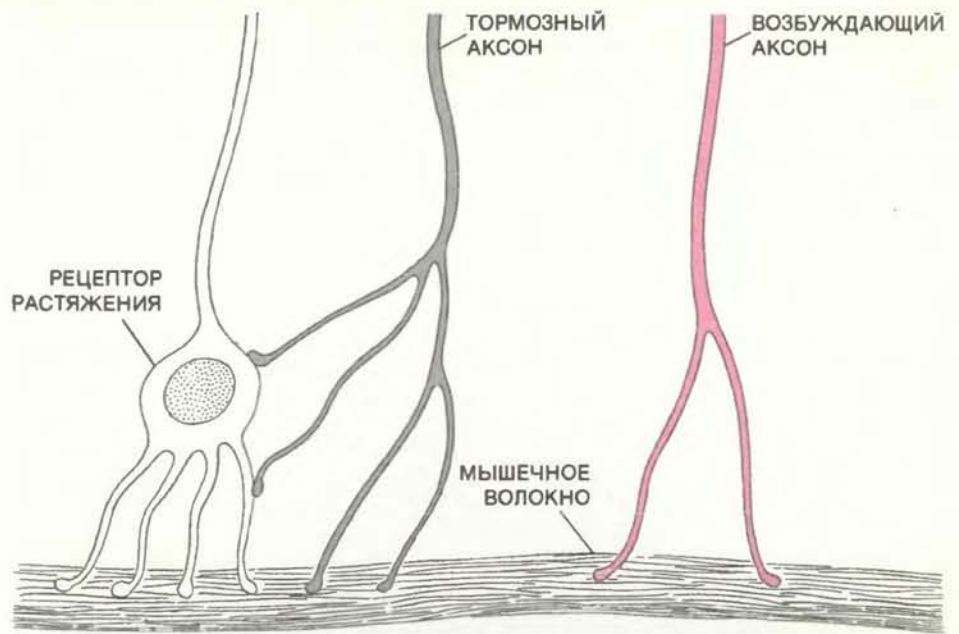
кинье, а соседняя с ней клетка Гольджи может быть связана с 10 тыс. клеток-мишеней. Нейроны типа III называются проекционными, или релейными нейронами, так как их аксоны выходят из серого вещества и входят в белое вещество (состоящее по большей части из пучков нервных волокон), осуществляя торможение нейронов в отдаленных структурах мозга.

ПОКА остается неясным, как морфология ГАМК-эргического нейрона связана с его функциями; эта проблема интенсивно исследуется. В то же время уже многое известно о том, как действуют ГАМК-эргические синапсы. Ряд важных сведений об этом был получен на стыке фармакологии и молекулярной биологии. Так случилось, что фармакологические данные появились раньше. В 60-е годы стали широко пользоваться бензодиазепинами. Этим химическим соединениям, наиболее популярный представитель которых носит наименование валиум (седуксен), приписывается способность снимать тревожное состояние, боль и мышечные спазмы, вызывать сон и облегчать эпилептические припадки.

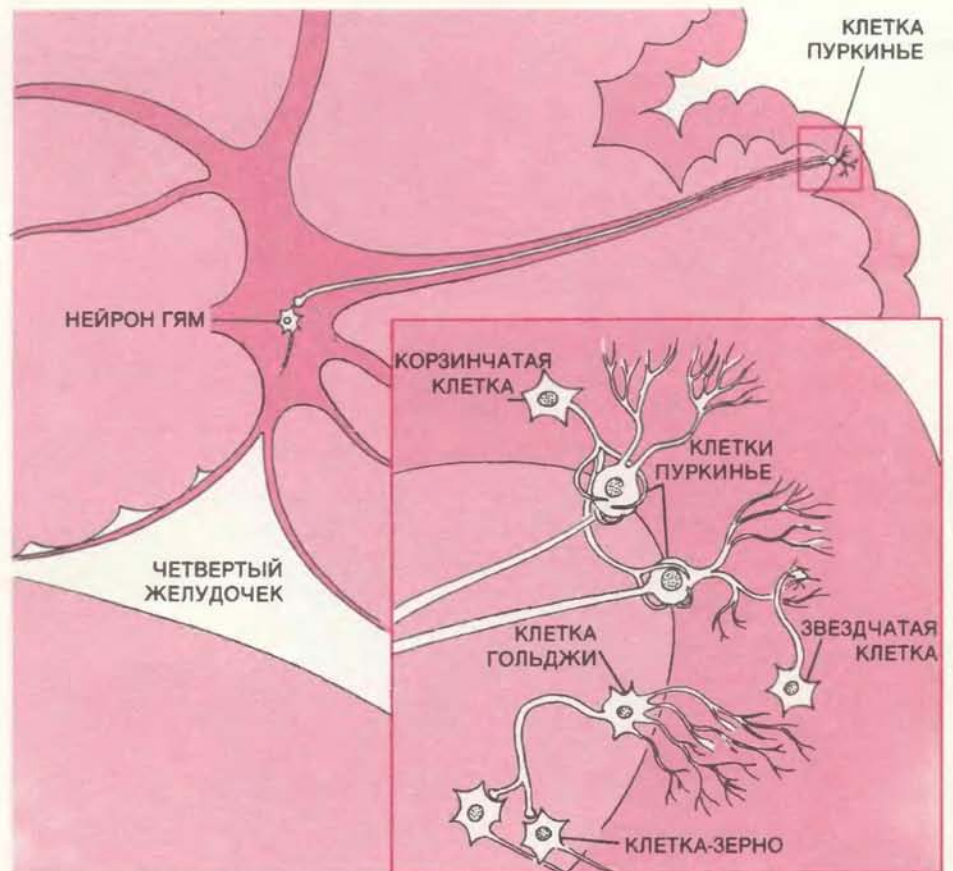
Э. Коста из Национального института психического здоровья обнаружил, что бензодиазепины вызывают столь различные эффекты путем усиления действия ГАМК. Затем Дж. Фишбах, Д. Чои и Д. Фарб из Медицинской школы Гарвардского университета, а также Дж. Баркер и Р. Макдональд из Национального института психического здоровья показали, что это усиление происходит на уровне рецепторов ГАМК. Как я отмечал выше, один тип рецепторов ГАМК контролирует проницаемость мембраны для ионов хлора. Как выяснилось, бензодиазепины снижают концентрацию ГАМК, необходимую для увеличения хлоридной проницаемости постсинаптической мембраны. Имеет значение, что эти вещества не влияют на мембранную проницаемость сами по себе — они могут лишь усилить действие нормального медиатора. Установлено, что бензодиазепины связываются с рецепторами ГАМК не в том месте, где связывается ГАМК, однако точный механизм их действия не понятен.

В 80-х годах изучение ГАМК-эргических нейронов расширилось благодаря молекулярной биологии. Но и в молекулярнобиологических исследованиях наиболее существенные данные были получены с помощью бензодиазепинов.

До недавних пор те, кто изучает центральную нервную систему, чувствовали себя в некоторой степени в стороне от драматических событий



ПРОСТАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ СИСТЕМА, состоящая из нервного и мышечного волокон ракообразного (такого, как лангуст или омар), позволила получить доказательство того, что ГАМК служит тормозным медиатором. Возбуждающий аксон, отходящий от одного из центральных ганглиев, вызывает сокращение мышечного волокна. Рецептор растяжения воспринимает степень сокращения мышцы и передает информацию о ней в центральный ганглий. Тормозный аксон подавляет мышечное сокращение и импульсацию рецептора растяжения. Вещества, блокирующие ГАМК, обратимо снимают тормозный эффект.



КОРА МОЗЖЕЧКА, которая отвечает за тонкую координацию работы мышц, влияет на другие структуры мозга посредством тормозных нейронов. Здесь схематически показан поперечный срез. Нервные волокна, выходящие из мозжечка, принадлежат нейронам, расположенным в структурах, называемых глубинными ядрами мозжечка (ГЯМ). Все аксоны, идущие из коры мозжечка в ГЯМ, принадлежат клеткам Пуркинью — тормозным нейронам, передающим свои сигналы при помощи ГАМК. Клетки Пуркинью составляют часть сложной нейронной сети, имеющей как возбуждающие, так и тормозные входы (в рамке).

в молекулярной биологии. Высочайшая сложность мозга млекопитающих лишила нейробиологов надежды использовать быстро развивающиеся методы молекулярной генетики. Однако за последние несколько лет стало возможным анализировать важные гены и белки мозга со всей мощью достижений молекулярной

биологии. В исследованиях глутаматдекарбоксилазы и рецепторов ГАМК это принесло замечательные результаты.

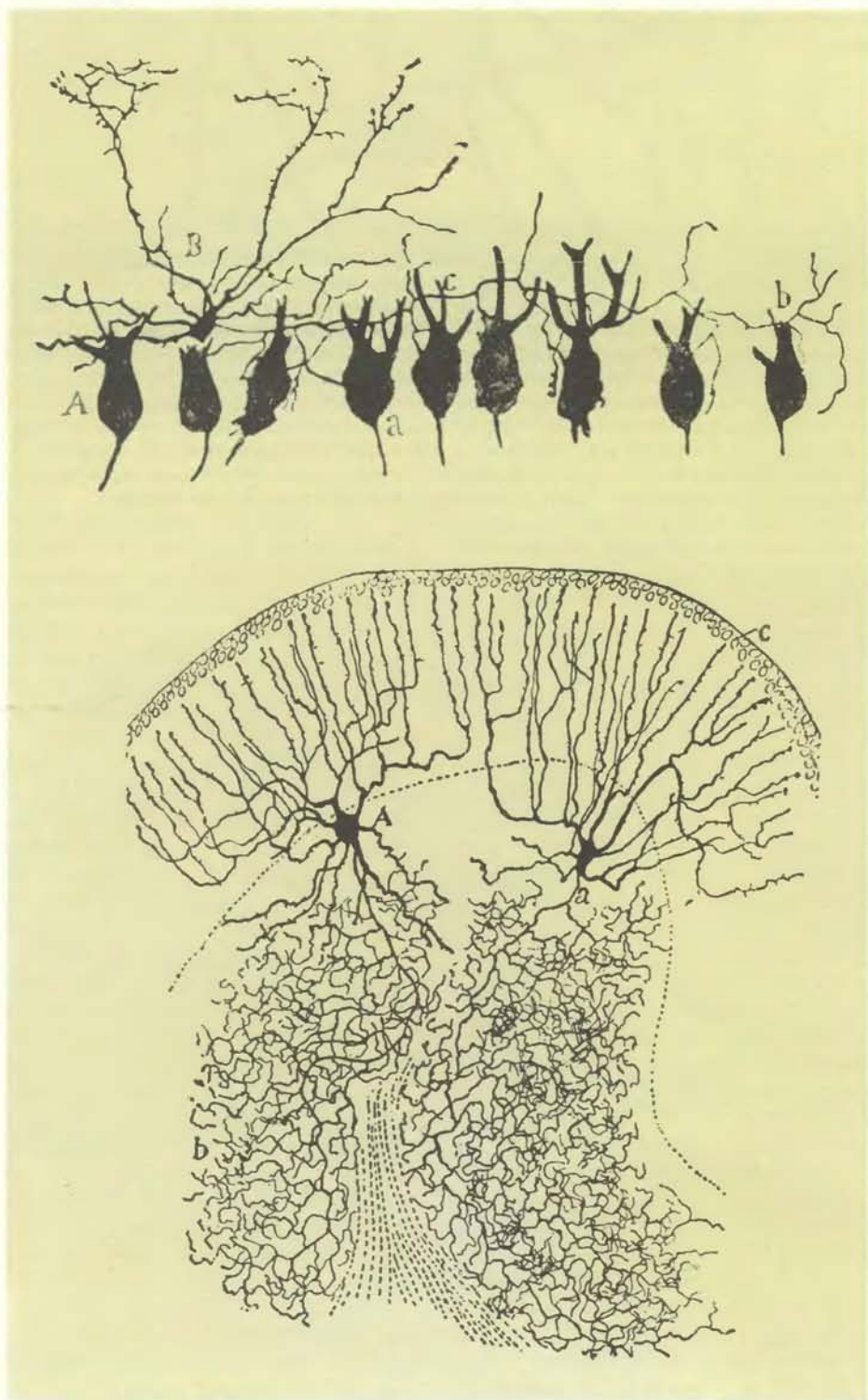
Новые методы позволяли получать результаты гораздо быстрее, чем старые методы классической химии белков. Применение прежних методов в случае ГДК и рецепторов ГАМК бы-

ло сопряжено с большими трудностями главным образом из-за того, что эти белки присутствуют в мозге в очень малых количествах и их очень непросто отделить от множества других содержащихся в мозге белков. В своих пионерных исследованиях структуры ГДК Ян-Ен Ву из медицинского центра «Сити-оф-Хоуп» и Э. Робертс для того чтобы получить фермент в количестве, достаточном для анализа, были вынуждены переработать мозг более 9 тыс. мышей. Неудивительно, что изучение ГДК шло очень медленно.

В арсенале средств молекулярной биологии одним из наиболее эффективных являются моноклональные антитела, которые специфично связываются только с определенным белком. Имея такой «инструмент», можно быстро выделить белок в чистом виде независимо от того, насколько сложно его окружение. Недавно моим коллегам Ен-Чун Чану, Дж. Швобу и мне удалось получить моноклональные антитела к ГДК. С помощью антител мы выделили чистый фермент в достаточном количестве, что дало нам возможность частично определить его аминокислотную последовательность и вести дальнейший молекулярный анализ.

Еще более детальные исследования ГДК были проведены при помощи другого метода новейшей молекулярной биологии — клонирования комплементарной ДНК (кДНК). Эта ДНК комплементарна (т. е. соответствует) матричной РНК (мРНК) для изучаемого белка, в данном случае ГДК. Поскольку в кДНК закодирована цепочка аминокислот, составляющих этот белок, анализ клона позволяет установить полную аминокислотную последовательность — наиболее ценную информацию о белке. Однако получить клон непросто.

Применительно к ГДК такая работа была проделана Д. Кауфманом и А. Тобином из Калифорнийского университета в Лос-Анджелесе. Вначале они получили «библиотеку» кДНК из мозга кошки. Библиотека включает последовательности ДНК, комплементарные ко всем молекулам матричной РНК, обнаруженным в анализируемом образце. Затем в библиотеке нашли ДНК, которая соответствует искомому ферменту. Для этого каждую из ДНК, составляющих библиотеку, по отдельности встроили в ДНК фага (фаги — это вирусы бактерий) и ввели эти фаговые частицы в бактерии. Оказавшись внутри бактерии, фаговая ДНК экспрессируется, т. е. синтезируются кодируемые ею белки. С помощью антител к ГДК были выявлены те бактериальные



ТОРМОЗНЫЕ НЕЙРОНЫ морфологически разнообразны, что иллюстрируют два рисунка, сделанных знаменитым нейробиологом XIX в. С. Рамон-и-Кахалем. Изображены клетки мозжечка. Вверху: корзинчатая клетка (B) и ряд клеток Пуркинье (A). Внизу: пара клеток Гольджи; запутанная масса под их телами — это аксоны, которые могут образовывать контакт с 10 тыс. других клеток.

клетки, которые синтезировали этот фермент и, следовательно, содержали искомую ДНК. Найдя нужный клон, Тобин с сотрудниками по последовательности кДНК установили полную аминокислотную последовательность ГДК.

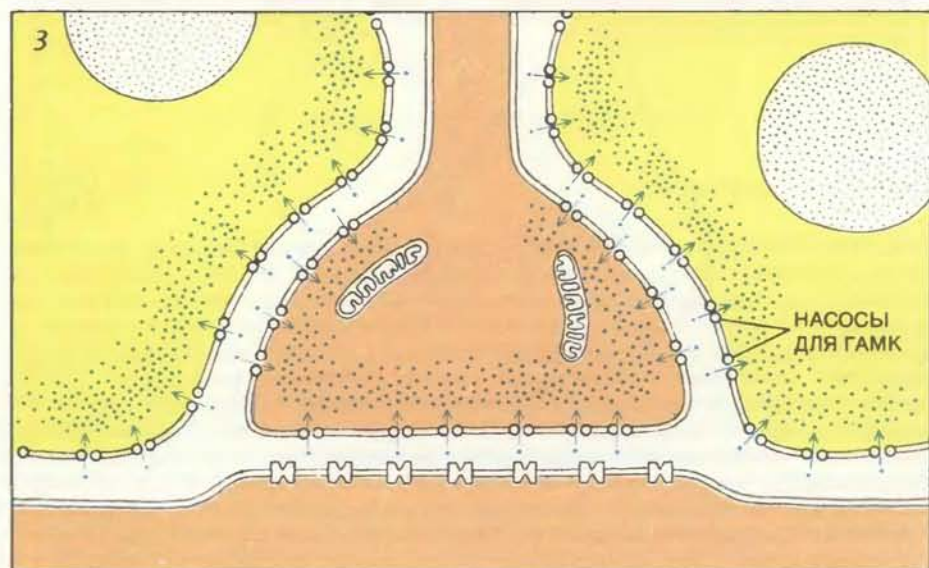
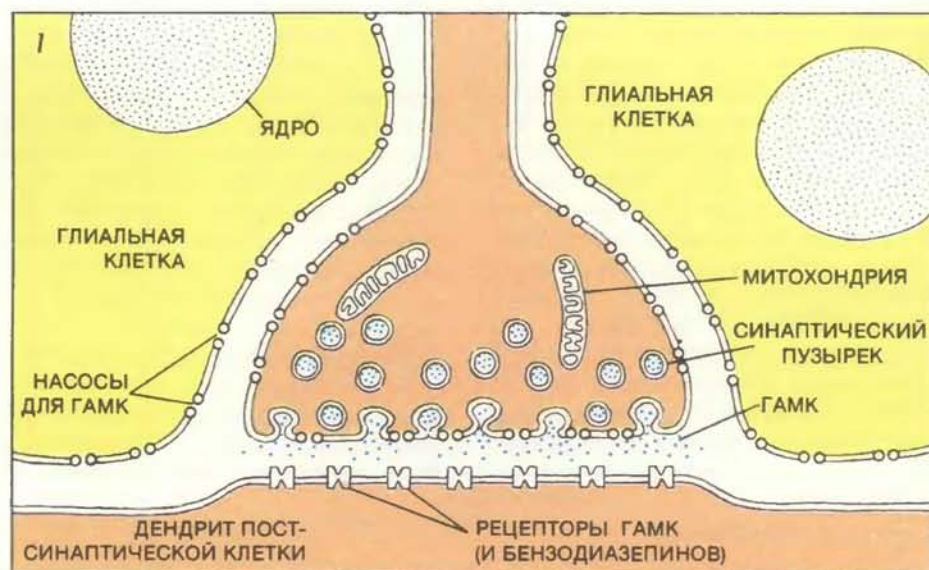
РЕЦЕПТОР ГАМК — еще более неуловимый белок, чем фермент, ее синтезирующий; он составляет только одну пятидесятитысячную часть всех белков мозга. И все же удалось выяснить в принципе его структуру. При этом также были использованы бензодиазепины.

Рецептор ГАМК представляет собой интегральный мембранный белок; его молекулы пронизывают внешнюю мембрану постсинаптического нейрона. Р. Олсен из Калифорнийского университета в Лос-Анджелесе первым показал, что с помощью детергентов можно отделить от мембраны интактный функционирующий рецептор ГАМК. Основываясь на работе Олсена, Э. Барнард из отделения молекулярной нейробиологии Совета медицинских исследований Великобритании и Г. Мёлер из фирмы Roche Company в Швейцарии получили рецептор ГАМК в чистом виде. Смесь белков, извлеченных из мембраны с помощью детергентов, пропускали через колонку, заполненную миниатюрными шариками, к которым были присоединены молекулы бензодиазепина. Бензодиазепин связывал проходящие молекулы рецептора ГАМК, которые затем собирали с колонки.

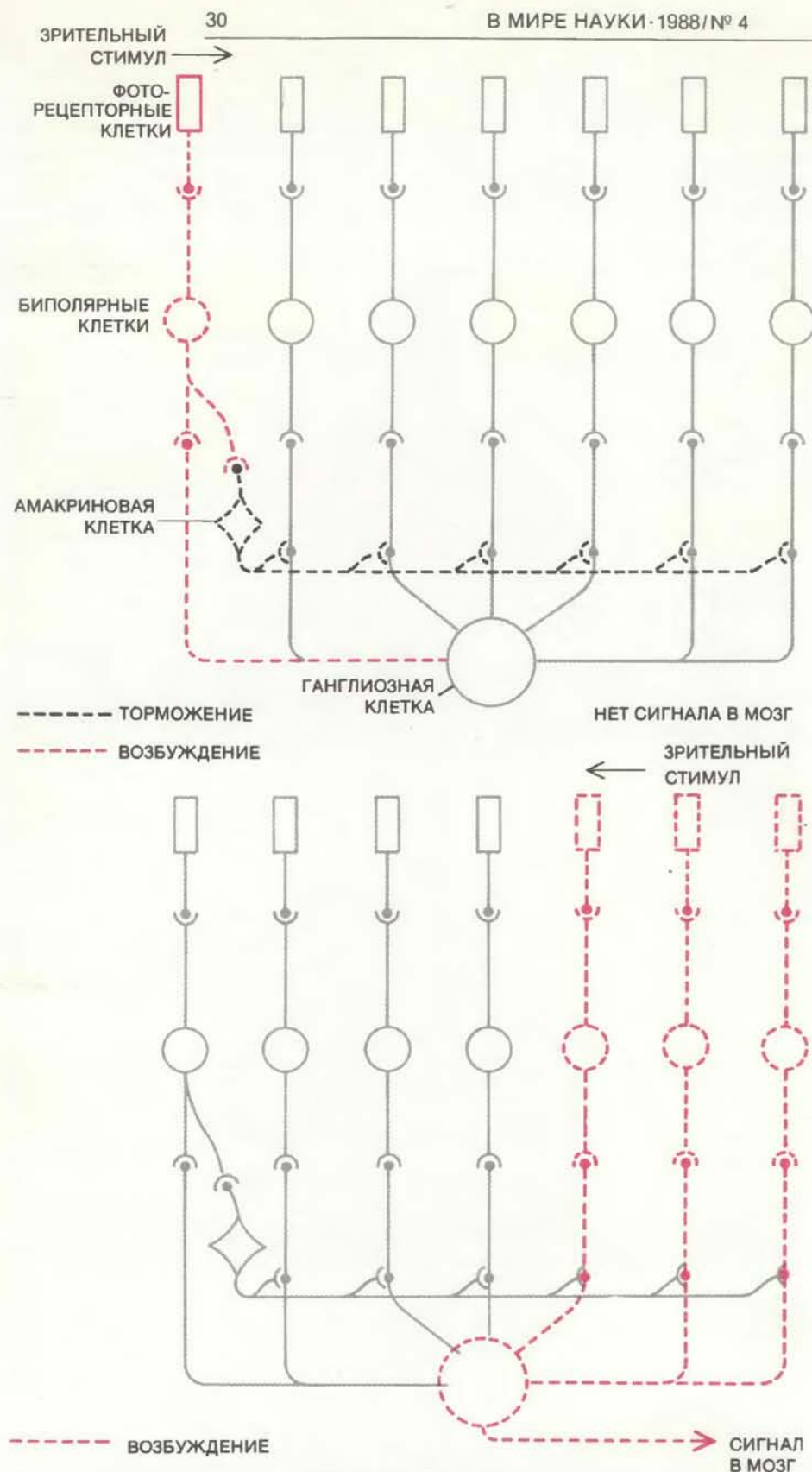
Следует отметить, что бензодиазепины связываются только с рецепторами ГАМК_A. Поэтому белок, выделенный этим способом, представлял собой рецептор типа А, который, как упоминалось выше, влияет на проницаемость мембраны для ионов хлора. Анализ, проделанный группами Барнарда и Мёлера, показал, что моле-

кула рецептора ГАМК_A состоит из двух субъединиц; мол. масса одной из них около 55 тыс. дальтон, другой — около 50 тыс. дальтон. К очищенному рецептору ГАМК_A были получены моноклональные антитела, и в июле прошлого года Барнард с коллегами

сообщили о клонировании генов этого белка. По результатам анализа генов удалось установить полную аминокислотную последовательность рецептора. Знание первичной структуры белка позволило построить модели его пространственной структуры и



СИНАПС должен каждый раз после разряда возвращаться в исходное состояние для того, чтобы передать следующий сигнал; это достигается при помощи молекулярных «насосов» в мембране аксона и окружающих глиальных клеток. Выделившиеся из синаптических пузырьков молекулы ГАМК (1) пересекают синаптическую щель и связываются со специфичными рецепторами на мембране дендрита постсинаптической клетки (2). Их связывание вызывает изменение проницаемости мембраны для ионов хлора и калия, что приводит к возникновению потенциала действия в постсинаптическом нейроне. После этого насосы быстро удаляют ГАМК из синаптической щели (3).



ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ НЕЙРОННОЙ СЕТИ может изменяться под действием ГАМК-эргических нейронов. Фоторецепторные клетки сетчатки реагируют на изменение интенсивности света и посылают сигналы биполярным клеткам. Информация от многих биполярных клеток поступает в ганглиозную клетку. В данном случае если стимул перемещается слева направо (вверху), первый фоторецептор возбуждает биполярную клетку, которая возбуждает ГАМК-эргическую амакриновую клетку. Этот нейрон подавляет активность других биполярных клеток. Биполярная клетка возбуждает также ганглиозную клетку. Но для того чтобы началась импульсация ганглиозной клетки, необходимы возбуждающие сигналы от многих биполярных клеток (от одной недостаточно) и сигнал в мозг не посылается. Биполярные клетки на другой стороне этой нейронной сети, однако, не связаны с данной амакриновой клеткой, и потому стимул, движущийся справа налево (внизу), вызывает передачу информации в мозг.

расположения в мембране. Структура, предложенная Барнардом, включает восемь α -спиральных участков (четыре в каждой субъединице), пронизывающих мембрану; возможно, эти участки образуют канал, через который проходят ионы хлора.

В своих дальнейших работах Барнард с сотрудниками убедительно доказали, что выявленные последовательности ДНК действительно кодируют рецептор ГАМК. Они ввели мРНК, соответствующую выделенному гену, в ооциты лягушки *Xenopus*. Эти молекулы мРНК связались с рибосомами, и произошла трансляция, т. е. синтез закодированного в них белка. В результате ооциты приобрели способность связывать ГАМК и бензодиазепины, что свидетельствовало о наличии функциональных молекул рецептора ГАМК.

Кроме того, Барнард и его коллеги выявили глубокую гомологию (сходство аминокислотных последовательностей) между рецептором ГАМК и рецептором ацетилхолина — важным возбуждающим медиатором. Исследователи пришли к выводу, что оба рецептора принадлежат к надсемейству эволюционно очень древних рецепторных молекул. Из этой гипотезы следует, в частности, что рецепторы обоих этих медиаторов — и тормозного, и возбуждающего — имеют, возможно, общего предка.

РАЗМЫШЛЕНИЯ об эволюционном происхождении тормозных медиаторов поднимают вопрос об их функциях. Ясно, что тормозная активность, коль скоро она столь обычна в головном и спинном мозге, должна играть существенную роль. Долгое время считалось, что тормозные нейроны действуют совместно как регулятор, предотвращающий чрезмерную импульсацию возбуждающих нейронов. Имеются данные, свидетельствующие о том, что тормозные нервные клетки действительно выполняют такую функцию. Например, в экспериментах на животных введение веществ, блокирующих действие ГАМК (таких, как пикротоксин или биксукуллин), вызывало широкое распространение избыточной активности нейронов, что сопровождалось судорогами.

Но такой в значительной мере пассивной, неспецифической активностью деятельность тормозных клеток не исчерпывается. С помощью пикротоксина и биксукуллина, которые избирательно блокируют ГАМК-эргические синапсы, можно посмотреть, как функционируют нейронные сети без этих синапсов. Недавно мои коллеги Д. Колдуэлл, Г. Уатт и Н. Дау

провели такие эксперименты на сетчатке кролика. Ранее Х. Барлоу из Калифорнийского университета в Беркли показал, что многие ганглиозные клетки в сетчатке кролика (нервные клетки, передающие зрительную информацию в мозг) обладают избирательной дирекциональной чувствительностью: каждая из них отвечает на стимулы, движущиеся только в одном определенном направлении.

Дау и его сотрудники изучали ответы таких ганглиозных клеток на стимуляцию до, во время и после обработки пикротоксином. Они обнаружили, что в присутствии пикротоксина дирекциональная чувствительность исчезает — ганглиозные клетки одинаково отвечают на стимулы, движущиеся в любом направлении, — и появляется только после отмывания вещества из ткани.

Наиболее вероятное объяснение этих замечательных результатов заключается в том, что именно ГАМК-эргические нейроны обеспечивают дирекциональную чувствительность ганглиозной клетки. Свет, попадающий на сетчатку, активизирует фоторецепторы (палочки и колбочки), которые связаны с ганглиозными клетками не прямо, а через промежуточное звено, так называемые биполярные клетки. Отростки биполярных клеток возбуждают также амакриновые клетки (которые и являются ГАМК-эргическими нейронами), чьи отростки образуют контакты с ганглиозными клетками. Определенные амакриновые клетки имеют асимметричную систему связей, так что при стимуляции они тормозят ганглиозные клетки, расположенные либо справа, либо слева, но не с обеих сторон (см. иллюстрацию на с. 30). В присутствии пикротоксина действие амакриновых клеток блокируется и ганглиозные клетки отвечают на движение в любом направлении.

Таким образом, амакриновые клетки наделяют сетчатку важным свойством — способностью детектировать направление движения. Несомненно, такая способность явилась крупным эволюционным приобретением, поскольку была полезна при оценке передвижений хищников или других объектов.

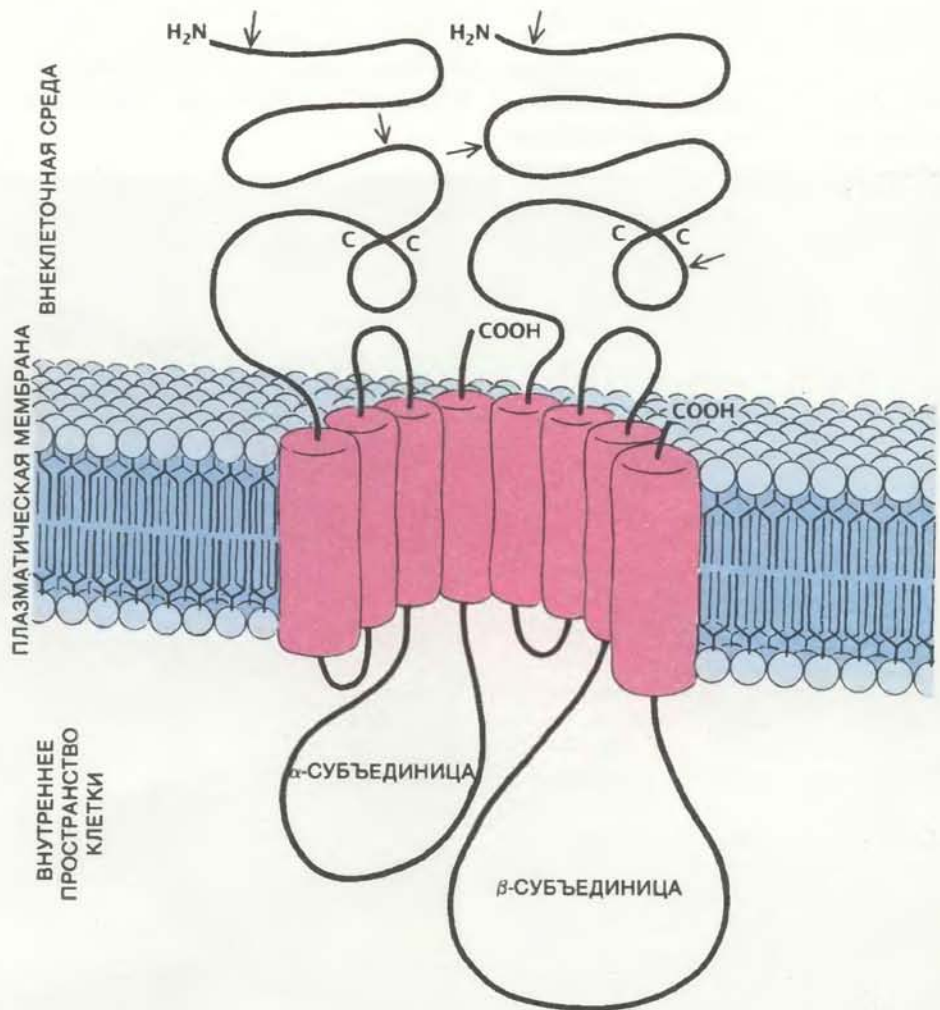
Сходные преимущества, вероятно, дает и другое свойство ГАМК-эргических нейронов, которое исследовали в экспериментах на кошках Р. Дайкс из Университета Макгилла и его коллеги. Здоровые кошки способны очень хорошо различать локализацию раздражений на коже, даже если их наносят весьма близко друг от друга. Это обеспечивается тем, что определенные нейроны мозга отвечают на стимуляцию только в строго

ограниченной области — так называемом рецептивном поле. Эти нейроны сосредоточены в структуре, носящей название соматосенсорная кора. При инъекции бикукуллина в соматосенсорную кору рецептивные поля многих нейронов расширяются далеко за свои обычные пределы. Как и в случае с сетчаткой кролика, эффект обратим: он исчезает после удаления воздействующего вещества.

Эти результаты также лучше всего объясняются тем, что ГАМК-эргические нейроны избирательно подавляют некоторые сенсорные входы. На самом деле нейроны соматосенсорной коры получают возбуждающие сигналы от большой области кожи. Однако действие различных входов из этой области оказывается неодинаковым. Входам от периферических участков сопутствуют тормозные входы, подавляющие их эффект, в то время как входы от центральных участков остаются незаторможенными

ми, что и определяет узкую зону чувствительности.

ЭТИ ДВА примера ясно показывают, что роль тормозных нейронов вообще и ГАМК-эргических в частности значительно больше, чем просто регуляция общего уровня нейронной активности. Их способность определять специфичность ответов других нервных клеток позволяет говорить о фундаментальном значении деятельности тормозных нейронов в мозге. В современных теориях функционирования мозга сложные нейронные сети рассматриваются как основа способности мозга отбирать и анализировать информацию, поступающую от органов чувств. Настроенная реактивность ключевых нейронов, ГАМК-эргические нервные клетки могут формировать такие сети, иными словами, они наряду с возбуждающими путями обеспечивают восприятие и действие.



РЕЦЕПТОР ГАМК представляет собой белок, погруженный в наружную мембрану постсинаптической клетки. Молекула рецептора состоит из двух субъединиц — α и β . В каждой субъединице цепочка аминокислот образует четыре α -спиральных участка (изображены в виде цилиндров), которые «прошивают» мембрану насквозь. Возможно, эти участки формируют каналы для ионов хлора. Стрелками указано, где к цепочке аминокислот присоединены молекулы сахара. Это модель рецептора типа А, предложенная в 1987 г. Э. Барнардом и его сотрудниками, которые клонировали гены рецептора.

Как развивался климат на планетах земной группы

Планеты с умеренным климатом, напоминающим земной, когда-то считались редкостью в нашей Галактике.

Современные математические модели наводят на мысль, что если за пределами Солнечной системы существуют планеты, то многие из них могут быть обитаемыми

ДЖЕЙМС Ф. КАСТИНГ, ОУЭН Б. ТУН, ДЖЕЙМС Б. ПОЛЛАК

ПОЧЕМУ на Марсе слишком холодно, чтобы там существовала жизнь, на Венере слишком жарко, а на Земле в самый раз? На первый взгляд ответ на этот вопрос может показаться простым. Здравый смысл подсказывает, что Земля с ее пригодной для жизни средней температурой 15 °С образовалась на подходящем расстоянии от Солнца, а Марс (-60 °С) и Венера (+460 °С) — нет; в результате только на поверхности Земли есть необходимая для жизни вода в жидком состоянии.

Однако особенности происхождения «земных», или «каменных», планет не объясняют полностью их климата. Мы предполагаем, что три «соседки», образовавшиеся при столкновении множества тел, так называемых планетезималей, были когда-то во многих отношениях похожи. Они состояли из одинаковых пород, имели атмосферы с примерно одинаковым газовым составом (содержащие углекислый газ и водяной пар) и были достаточно массивными, чтобы удерживать воду на большей части своей поверхности. Принципиально различный климат возник на них в основном из-за различий в круговороте диоксида углерода, или углекислого газа (CO₂), — обмене им между корой планеты и атмосферой. Углекислый газ, подобно водяному пару и некоторым другим компонентам атмосферы, является «парниковым» газом: он пропускает солнечный свет, но поглощает инфракрасное излучение (тепло) планеты и переизлучает часть этого тепла назад к ее поверхности.

Более детальные расчеты нашей группы из НАСА и других исследователей показывают, что умеренный климат, всегда существовавший на Земле, в первую очередь обязан своим происхождением особенностям механизма газообмена на нашей планете:

когда поверхность планеты остывает, количество углекислого газа в атмосфере увеличивается, когда же температура поверхности растет, его количество уменьшается. Марс сейчас «заморожен», поскольку он потерял способность возвращать газ в атмосферу, а на Венере — пекло, поскольку там, наоборот, отсутствует механизм выведения углекислого газа из атмосферы. (Меркурий, еще одна

планета земной группы, не имеет атмосферы; температура его поверхности полностью зависит от излучения Солнца.)

Парадокс тусклого молодого Солнца

Наш интерес к роли углекислого газа в эволюции климата Земли, Марса



ВЕНЕРА, ЗЕМЛЯ И МАРС (слева направо; пропорции соблюдены) на ранних этапах своей истории могли иметь достаточно умеренный климат, чтобы на их поверхности в течение долгого времени существовала «жизнетворная» вода в

и Венеры уходит своими корнями в одну космологическую загадку, относящуюся к происхождению Земли и называемую парадоксом тусклого молодого Солнца. Фактически любая модель звезды показывает, что во время образования Солнечной системы (около 4,6 млрд. лет назад) излучение Солнца было на 25—30% слабее, чем сейчас. Однако затем светимость Солнца (интенсивность его излучения) стала примерно линейно увеличиваться со временем.

Парадокс возникает, как установили около 15 лет назад К. Саган и Дж. Муллен из Корнеллского университета, в силу того, что, если первичная атмосфера Земли была такой же, как и сейчас, Земля, «обогреваемая» слабым излучением Солнца, должна была находиться в «замороженном» состоянии до 2 млрд. лет назад. Однако на самом деле планета не была обледенелой. Данные, полученные при изучении осадочных пород, показывают, что 3,8 млрд. лет назад — в эпоху, которой датируются древнейшие геологические данные, — на Земле уже были океаны. Кроме того, существование на Земле в течение последних 3,5 млрд. лет жизни доказы-

вает, что земная поверхность никогда не замерзала целиком. (Вода может находиться в жидком состоянии при температуре от 0 до 374 °С; в современной атмосфере вода кипит и испаряется на уровне моря при 100 °С, но она может оставаться жидкой и при более высокой температуре, если атмосферное давление достаточно велико.)

Саган и Муллен поняли, что парадокс исчезает, если предположить, что земная атмосфера со временем изменялась. Например, если бы на юной планете облаков было меньше, чем сейчас, то меньше солнечного света, падающего на Землю, отражалось бы назад в космос и планета была бы относительно теплее. (Сейчас 30% солнечного света, падающего на верхнюю границу атмосферы, возвращается в космос, причем главным образом из-за отражения от облаков.)

Более вероятное объяснение изменения климата состоит в том, что в отдаленном прошлом был значительнее парниковый эффект. Саган и Муллен предположили, что аммиак (NH_3) — эффективный поглотитель инфракрасного излучения — мог бы создать более теплый климат на Зем-

ле, если бы на его долю приходилось 100 молекул из каждого миллиона молекул атмосферных газов. Последующие исследования показали, однако, что под действием солнечного света аммиак быстро превращается в газы, не создающие парниковый эффект — азот и водород, поэтому, чтобы выполнять роль «хранителя» теплого климата, аммиак должен был бы постоянно выделяться из Земли в атмосферу.

Другие исследователи сосредоточили свое внимание на углекислом газе, который не так легко разрушается солнечным светом. Углекислого газа на Земле в избытке: его запасов, сосредоточенных в карбонатных осадочных породах, достаточно для создания атмосферного давления в 60 бар. (В современной атмосфере углекислый газ создает давление 0,0003 бар.) Если бы в первоначальной атмосфере Земли присутствовало количество углекислого газа, соответствующее давлению хотя бы в несколько десятых долей бара, создаваемый им дополнительный парниковый нагрев мог бы компенсировать нехватку солнечного тепла.

Предположение о том, что повы-



жидком состоянии. Численные модели, в том числе и разработанные авторами, показывают, что особенности обмена углекислым газом между атмосферой и сушей — а не

только расстояние от планеты до Солнца — объясняют, почему Венера лишилась своей воды, Марс замерз, а Земля осталась пригодной для жизни.

шенный уровень содержания CO_2 мог бы предохранить раннюю Землю от замерзания, вскоре привел к следующей идее: снижение содержания CO_2 со скоростью, в точности компенсирующей возрастание светимости Солнца, объяснило бы тот факт, что температура на Земле менялась незначительно. Расчет такой компенсирующей скорости был выполнен М. Хартом из НАСА.

Харт смог получить решение задачи, в котором содержание газа убывает со временем по логарифмическому закону. Однако самый интересный «результат» состоял в том, что лишь немногие из этих расчетов приводили к цели. Другими словами, если состав модельной атмосферы в какой-нибудь момент времени начинал меняться со скоростью, отличной от точного решения, то планета становилась непригодной для жизни: если содержание CO_2 убывало слишком медленно, Земля превращалась в пекло, если слишком быстро — океаны замерзали.

Харт выполнил аналогичные расчеты для иных, чем действительное, расстояний между Землей и Солнцем. Он нашел, что если бы Земля образовалась на 5% а. е. (астрономической единицы) ближе к Солнцу, то атмосфера стала бы настолько горячей, что океаны испарились бы (такой процесс известен как разгоняющийся парниковый эффект). Напротив, если бы планета сформировалась всего на

1% а. е. дальше от Солнца, она попала бы в условия разгоняющегося охлаждения. Только находясь в относительно узком поясе орбит — между 0,95 и 1,01 а. е., — Земля может избежать и той и другой климатической катастрофы (1 астрономической единицы равна среднему расстоянию между Солнцем и Землей — 149,6 млн. км). Харт назвал эту узкую полосу орбит «непрерывно обитаемой зоной» (НОЗ).

Выводы Харта внушали беспокойство: согласно этим выводам, Земля должна была получить исключительные преимущества, чтобы избежать судьбы Марса или Венеры. Лишь в последние несколько лет обнаружилось слабое место в предположениях Харта. Математическая модель, разработанная Дж. Уолкером и П. Хэйсом из Мичиганского университета и одним из авторов (Кастингом), показала, что благоприятное для земной жизни изменение концентрации углекислого газа не имело характера счастливой случайности. Скорее всего, содержание CO_2 изменяется в ответ на изменения температуры поверхности Земли: когда температура растет, содержание CO_2 в атмосфере уменьшается, что приводит к охлаждению поверхности, и наоборот, когда поверхность охлаждается, количество атмосферного CO_2 возрастает, что приводит к потеплению. Наличие такой отрицательной обратной связи означает, что Земля, возможно, ни-

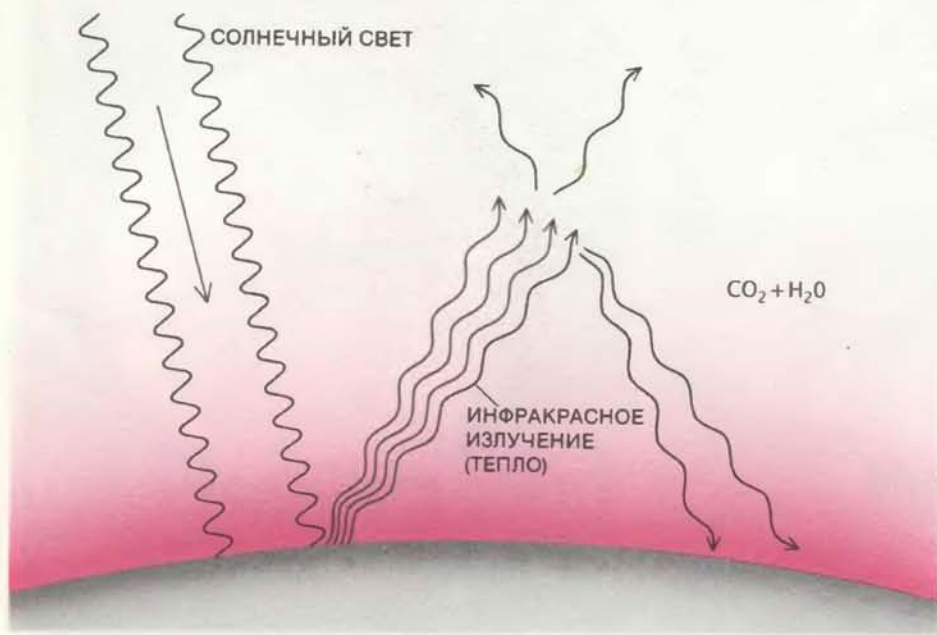
когда не подвергалась опасности разгоняющегося потепления или охлаждения, постулированных Хартотом.

Карбонатно-силикатный цикл

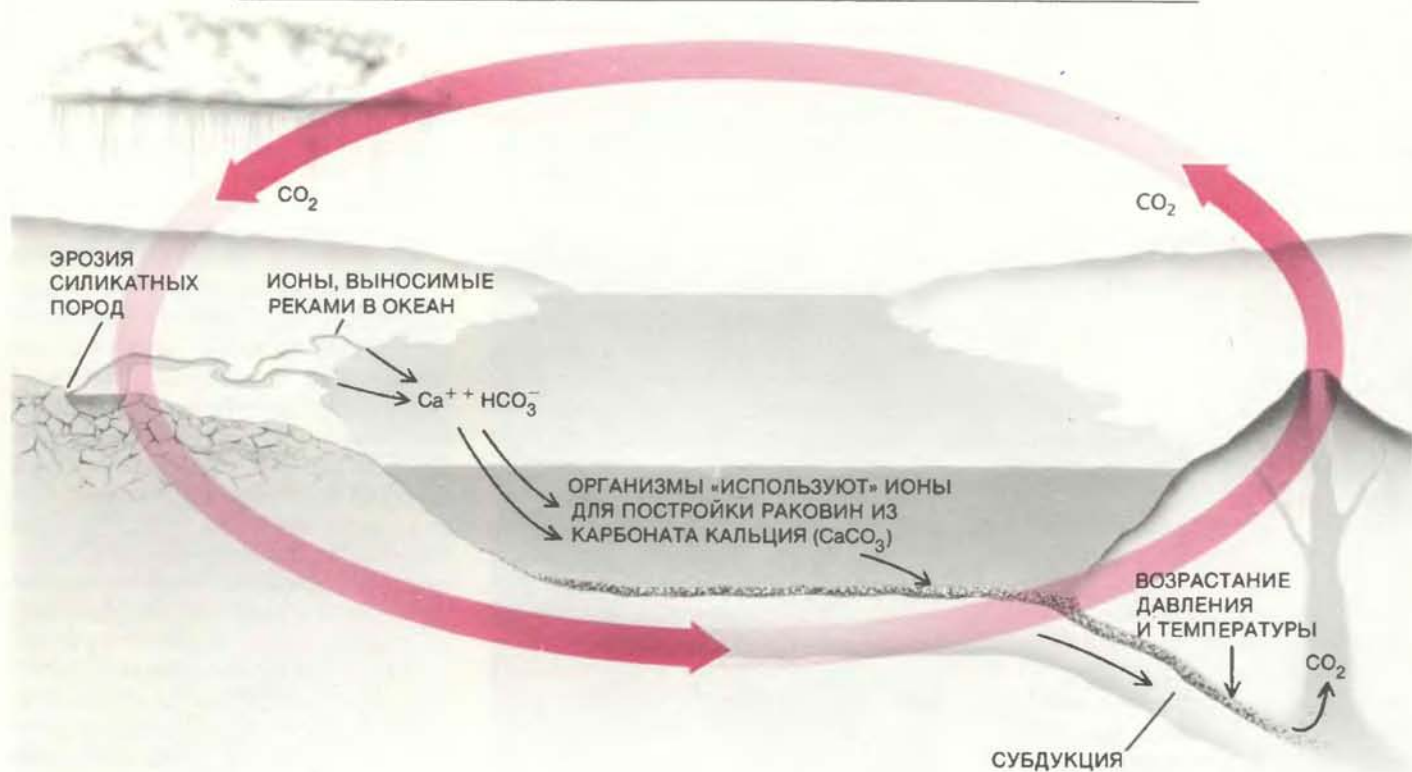
Предполагаемая обратная связь обеспечивается карбонатно-силикатным геохимическим циклом, который отвечает за 80% обмена углекислым газом между планетой и ее атмосферой в масштабах времени свыше 500 тыс. лет. Цикл начинается, когда содержащийся в атмосфере углекислый газ растворяется в каплях воды, образуя угольную кислоту (H_2CO_3). Дождевые осадки разрушают породы, состоящие из кальциево-силикатных минералов (соединений кальция, кремния и кислорода). При этом угольная кислота вступает в реакцию с породами, находящимися на поверхности, и высвобождает ионы кальция и бикарбоната (Ca^{++} и HCO_3^-), поступающие в грунтовые воды. Вода переносит ионы в ручьи, реки и в конечном счете в океан.

В море эти ионы задерживаются в скелетах и раковинах планктона и других организмов, состоящих из карбоната кальция (CaCO_3). Когда эти организмы умирают, их остатки падают на дно океана, формируя карбонатные осадочные породы. Дно моря медленно расширяется, так что через много тысяч лет осадочные породы приближаются к краям континентов. Здесь морское дно подвигается под массы суши и попадает в недра планеты. По мере того как осадочные породы подвергаются действию все больших температуры и давления, карбонат кальция соединяется с кремнием (кварцем), образуя силикатные породы (этот процесс известен как карбонатный метаморфизм) и выделяя газообразный CO_2 . В конце концов углекислый газ снова попадает в атмосферу через срединно-океанические хребты и через вулканы, расположенные по краям литосферных плит.

Уолкер и его коллеги поняли, что изменения температуры поверхности планеты влияют на количество CO_2 в атмосфере и тем самым на величину парникового эффекта. Предположим, что по какой-либо причине, например в результате ослабления приходящего солнечного излучения, на Земле похолодало. При более низкой температуре меньше воды из океана испаряется в атмосферу, соответственно меньше выпадает дождей и уменьшается эрозия, обусловленная осадками. При таких условиях скорость, с которой CO_2 покидает атмосферу, уменьшается, в то время как скорость регенерации



ПАРНИКОВЫЙ ЭФФЕКТ обязан своим существованием некоторым газам (преимущественно углекислому) и водяному пару. Такие компоненты атмосферы пропускают солнечную радиацию к поверхности планеты, но захватывают инфракрасное (тепловое) излучение планеты и переизлучают значительную часть этой энергии назад к поверхности, что приводит к ее нагреву. На Земле температура у поверхности благодаря парниковому эффекту примерно на 35 °С выше той, которая была бы в отсутствие этих газов.



КАРБОНАТНО-СИЛИКАТНЫЙ геохимический цикл имеет продолжительность около 500 тыс. лет. В ходе этого цикла CO_2 вымывается из атмосферы, накапливается в карбонатных породах, а затем вновь возвращается в воздух. Образование карбонатов связано с тем, что CO_2 растворяется в дождевой воде и вступает в реакцию с породами, состоящими из кальциево-силикатных минералов (соединений кальция, кремния и кислорода). В результате таких реакций образуются ионы кальция и бикарбоната (Ca^{++} и HCO_3^-); они смываются в ручьи и реки и в конце концов по-

падают в океаны. В океанах планктон и другие организмы поглощают эти ионы, идущие на постройку раковин, состоящих из карбоната кальция (CaCO_3); остатки организмов падают на дно океана и формируют осадочные породы. Дно океана медленно расширяется и поддвигается под континенты (этот процесс называется субдукцией). Осадочные породы опускаются в недра планеты, где под воздействием высоких температур и давления выделяется углекислый газ, который возвращается в атмосферу преимущественно в ходе вулканической деятельности.

CO_2 в процессе карбонатного метаморфизма и скорость его поступления в окружающую среду не меняется. В результате происходит накопление углекислого газа в атмосфере, усиливается парниковый эффект и восстанавливается более теплый климат.

Напротив, если по какой-либо причине на Земле произошло потепление, должны возрасти испарение с поверхности океана и количество осадков, а следовательно, усилиться вымывание CO_2 из атмосферы. Парниковый эффект при этом должен ослабнуть.

Эту обратную связь проще всего представить, рассмотрев крайний случай. Если все океаны замерзнут, дожди практически прекратятся и содержание углекислого газа в атмосфере начнет расти. При современной скорости выделения газа давление атмосферного CO_2 в 1 бар создается за 20 млн. лет — геологически небольшой отрезок времени. Такого количества углекислого газа в атмосфере хватит на то, чтобы поднять температуру поверхности Земли примерно до $+50^\circ\text{C}$, а это более чем достаточно, для того чтобы растаяли льды и

восстановились нормальные климатические условия.

Роль биоты

Поскольку живые организмы играют важную роль в круговороте углекислого газа, некоторые исследователи предполагают, что биота несет главную ответственность за изменения климата Земли. Дж. Лавлок из Экспериментальной станции Кумб-Милл в Корнуэлле и Л. Маргулис из Бостонского университета — главные сторонники этой концепции, которую они в честь древнегреческой богини Земли называют гипотезой Геи. Эти авторы утверждают, что уменьшение содержания CO_2 в атмосфере в течение всей геологической истории Земли было прямым следствием биологического «вмешательства» и что без живых организмов развитие земного климата пошло бы по пути Марса или Венеры.

Биота действительно играет важную роль. Углекислый газ, который не участвует в карбонатно-силикат-

ном цикле (около 20%), поглощается (и, стало быть, выводится из атмосферы) фотосинтезирующими растениями. Когда растения умирают, входящий в их состав углерод откладывается в осадочных породах. В процессе горообразования осадочные породы поднимаются и углерод, содержащийся в них, получает возможность вступать в реакцию с атмосферным кислородом в дождевой воде с образованием углекислого газа.

Живые организмы влияют также и на карбонатно-силикатный цикл. Мы уже указывали на роль океанского планктона в формировании карбонатных осадочных пород, но еще более важными в этом смысле могут быть наземные растения. При гниении растений (окислении) в почве накапливается CO_2 . В результате в наше время концентрация CO_2 в типичных почвах, возможно, больше, чем она была до появления сосудистых растений около 400 млн. лет назад. Такое повышение концентрации CO_2 ускоряет превращение силикатных минералов в карбонатные осадочные породы.

Несмотря на все сказанное, мы по-

лагаем, что на уровень содержания CO_2 в атмосфере большее влияние оказывают физические, а не биологические процессы. Можно утверждать, например, что, если бы раковинные организмы, переносящие в конечном счете карбонат кальция на дно моря, не существовали, концентрация ионов кальция и бикарбоната в морской воде возрастала бы. По достижении концентрации ионов определенного уровня карбонат кальция мог бы формироваться без участия живых организмов. Именно так должно было обстоять дело ранее 600 млн. лет назад, когда появились первые раковинные организмы.

Расчеты показывают также, что уменьшение вымывания силикатов, вызванное полным исчезновением наземной растительности, может быть полностью компенсировано повышением температуры среды на 10°C , обеспечиваемым отрицательной обратной связью силикатно-карбонатного цикла. Усилившийся парниковый эффект создал бы климат, подобный существовавшему 100 млн. лет назад в середине мелового периода: теплый, но тем не менее подходящий для многих форм жизни, включая динозавров. Итак, можно думать, что Земля оставалась бы пригодной для жизни, даже если бы никогда не была обитаемой. Необходимый буферный

механизм мог бы работать благодаря одному только карбонатно-силикатному циклу.

Возникает и такой вопрос: а не могли водяной пар, который дает сегодня наибольший вклад в парниковый эффект, измеряемый величиной 35°C , обеспечивать сохранение умеренного климата планеты на протяжении ее истории? Ответ оказывается отрицательным. Изменение количества влаги в атмосфере не компенсирует изменение поверхностной температуры, а скорее усиливает его: содержание влаги в атмосфере увеличивается, когда температура поверхности растет, и уменьшается, когда температура поверхности падает. Следовательно, если мы хотим объяснить тот факт, что, несмотря на увеличение светимости Солнца температура земной поверхности в прошлом не росла неуклонно, а оставалась в допустимых для существования жизни пределах, мы должны опираться на предположение, что основную роль в этом играло изменение содержания углекислого газа в атмосфере.

Недостатки буферного механизма на Марсе

Если на Земле круговорот углекислого газа удерживал колебания зем-

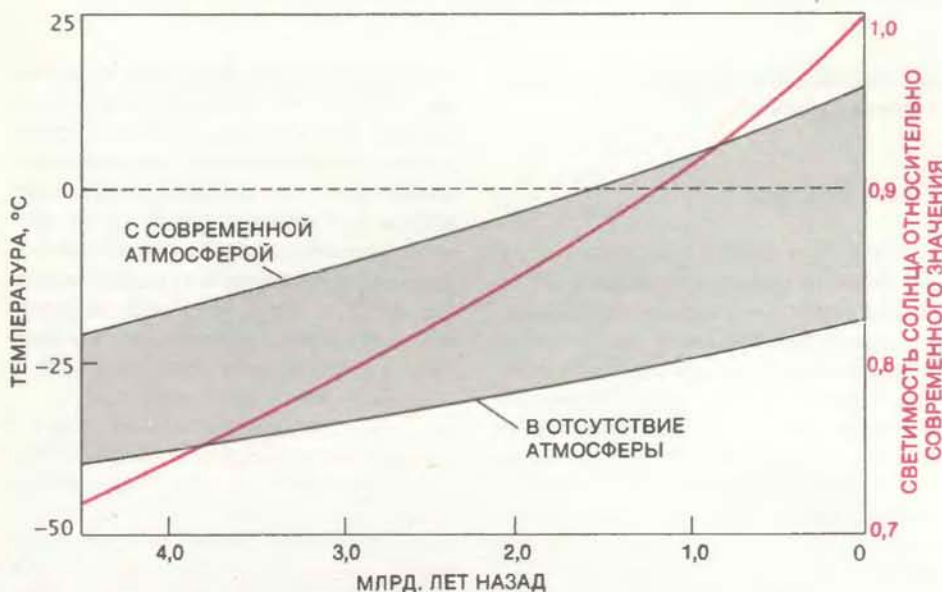
ного климата в довольно узких пределах, то на Марсе аналогичные процессы, если даже они существовали, не могли бы выполнять ту же роль. В современной атмосфере Марса углекислый газ создает давление лишь в 0,006 бар и обеспечивает парниковый эффект с величиной всего 6°C .

Возможно ли, чтобы Марс был холодным с самого начала, а его климат испытывал лишь малые колебания в прошедшие 4,6 млрд. лет? Вряд ли. Фотографии, сделанные с космических аппаратов «Mariner» и «Viking», показывают, что поверхность Марса изрезана множеством каналов, большинство из которых, возможно, было создано потоками воды. Хотя некоторые из каналов могли образоваться и в холодном климате в результате выходов воды с больших глубин, сети долин, пересекающих в разных направлениях древнейшие участки поверхности Марса, могли возникнуть, скорее всего, только при более высоких температурах. Как установил П. Шульц из Университета Брауна, скорость эрозии на планете в течение первого миллиарда лет ее истории была также выше, чем сейчас. Этот факт лишний раз свидетельствует в пользу предположения, что когда-то Марс был достаточно теплым для того, чтобы на его поверхности вода оставалась жидкой.

Геологи не знают, насколько горячим был Марс, но его поверхность могла бы нагреваться благодаря парниковому эффекту плотной атмосферы, состоящей из углекислого газа. Наши расчеты показывают, что количество углекислого газа, создающее давление в 1—5 бар, могло бы сохранить часть марсианской поверхности от замерзания на раннем этапе истории планеты. Нижний предел относится к условиям на марсианском экваторе и к тому моменту, когда планета приближается к Солнцу; верхний — к средним условиям на планете.

Возможно, когда-то атмосфера Марса действительно содержала такое количество углекислого газа (хотя нужно отметить, что оно в 150—800 раз больше, чем сейчас). Если бы в атмосфере Марса, масса которого составляет примерно одну десятую от массы Земли, находилось такое же относительное количество углекислого газа, он бы создавал давление 10 бар. (Чтобы получить эту оценку, необходимо учесть меньшую площадь поверхности и меньшее ускорение силы тяжести на Марсе по сравнению с Землей.)

Мы считаем, что Марс имел достаточные запасы CO_2 , но остыл, поскольку там ослаб круговорот CO_2 . Мы думаем, что когда-то планета



РАСЧЕТЫ по моделям климата показывают, что Земля, с такой же атмосферой, как сейчас, могла бы замерзнуть в начале своей истории. Причиной является то, что в прошлом светимость Солнца была почти на 30% меньше (цветная кривая). Верхняя черная кривая показывает температуру поверхности, рассчитанную с помощью «одномерной» (с глобальным осреднением) климатической модели в предположении постоянной концентрации CO_2 . (Многие из расчетов, обсуждаемых в тексте, также базируются на одномерных моделях.) Нижняя черная кривая показывает температуру поверхности Земли, лишенной атмосферы. Темная область между кривыми представляет величину парникового эффекта. На самом деле содержание CO_2 в прошлом, возможно, было больше, а температура поверхности Земли выше, чем показано здесь. Кривая светимости Солнца основана на расчетах Д. Гофа из Кембриджского университета.

имела эффективную систему круговорота. В противном случае эрозия пород могла бы привести к тому, что углекислый газ был бы удален из атмосферы примерно за 10 млн. лет, а как известно, атмосфера оставалась богатой углекислым газом значительно дольше. Ключ к отгадке дают сети каналов: возраст тех из них, что расположены на древнейших южных возвышенностях, может быть определен по количеству покрывающих их метеоритных кратеров. Используя эту идею, ученые пришли к выводу, что указанные сети каналов уже существовали, когда окончилась самая мощная метеоритная бомбардировка — около 3,8 млрд. лет назад.

Система круговорота, возможно, выводила CO_2 из атмосферы благодаря тем же процессам эрозии, что и на Земле. Однако механизм, который возвращал газ в окружающую среду, мог быть существенно иным, поскольку на такой маленькой планете, как Марс, вероятно, отсутствовала ярко выраженная тектоника плит. Одна из возможностей состоит в том, что вулканическая лава покрывала карбонатные осадки, которые под этой тяжестью погружались на глубины, где под воздействием давления и тепла выделялся CO_2 в газообразном виде. Численные модели показывают, что такой процесс мог обеспечивать круговорот углекислого газа в течение первого миллиарда лет после образования планеты.

Марс, очевидно, охлаждался не потому, что получал меньше солнечного света, чем Земля, а потому, что сам был меньше. Марс обладал меньшими запасами внутреннего тепла уже во время своего формирования, а из-за большего отношения площади поверхности к объему он к тому же быстрее терял это тепло. В конце концов его недра стали настолько холодными, что потеряли способность высвобождать углекислый газ из карбонатных пород. Весь CO_2 , вымываемый из атмосферы, оставался заключенным в грунте. Марсианская атмосфера становилась все «тоньше», и климат приближался к нынешнему холодному состоянию. Если бы Марс был сравним по размерам с Землей, то его внутреннего тепла могло бы оказаться достаточно для «воспроизводства» углекислого газа и компенсации нехватки солнечного тепла.

Из этих рассуждений следует, что сейчас в коре Марса находится достаточно большая масса карбонатных пород. Однако до сих пор ведущиеся с Земли спектроскопические измерения не обнаружили такие породы. Вместе с тем Дж. Гудинг из НАСА недавно нашел малые количества карбоната кальция в так называемых ШНШ-ме-



ПОВЕРХНОСТЬ МАРСА изрезана множеством каналов. Это позволяет предположить, что когда-то планета была достаточно теплой для того, чтобы на ее поверхности существовала жидкая вода. Типичные «проточные» каналы вроде Ниргал Валлис (вверху) выглядят не так, как земные реки, потому что их притоки редки и коротки; возможно, они возникают вследствие выходов грунтовых вод. Другие, более разветвленные, структуры (внизу), обнаруженные на древних террасах, по внешнему виду похожи на сети долин; они могли быть сформированы и выходами грунтовых вод и потоками воды, выпавшей в виде осадков. Тот факт, что эти сети покрыты кратерами, означает, что они возникли до окончания периода интенсивной метеоритной бомбардировки около 3,8 млрд. лет назад. Некоторые каналы «излияний» (не показаны) могли образоваться в холодном климате в ходе других процессов.

теоритах (Шерготти, Нахала и Шассиньи), представляющих собой фрагменты породы предположительно марсианского происхождения. Автоматическая межпланетная станция «Mars-Observor», которую планируется запустить в 1992 г., проведет более детальные исследования карбонатов и доставит новые важные данные, касающиеся нашей теории замерзания Марса.

Как высохла Венера

В то время как Марс имеет огромные запасы воды (хотя и замерзшей), Венера сегодня почти полностью обезвожена. Лишь немного влаги осталось там в виде водяного пара в атмосфере или в качестве компонента плотных облаков, состоящих в основном из капелек серной кислоты и плотным слоем окружающих планету. Климатологи построили две основные теории, объясняющие, почему на Венере так сухо.

Дж. Льюис из Аризонского университета и его коллеги предположили,

что Венера никогда не имела много воды, поскольку та часть туманности, где сформировалась Венера, была слишком горячей для образования гидратированных минералов. Серьезный недостаток этой теории состоит в том, что в ней не учитывается роль гравитации. Согласно динамической модели, разработанной Дж. Уэдериллом из Института Карнеги в Вашингтоне, формирующиеся планеты не только захватывают планетезимали, попадающие на их пути, но и возмущают их орбиты и рассеивают их по всей Солнечной системе. На более поздних стадиях своего роста «Протоземля» и «Протовенера» уже были достаточно массивны, чтобы обмениваться планетезималиями. С Земли «прибывали» планетезимали богатые водой, поэтому Венера должна была получить значительное количество жидкой воды.

Опирающаяся на это соображение альтернативная теория эволюции венерианского климата гласит, что первоначально Венера имела достаточно воды — возможно, столько же, сколько Земля, — но потеряла ее, ког-

да эта жизнеспособная субстанция нашла путь в верхние слои атмосферы. Там под действием солнечного света молекулы воды распадаются и освобождающиеся атомы водорода улетучиваются в космос. (Источником этого водорода служит лишь вода в верхней атмосфере; на низких высотах легкие атомы водорода задерживаются основными атмосферными газами, такими как CO_2 .)

Имеющиеся варианты этой альтернативной теории отличаются друг от друга тем, допускают они существование жидкой воды на поверхности планеты в течение некоторого времени или нет. Классическое объяснение — теория разгоняющегося парникового эффекта — предполагает, что на поверхности Венеры воды никогда не было. Концепция разгоняющегося парникового эффекта была предложена в 1955 г. Ф. Хойлом, но многие детали были разработаны в конце 60-х годов Э. Ингерсоллом из Калифорнийского технологического института и одним из авторов (Поллаком).

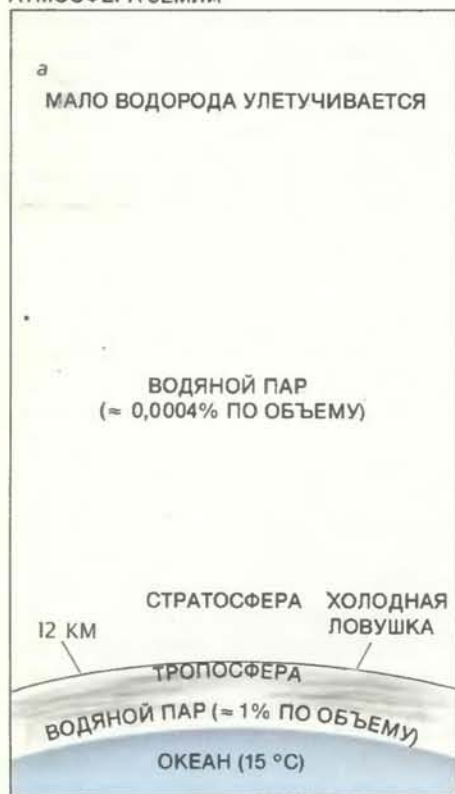
По мнению этих исследователей, вода на поверхности не может оставаться жидкой, если поток солнечного света, падающего на планету, превышает некоторую критическую величину. Если на орбите Венеры этот поток имел закритическую величину с самого начала, то вся вода, которая высвобождалась из недр планеты, должна была сразу испаряться. По крайней мере в нижнем, наиболее теплом, слое атмосферы водяной пар не мог конденсироваться и выпадать в виде дождей, а значит, не могли образовываться океаны.

Вода должна была покинуть планету, поскольку в такой горячей влажной атмосфере воздух по мере своего подъема охлаждался чрезвычайно медленно. Соответственно, так называемая холодная ловушка располагалась на большой высоте (около 100 км). (Холодная ловушка — это слой, где низкая температура и высокое давление создают минимум точки насыщения.) В нормальных условиях относительная концентрация водяно-

го пара (доля элементарного объема воздуха, занятого водяным паром) в холодной ловушке намного меньше, чем в атмосфере под ней, поэтому водяной пар конденсируется здесь вместо того, чтобы подниматься дальше. Однако в приподнятой холодной ловушке относительная концентрация влаги должна быть примерно такой же как и в слоях атмосферы, расположенных ближе к поверхности. При таких условиях холодная ловушка позволяет значительному количеству влаги уходить в более высокие области, где молекулы H_2O подвергаются «фотодиссоциации» и водород ускользает в космос. В ходе этого процесса менее чем за 30 млн. лет может исчезнуть целый океан.

В современной земной атмосфере холодная ловушка находится на гораздо меньших высотах (между 9 и 17 км) — вблизи границы тропосферы и стратосферы. Когда водяной пар из нижних слоев поднимается к холодной ловушке, он почти весь успевает сконденсироваться; в резуль-

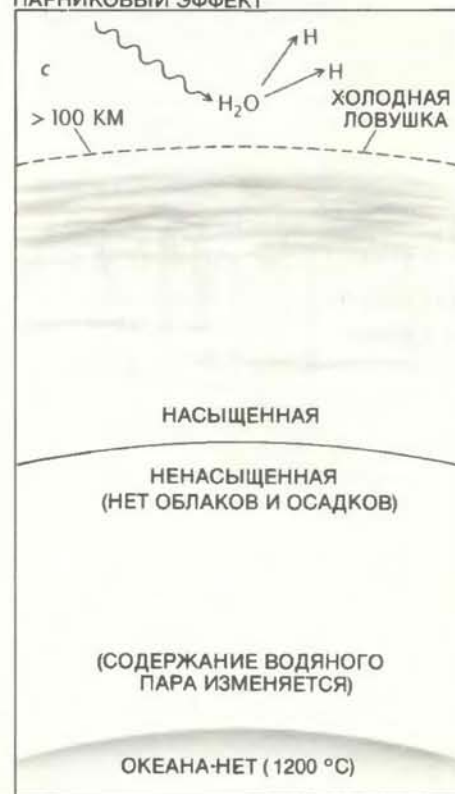
АТМОСФЕРА ЗЕМЛИ



РАННЯЯ ВЕНЕРА — ВЛАЖНЫЙ ПАРНИК



РАННЯЯ ВЕНЕРА — РАЗГОНЯЮЩИЙСЯ ПАРНИКОВЫЙ ЭФФЕКТ



ВОДЯНОЙ ПАР, уходящий из земной атмосферы, составляет небольшую долю общего количества водяного пара, чего нельзя сказать о молодой Венере. На Земле (a) вода в тропосфере «заперта» расположенной в стратосфере «холодной ловушкой» — слоем, где сочетание низкой температуры и относительно высокого давления воздуха сводит к минимуму концентрацию водяного пара. К тому времени, когда водяной пар достигает ловушки, большая часть его оказывается сконденсированной. На молодой Венере нижняя атмосфера, хотя и теплая по земным меркам, могла быть все же достаточно холодной для конденсации пара и образования океана. Со временем, однако, океаны должны были исчезнуть — например под влиянием условий «влаж-

ного парника» (b); такие условия возникают, когда из-за высокой температуры поверхности концентрация водяного пара в нижней атмосфере увеличивается до 20%. Холодная ловушка поднимается на большие высоты и перестает преграждать путь водяному пару в верхние слои атмосферы. Хотя часть пара конденсируется в виде дождя, остальные молекулы пара диссоциируют и входящие в них атомы водорода улетучиваются в космос. Венера могла быть и настолько горячей, чтобы возник разгоняющийся парниковый эффект (c); в этом случае вся вода, существовавшая на планете, должна была быстро превратиться в пар так, что океаны не успели бы образоваться. В любом случае влага неизбежно ускользала из атмосферы.

тате наша стратосфера оказывается исключительно сухой и в космос ускользает мало водорода.

Мы рассчитали, что поток солнечного излучения, необходимый для «запуска» на некоторой планете механизма разгоняющегося парникового эффекта, примерно в 1,4 раза больше потока, падающего сейчас на Землю (в предположении, что планета имеет полностью насыщенную водяным паром атмосферу, в которой нет облаков). Эта величина примерно равна оцененной величине солнечного потока на орбите Венеры на ранней стадии истории Солнечной системы, откуда следует, что Венера была под угрозой разгоняющегося парника. Однако, если в атмосфере этой планеты имелись облака, отражавшие часть приходящего солнечного света, то она на самом раннем этапе своей истории могла избежать катастрофы и иметь на своей поверхности океаны.

Такие океаны, впрочем, не могли существовать долго. В виде альтернативы теории разгоняющегося парникового эффекта мы предполагаем, что Венера когда-то имела океаны, но лишилась их, потому что ее атмосфера представляла собой, по нашему выражению, влажный парник, а именно: относительная концентрация водяного пара у ее поверхности составляла больше 20% по объему. Для атмосферы с давлением 1 бар у поверхности, как на Земле, такая концентрация может достигаться, если температура поверхности поднимается выше примерно 70 °С. (Если на Венере были океаны и шли дожди, большая часть CO_2 должна была быть захоронена в карбонатных породах и атмосфера с давлением 1 бар у поверхности вполне могла существовать.)

Результаты расчетов по нашим моделям показывают, что влажный парник возникает тогда, когда поток солнечного излучения, проходящего сквозь атмосферу, свободную от облаков, по крайней мере в 1,1 раза больше количества света, падающего на Землю. Если концентрация водяного пара у поверхности превышает 20%, конденсация влаги (при которой выделяется тепло) приводит к значительному нагреву атмосферы, что, как и в условиях разгоняющегося парникового эффекта, влечет за собой подъем холодной ловушки. Таким образом, вода находит дорогу в верхние слои атмосферы. Океаны могли бы существовать на планете, где поток солнечного излучения в 1,1—1,4 раза превышал современный поток на Земле, однако за несколько сотен млн. лет они должны были бы высохнуть вследствие улетучивания водорода в космос.



НЕПРЕРЫВНО ОБИТАЕМАЯ ЗОНА (голубая) — область в космосе, где теоретически на планетах может поддерживаться климат земного типа, причем достаточно долго для процветания жизни. Ранние оценки показывали, что эта зона очень узка и располагается в пределах расстояний от 0,95 до 1,01 а. е. от Солнца, едва покрывая земную орбиту. Согласно новейшим расчетам, ее внешняя граница может лежать за орбитой Марса на расстояниях свыше 1,5 а. е. от Солнца.

На наш взгляд, для объяснения того, почему сегодня Венера практически не имеет жидкой воды, теория влажного парника подходит больше, чем теория разгоняющегося парникового эффекта. Поскольку эрозия должна была способствовать снижению содержания углекислого газа во влажном парнике, в целом атмосферное давление должно было быть ниже, чем в условиях разгоняющегося парникового эффекта. В результате требовалось небольшое количество водяного пара, чтобы обеспечить 20%-ную концентрацию пара, так что большая часть запасов воды должна была уйти в верхнюю атмосферу. Например, если давление водяного пара в атмосфере составляло 1 бар, а давление углекислого газа также 1 бар, водяной пар занимал 50% объема и большинство его должно было ускользнуть. Напротив, если давление углекислого газа было равно 99 бар, а давление водяного пара 1 бар, водяной пар составлял 1% по объему и вода должна была оставаться в атмосфере планеты.

Независимо от того, находилась ли ранняя атмосфера Венеры в состоянии разгоняющегося или влажного парника, она обязательно должна была прийти к современному горячему и сухому состоянию. После исчезновения океанов прекратилось формирование карбонатов и углекислый газ начал накапливаться в атмосфере. В итоге давление в 93 бар в современной атмосфере планеты обеспечивается в основном углекислым газом. Газообразные соединения серы, которые первоначально были редки, поскольку они легко растворяются в воде, также накапливались и образовывали облака из капелек серной кислоты, которые сейчас являются одной из отличительных черт Венеры.

Именно углекислый газ, а не расстояние от Венеры до Солнца определяет сегодняшнюю высокую температуру ее поверхности. К Венере приходит в 1,9 раз больше солнечной радиации, чем к Земле, но ее кислотные облака отражают около 80% солнечного света, так что поглощает солнечной энергии Венера значительно меньше, чем Земля. В отсутствие парникового эффекта Венера была бы холоднее Земли и лишь ненамного теплее Марса.

Непрерывно обитаемая зона

Вывод, что планета, на которую падает поток солнечной энергии, в 1,1 раз больший, чем на Землю, должна потерять содержащуюся на ней воду в результате фотодиссоциации молекул водяного пара, согласуется с расчетами Харта, дающими для внутренней границы непрерывно обитаемой зоны значение около 0,95 а. е. Это совпадение, однако, в какой-то степени случайно, поскольку мы получили свою оценку, основываясь на скорости улетучивания водорода, а Харт пришел к своей оценке иным путем. Конечно, планета на внутренней границе НОЗ не может быть обитаемой долго. Светимость Солнца постоянно возрастает (на 1% каждые 100 млн. лет). Следовательно, примерно через миллиард лет на Земле могут возникнуть условия, угрожающие сохранению воды на планете. Эта опасность может быть отсрочена на некоторое время благодаря уменьшению количества атмосферного углекислого газа, обусловленному карбонатно-силикатным циклом. Однако такое уменьшение может стать губительным для биоты, поскольку многие растения не

в состоянии осуществлять фотосинтез, если получают значительно меньше углекислого газа, чем сейчас. (Осведомленные читатели заметят, что содержание CO_2 в атмосфере постоянно растет в результате сжигания ископаемого топлива. Однако эта ситуация может сохраняться не более нескольких столетий, пока не будут исчерпаны запасы угля и нефти. После короткого периода потепления содержание углекислого газа вновь начнет падать.)

Внешняя граница НОЗ должна располагаться значительно дальше, чем считал Харт, — возможно, на расстоянии 1,5 а.е. от Солнца, т.е. где-то в районе орбиты Марса. Мы ставим предел в этом месте, так как планеты земного типа вряд ли могли сформироваться дальше.

Многие из тех механизмов отрицательной обратной связи, которые способствовали стабилизации земного климата на протяжении 4,5 млрд. лет, возможно, действовали бы и на другой планете такого же размера, расположенной дальше от Солнца. Единственная причина, почему замерз Марс, состоит в том, что он

слишком мал для существования на нем круговорота углекислого газа. Планета размером с Землю на орбите Марса должна, по нашей теории, иметь атмосферу с давлением CO_2 в несколько бар и средней температурой у поверхности выше точки замерзания воды. Такая атмосфера была бы непригодной для человеческого существования, но вполне приемлемой для некоторых иных форм жизни.

Когда Харт впервые выдвинул утверждение, что НОЗ заключена в чрезвычайно узкой полосе, возникло предположение, что, даже если вокруг других звезд и существуют планетные системы, шансы обнаружить похожие на Землю планеты очень малы. Наши расчеты приводят к противоположному выводу. Если другие планетные системы существуют, а по всей видимости это так, имеется большая вероятность найти в них планеты, пригодные для жизни. Являются ли какие-нибудь из них обитаемыми в действительности — этот вопрос остается открытым, но он не может больше отвергаться на основании предположения о климатической уникальности Земли.

связи с советскими учеными. Наличие таких контактов, указывает фон Хиппель, позволило Велихову договориться о том, чтобы Совет по защите природных ресурсов регистрировал взрывы химических боезарядов на советском ядерном испытательном полигоне в Семипалатинске; он также организовал визит американских конгрессменов в Советский Союз для осмотра ставшей предметом спора радиолокационной установки под Красноярском. Кеннет Л. Эдельман, бывший до недавних пор директором Американского агентства по контролю над вооружениями и разоружением, придерживается более сдержанного мнения: он считает, что Велихов «полющен» на переговорах и руководствуется желанием заполучить американскую технологию «звездных войн».

И все же и на словах, и на деле советская наука в последнее время продемонстрировала свое миролюбие. Во время встречи на высшем уровне в Вашингтоне Сагдеев публично обсуждал вопрос о необходимости устранения советского превосходства в обычных видах вооружения в Европе и высказал предположение о возможности 95%-ного сокращения стратегических ядерных вооружений. М.С. Горбачев призвал к созданию нового совместного комитета ученых; похоже, что такие идеи отражают стремление СССР уменьшить давление гонки вооружений, чтобы можно было больше сосредоточить усилия на решении экономических проблем.

Эта тема также обсуждалась во время встречи в верхах на устроенном в НАН совместном заседании советских академиков и группы американских ученых и представителей промышленности. Участники заседания заслушали выступление академика А.Г. Аганбегяна, одного из главных «архитекторов» перестройки, относительно планов того, как сделать науку, которая сейчас «серьезно отстает от требований жизни», основным источником развития советской экономики.

Потепление, которое наступило с гласностью, за последние два года дало начало ряду совместных инициатив советских и американских ученых. Двусторонние семинары академий наук обеих стран, прекратившиеся в свое время в знак протеста американской стороны против высылки академика А. Сахарова, недавно возобновились, и первое после перерыва заседание, посвященное теории конденсированного вещества, состоялось в декабре прошлого года в Калифорнийском университете в Санта-Барбара; в дальнейшем планируется проведение совместных семинаров по вопросам

Наука и общество

Советско-американские научные связи на новом этапе

СОСТОЯВШАЯСЯ в Вашингтоне встреча на высшем уровне показала возрастающую роль группы советских ученых, ставших главными советниками Генерального секретаря М.С. Горбачева по вопросам контроля над вооружениями. В нее входят академики Р.З. Сагдеев, директор Института космических исследований АН СССР, и Е.П. Велихов, вице-президент АН СССР. Оба они были инициаторами создания Комитета советских ученых в защиту мира, против ядерной угрозы, последовавшего за объявленной в марте 1983 г. президентом Рейганом программой «звездных войн». И тот и другой присутствовали на встрече в Вашингтоне. Как указывают некоторые обозреватели, включая М. Шульмана из Колумбийского университета, ученые при нынешнем советском руководстве имеют такое влияние, как никогда прежде.

У советских ученых существуют давние связи с коллегами из США. К числу американских организаций, которые продолжали поддерживать контакты даже во времена «холодных» отношений на правительственном уровне, относится Национальная академия наук (НАН) США. Находящийся в ведении этой академии Комитет по вопросам международной безопасности и контролю над вооружениями, возглавляемый Вольфгангом К.Г. Панофски, бывшим руководителем Станфордского центра линейных ускорителей, регулярно на протяжении пяти лет устраивает встречи с советскими партнерами. Эти встречи носят неофициальный характер, они не имеют статуса переговоров, однако обе стороны ставят в известность свои правительства.

«Думаю, что Горбачев прислушивается к мнению этой новой группы ученых», — заявил Франк фон Хиппель, профессор Принстонского университета, член Федерации американских ученых, организации, которая тоже поддерживает неофициальные

лазерной техники и фотохимии, физики плотных плазм, прогнозирования землетрясений и производства вакцин. НАН США предложила сотрудничество и в ряде других областей, включая участие американской стороны в советской программе по производству миллиона штук компьютеров для оснащения школ. Президент НАН США Франк Пресс отмечает, что совместно проводимые коммерческие мероприятия рассчитаны на использование советских достижений, находящихся «почти или непосредственно на переднем крае науки», и поэтому они выгодны обеим сторонам.

Одной из областей, где планируется осуществить совместную деятельность, является изучение влияния изменений в окружающей среде на глобальный климат. В области космических исследований планируется рассмотреть вопрос об организации совместного слежения за советской межпланетной станцией, планируемой СССР для запуска на спутник Марса Фобос с межпланетного корабля, который, возможно, будет направлен на Марс, и американской станцией «Марс Обсервер», предназначенной для исследования Марса с его орбиты, а также за американским межпланетным кораблем, который будет запущен на Венеру. В Вашингтоне академик Сагдеев вновь призвал американских коллег к совместному запуску корабля с человеком на Марс, одновременно выдвигая подчеркнуто дипломатическое предложение запустить «опечатанные», являющиеся собственностью США, научные приборы, с помощью советских ракет-носителей.

Временами все же дает еще о себе знать дуновение прохладных ветров как наследие холодной войны. Во время встречи медиков на высоком уровне, состоявшейся в Вашингтоне в апреле прошлого года в продолжение двустороннего сотрудничества, прерванного когда-то в связи с вводом советских войск в Афганистан, представители США выступили с протестом против появившихся тогда в советской прессе публикаций с обвинениями американцев в том, будто вирус СПИД был искусственно выведен в Форт-Детрике (шт. Мэриленд), и настаивали на прекращении таких сообщений, выдвинув это как условие для совместного проведения исследований по борьбе с этой болезнью. Представители официальных кругов сообщают, что с августа прошлого года подобные обвинения в советской прессе больше не появлялись.

То, что хорошо для науки, хорошо и для бизнеса. Некоторые американские компании, осуществляющие

свою деятельность на основе внедрения достижений науки, начали продуктивно использовать новые возможности открытости и перестройки. По словам Г. Шнейдермана, ответственного за научные исследования в фирме Monsanto Company, его фирма увеличила надои молока более чем на 25% за счет использования разработанного в СССР генетического препарата коровьего соматотропина. Он заявил, что фирма Monsanto рассматривает возможность крупного совместного начинания, цель которого — сообща добиться увеличения урожайности и улучшения других показателей зерновых культур с помощью генной инженерии.

Супертесты

ОБНАРУЖИТЬ признаки вирусной инфекции у больного или генетического заболевания у плода в утробе матери — все равно что искать иголку в стоге сена. Вирусный геном, включившийся в состав хромосомной ДНК организма-хозяина, или его собственные аномальные гены представляют лишь крохотную долю клеточной ДНК. Из-за того что содержание патогенной ДНК так мало, для анализа нужны большие количества ДНК. А чтобы получить несколько сотен клеток плода, приходится прибегать к небезразличным для его развития процедурам — брать образцы околоплодной жидкости или же ворсинок хориона. Последние достижения позволяют обойти эту проблему, существенно увеличивая, так сказать, число иголок в стоге сена.

Новый метод основан на полимеразной цепной реакции, разработанной за прошедшие полтора года Р. Сэйки, Г. Эрлихом и их сотрудниками из фирмы Cetus Corporation; его преимущество, помимо всего прочего в том, что он может быть автоматизирован. Синтезируются две короткие затравочные цепочки ДНК, способные связываться с концами последовательности ДНК, которую нужно умножить (каждая затравка связывается со своей цепью двойной спирали ДНК). Затем добавляется фермент — определенная ДНК-полимераза, — который синтезирует ДНК-копии обеих цепей, начиная от затравочных последовательностей и двигаясь в противоположных направлениях. Таким образом удваивается только сегмент ДНК, заключенный между затравками. Каждая новая копия в свою очередь копируется, так что количество нужной ДНК увеличивается экспоненциально. Предложено использовать термостабильную полимеразу, которая действует быстрее и обес-

печивает большую точность амплификации.

По словам Дж. Грэя из Ливерморской национальной лаборатории им. Лоуренса, в принципе можно провести анализ с ДНК даже из одной-единственной клетки, и процедура, которая прежде занимала недели, теперь длится 1—2 дня; это очень существенно для пренатальной диагностики. В Cetus Corporation на том же принципе разрабатываются несколько тестов на инфекционные заболевания. Один из них, например, предназначен для прямого выявления зараженности вирусом СПИДа; при этом нет необходимости в применении радиоактивных изотопов и избегаются ложноположительные и ложноотрицательные реакции, которые довольно часто бывают, когда проверка на СПИД ведется при помощи антител. В экспериментальном порядке клиническое применение этих методов начнется в текущем году.

То, что для диагностики будет достаточно совсем немного клеток, поддерживает оптимизм исследователей, ищущих пути выявления малых количеств клеток плода, которые, как считается, присутствуют в крови матери. Хотя вообще-то кровь ребенка в утробе матери отделена от ее крови, в ранний период беременности некоторые клетки плода могут проникать через плацентарный барьер. Если бы можно было их надежно выявлять, метод амплификации ДНК, благодаря которому для анализа требуется мало клеток, позволил бы осуществлять пренатальную диагностику по обычному анализу крови, взятой у матери, безо всякого риска для плода. Сейчас ведутся эксперименты с флуоресцентными мечеными антителами, которые должны связываться только с клетками плода, так что их можно будет отделять при помощи флуоресцентной оптики, автоматически. Как сказал Л. Герценберг из Медицинского центра Станфордского университета, стоявший у истоков этого метода, «важно подтвердить, что существует какое-то свойство, присущее только клеткам плода». Пока такое подтверждение не получено, но Д. Бьянчи из Медицинской школы Гарвардского университета более чем когда-либо полна уверенности, что антитела, которые она использует, могут выявлять незрелые эритроциты плода. С. Фишер из Медицинской школы Калифорнийского университета в Сан-Франциско ведет поиски другого типа клеток плода, проникающих через стенки кровеносных сосудов матки. Герценберг испытывает молекулярные зонды, связывающиеся непосредственно с хромосомами, а не с клеточной поверхностью.

Приспосабливающийся опоссум

Виргинский опоссум быстро приспосабливается к изменяющейся среде. Успех этого вида, возможно, отчасти обусловлен эффективной стратегией размножения, в том числе способностью регулировать соотношение полов в потомстве

СТИВЕН Н. ОСТАД

ПОСЛЕ ТОГО как в феврале 1500 г. испанский путешественник Виценте Яньес Пинсон и члены его экипажа нашли в Бразилии самку опоссума, в сумке которой лежали детеныши, европейцы не скупались на красноречие в своих рассказах об этих млекопитающих Нового Света и их эмбриональных новорожденных. Как это обычно бывает с экзотическими существами, описания опоссума поначалу строились на сравнении с хорошо знакомыми животными. Вот что писал об опоссуме в 1555 г. Ричард Иден в своем переводе "De Orbe Novo" Питера Мартира: «Чудовищное создание с мордой лисицы, хвостом марьшшки, ушами летучей мыши, руками человека и ногами гориллы, которое носит свое отродье на себе в наружном брюхе, похожем на большой мешок или сумку». Глава Джемстоунской колонии, капитан Джон Смит, который превратил путем транслитерации алгонкинское слово, означающее «белая тварь», в английское слово «опассум», выражался несколько более сдержанно, просто отмечая сходство опоссума с крысой, кошкой и свиньей.

Близкое знакомство, как ни странно, нередко порождает пренебрежение. Сегодня опоссум — одно из самых обычных млекопитающих пригородных районов США — не пользуется уважением. Так, специалист по диким животным Д. Аллен дает ему следующую уничижительную характеристику: «вялое зловонное создание, совершенно лишенное чувства собственного достоинства и пользующееся дурной репутацией». Поскольку опоссум относится к сумчатым, он считается примитивным, находящимся на более низкой ступени эволюции, чем настоящие, или плацентарные млекопитающие. У сумчатых при равных размерах температура тела и интенсивность метаболизма ниже, а головной мозг меньше, чем у плацентарных. Кроме того, у них чис-

ло хромосом в среднем меньше, яйцеклетка одета плотной оболочкой, а плацента (за исключением бандикутов) в зачаточном состоянии.

Тем не менее признать сумчатых нижней группой довольно трудно, особенно если речь идет об американских опоссумах. В самом деле, виргинский опоссум (*Didelphis virginiana*) — один из наиболее преуспевающих в экологическом отношении современных видов. В конце плейстоцена этот вид широко расселился по всей Северной Америке и продолжает распространяться до сих пор. Начиная с колониального периода опоссумы значительно расширили свой ареал, продвинувшись в восточной части США на 800 км к северу.

Только в нынешнем столетии, т. е. за очень короткое время, виргинский опоссум заселил западное побережье США, где вплоть до конца XIX в. он не встречался; причем популяция возникла там всего из нескольких особей. В 1906 г. некий охотник на пушного зверя впервые поймал дикого опоссума к западу от Скалистых гор. Осталось неясным, был ли этот экземпляр потомком особей, привезенных из шт. Миссури 20 годами ранее неким Руботтомом, или же какой-то другой тосковавший по родным краям переселенец из южных штатов выпустил на волю зверьков, живших у него в доме. Так или иначе, опоссумы на своей новой родине достигли процветания. В 1927 г. один зоолог писал: «Опоссумы столь плодовиты и столь широко распространились в Калифорнии, что теперь уже слишком поздно пытаться истребить этих опасных животных». Спустя 10 лет они заполнили все пространство от Калифорнийского залива до канадской границы.

ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ успех виргинского опоссума, несомненно, в значительной мере обусловлен его мутуалистическими взаимоотношениями с человеком. Человек обеспечи-

вает его различными подходящими местами для жилья (амбары, сараи и т. п.), а также постоянно снабжает едой — пищевыми отходами. Опоссумы, со своей стороны, служат человеку надежным, хотя и не слишком аппетитным источником пищи. Результаты археологических раскопок ясно свидетельствуют о том, что опоссумы составляли главный компонент рациона индейцев по всему Американскому континенту. К примеру, в настоящее время опоссумы обитают на ряде островов Карибского моря, где, судя по отсутствию остатков этих животных в палеонтологической летописи, их не было вплоть до заселения островов человеком; представляется вероятным, что люди завезли их сюда в качестве источника мясной пищи.

Но расширение ареала американских опоссумов — не просто следствие расширения ареала человека. Как показывают недавние исследования, эти животные отличаются необычайными приспособительными возможностями. Несмотря на небольшой мозг и некоторую вялость, они обладают замечательной способностью находить пищу и запоминать место, где они ее обнаружили. При проверке способности запомнить, какая дорожка ведет к кормушке, показатели опоссумов были лучше, чем у кошек, кур, собак, коз, свиней, кроликов, крыс и черепах (хотя и хуже, чем у человека).

Не менее удивительна высокая устойчивость опоссумов к яду гремушких змей подсемейства Crotalinae, к которому относятся также бушмейстер, или сурукуку, кайсака, или лабария, медноголовые и водяные щитомордники. Такой иммунитет представляет собой, по-видимому, адаптивную реакцию на существующую в среде угрозу, а не случайный «побочный продукт» физиологии опоссумов, потому что они не обладают устойчивостью к укусам большинства

змей Старого Света, таких как кобры и африканская гадюка. Невосприимчивость к яду гремучих змей не только спасает опоссумов от гибели в случае нападения со стороны этих рептилий, но и дает возможность безнаказанно поедать их.

В исследованиях, которые провели я и мои коллеги, обнаружилось, что опоссумы регулируют соотношение полов в потомстве так, чтобы достигать максимального успеха размножения при различных затратах со стороны родительских особей. Полученные данные, свидетельствующие о высокой эффективности размножения опоссумов в изменяющихся экологических условиях, помогают понять, каким образом у этого вида воз-

ник целый ряд сложных адаптаций, позволивших им столь успешно конкурировать со своими эволюционно более «продвинутыми» родичами среди млекопитающих.

ДИВЕРГЕНЦИЯ сумчатых и плацентарных млекопитающих произошла около 100 млн. лет назад, и на протяжении примерно 35 млн. лет в Северной Америке существовала богатая фауна сумчатых, представленная по крайней мере тремя семействами, пятью родами и 13 видами. Собственно, самые древние ископаемые остатки, несомненно принадлежащие сумчатым, найдены в Канаде, и преобладает (хотя и не общепринято) мнение, что сумчатые возникли в за-

падном полушарии, возможно, в Северной Америке. По неизвестным причинам 15 млн. лет назад все североамериканские сумчатые вымерли, тогда как в Южной Америке, в Австралии и на Новой Гвинее радиация этой группы успешно продолжалась. Ныне в Центральной и Южной Америке в целом обитает около 80 видов, т. е. более 30% всей мировой фауны сумчатых. Из них на долю семейства американских опоссумов Didelphidae приходится примерно 70 видов. (Это семейство не связано тесным родством с австралийскими семействами поссумов, или кускусков.) В настоящее время единственный представитель сумчатых в США — это виргинский опоссум, один из трех видов рода



ОПОССУМ безнаказанно нападает на полосатого гремучника (*Crotalus horridus*). Это сумчатое невосприимчиво к яду змей, принадлежащих к подсемейству ямкоголовых, и воспринимает их не как смертельных врагов, а как источник пищи. В некоторых районах Техаса до 6% рациона опоссума

составляет медноголовый щитомордник. Поскольку опоссумы устойчивы к яду змей Нового Света, но гибнут от укусов змей Старого Света, можно предполагать, что толерантность к яду возникла в процессе эволюции как специфическая адаптивная реакция на угрожающий фактор среды.

СЕВЕРНАЯ АМЕРИКА



ЮЖНАЯ АМЕРИКА

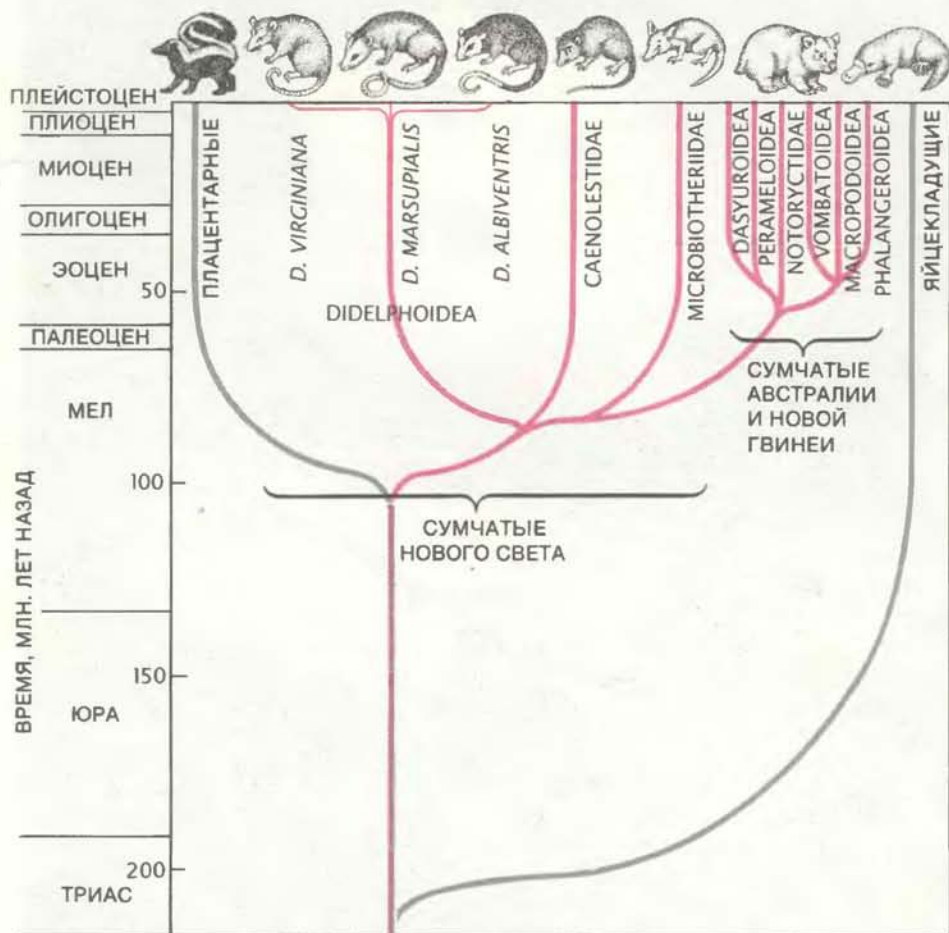


АРЕАЛ опоссумов рода *Didelphis* простирается от южной части Канады до юга Аргентины — это один из самых широко распространенных родов сумчатых на земном шаре. *D. albiventris* встречается главным образом в Южной Америке в областях с прохладным климатом. *D. marsupialis* обитает в теплых песистых районах в тропиках. *D. virginiana* в плейстоцене мигрировал в нетропические области Северной Америки. Он процветает в большинстве местообитаний, за исключением пустынь и гор высотой более 3000 м. С колониальных времен его ареал расширился на 800 км к северу, до границ Канады. В конце прошлого века этот вид был завезен переселенцами с востока на западное побережье.

Didelphis, который является одним из наиболее широко распространенных родов млекопитающих в западном полушарии, где он встречается от южной части Канады до южной части Аргентины, и самым широко распространенным родом сумчатых на земном шаре.

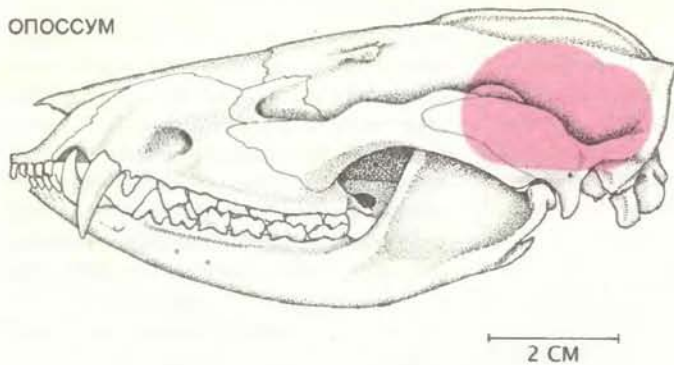
Опоссумы рода *Didelphis* морфологически очень сходны с некоторыми из древнейших вымерших сумчатых и потому их неправомерно называли живыми ископаемыми. (Благодаря тому что виргинский опоссум мало отличается от древних форм, его часто используют в качестве объекта при изучении функциональной морфологии примитивных млекопитающих.) Но при всей консервативности своей морфологии род *Didelphis* появился в ходе эволюции сравнительно недавно и в некоторых отношениях весьма высоко специализирован. Первые надежно идентифицируемые ископаемые остатки *Didelphis* обнаружены в южноамериканских отложениях возрастом около 4 млн. лет. А. Гарднер из Национального музея естественной истории на основании хромосомного анализа, палеонтологических и палеоклиматологических данных убедительно доказал, что виргинский опоссум — самый молодой из трех видов рода *Didelphis* и что он обособился от предкового вида *D. marsupialis* в течение последних 75 тыс. лет.

Как полагает Гарднер, *D. marsupialis* заселил Мексику 5—2 млн. лет назад, в плиоцене, когда Южная и Северная Америки вновь соединились. Однако, поскольку опоссумы не переносят засушливый или холодный климат, они не смогли проникнуть в ту область, которую занимают сейчас США. В плейстоцене, 1 млн. — 10 тыс. лет назад, когда повторные оледенения в Северной Америке привели к резким колебаниям климата в Мексике, *D. marsupialis* в периоды потепления распространялся по горным районам западной Мексики, но в холодные периоды бывал вынужден отступать в изолированные низменные долины. В одной из таких небольших изолированных популяций, вероятно, возникли крупные хромосомные перестройки, которые привели к генетической несовместимости с родительской популяцией; возможно, что эти мутации попутно облегчали адаптацию зарождающегося вида к более прохладному климату, что позволило ему продвинуться к северу. Примерно 4 тыс. лет назад виргинский опоссум распространился почти по всей территории, составляющей ныне восточную часть США. Гарднер обнаружил также факты, свидетельствующие об очень тесном инбридинге, что, навер-

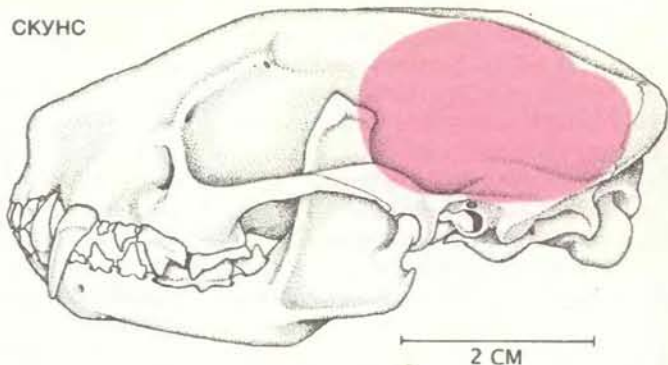


СУМЧАТЫЕ возникли примерно 100 млн. лет назад в Новом Свете. Группа Didelphoidea, к которой принадлежит виргинский опоссум, считается самым древним надсемейством, дожившим до наших дней. Морфологически опоссумы рода *Didelphis* очень сходны с древнейшими ископаемыми остатками сумчатых. *D. virginiana*, появившийся только 75 тыс. лет назад, — единственный вид сумчатых, распространившийся в нетропические районы Северной Америки.

ОПОССУМ



СКУНС



ЧЕРЕПНАЯ КОРОБКА и соответственно мозг у опоссума невелики по сравнению со скунсом, у которого примерно такие же размеры тела. Еще одна примитивная черта опоссума — множество зубов; ни у одного плацентарного мле-

копитающего не бывает больше трех пар резцов или коренных зубов, а у опоссума 5 пар резцов в верхней челюсти, 4 — в нижней и по 4 пары коренных в каждой челюсти.

ное, предопределило способность этого вида колонизировать новые местообитания, потому что благодаря толерантности к инбридингу всего несколько особей могли основать популяцию.

ОПОССУМЫ обладают важным свойством, вероятно, способствующим экологической гибкости, — высокой эффективностью размножения. Это свойство проявляется еще до зачатия, выражаясь в необычайно эффективном использовании спермы. Самец вводит самке всего около 3 млн. сперматозоидов, из которых примерно 5% доходит до места, где происходит оплодотворение; для сравнения укажем, что кролик, осеменяя самку, вводит ей примерно 150 млн. сперматозоидов, а до места оплодотворения доходит лишь 0,01% из них. Эффективность спермы опоссума обусловлена, возможно, парным соединением сперматозоидов, что свойственно американским сумчатым и, по-видимому, не встречается ни у каких других позвоночных. У *Didelphis* сперматозоиды, еще находясь в семенниках, сближаются попарно, располагаясь бок о бок, и по половым путям самки они плывут вместе, а разделяются только в яйцевом. По мнению некоторых исследователей, такое соединение в пары сильно облегчает перемещение сперматозоидов по половым путям и обеспечивает им высокую выживаемость.

У сумчатых беременность гораздо короче, чем у плацентарных млекопитающих. Их новорожденные — это в сущности те же зародыши, но способные передвигаться, и большая часть развития происходит у них вне тела матери, часто в специальной кожной складке на животе — сумке. Например, опоссумы рода *Didelphis* вынашивают плод в течение примерно 13 дней; только что родившийся дете-

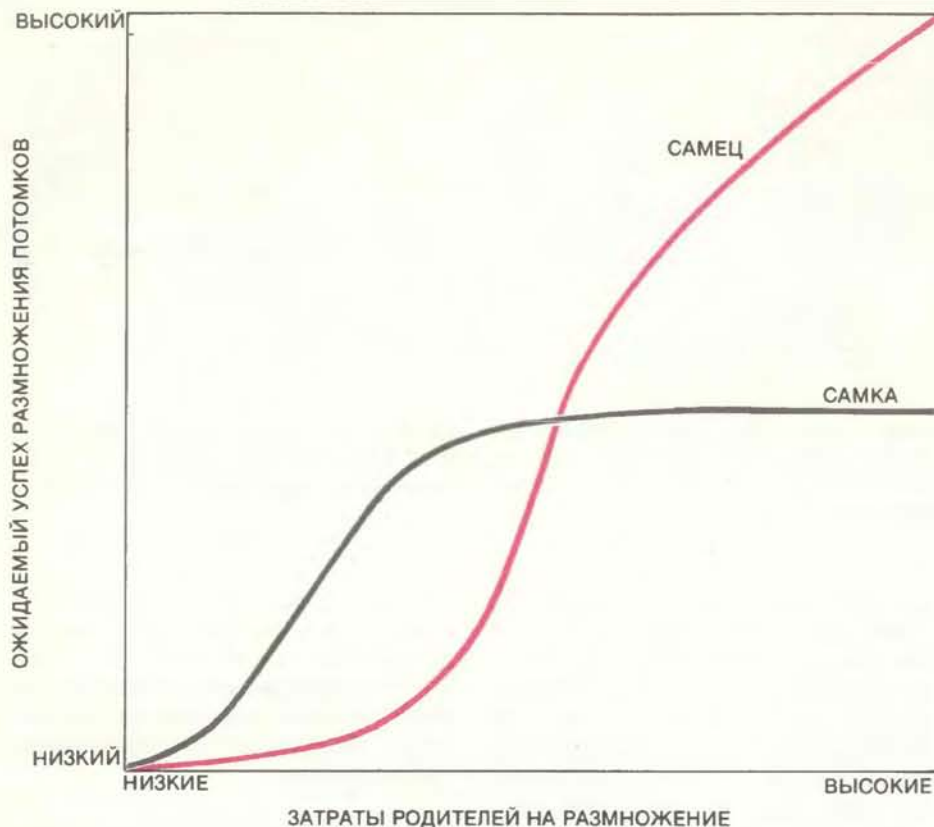
ныш весит менее 0,2 г, что составляет 0,0001 веса тела матери. Для сравнения укажем, что у полосатого скунса (североамериканское плацентарное млекопитающее примерно таких же размеров, как опоссум) беременность длится 65 дней и детеныш при рождении весит 33 г, т. е. в 165 раз больше, чем новорожденный опоссум.

Опоссумы рождаются глухими и слепыми, с зачаточными задними конечностями и хвостом. Зато передние конечности у них хорошо развиты и снабжены когтями, которые затем отпадают. Когти помогают новорожденному перебраться в сумку, для чего нужно преодолеть самостоятельно, без помощи со стороны матери, расстояние в 4—5 см; при этом он совершает нечто вроде плавательных движений, которые иногда называют австралийским кролем. Самка виргинского опоссума рождает больше детенышей, чем может выкормить: у нее 13 сосков, а в помете бывает в среднем 22 детеныша, но выживает обычно 6—8.

В течение первых 60 дней после рождения детеныш прочно прикреплен к материнскому соску, который вздувается у него во рту, не давая ему отпасть. В возрасте 70 дней он может выпускать и вновь захватывать сосок и самостоятельно перемещаться на короткие расстояния. Мать кормит детенышей в течение примерно 100 дней, после чего ее контакты с ними практически прекращаются. На то, чтобы произвести и вырастить один помёт, самка затрачивает в целом — от зачатия до окончания кормления — 112 дней. У полосатого скунса от зачатия до окончания кормления проходит 121 день, т. е. примерно столько же времени; однако если молодые опоссумы, переставшие кормиться материнским молоком, уже совершенно самостоятельны, то молодые скунсы остаются при матери еще месяц или дольше. Ранняя незави-

симость детенышей дает возможность опоссумам приносить по два, а иногда и по три помёта в год, тогда как у скунсов бывает всего один помёт. Таким образом, опоссумы ежегодно затрачивают на размножение больше усилий.

ПОСКОЛЬКУ развитие у опоссумов завершается вне утробы матери, в сумке, так что возможны прямые наблюдения и разного рода вмешательства, М. Санкуист из Университета шт. Флорида и я решили, что опоссумы — превосходные объекты для изучения того, как животные распределяют энергию, затрачиваемую на размножение. В частности, нас интересовала одна из существующих сейчас гипотез, предсказывающая, что животные регулируют соотношения полов в потомстве в зависимости от абсолютного количества энергии, которое они в состоянии вложить в размножение. Согласно этой гипотезе, которая была предложена в начале 1970-х годов Р. Трайверсом и Д. Уиллардом, работавшими в Гарвардском университете, у млекопитающих самки, способные к большим затратам на каждого потомка, должны производить главным образом самцов, а самки, способные лишь к небольшим затратам, — главным образом самок. В основе гипотезы лежит допущение, что размеры родительского вклада сильнее влияют на приспособленность потомков мужского пола, чем женского. Так как у млекопитающих самцы, как правило, имеют не одного, а несколько брачных партнеров и не участвуют в заботах о потомстве, самки обычно не страдают от недостатка брачных партнеров. Поэтому почти все самки имеют шансы участвовать в размножении, но ни одна из них не оставляет такого числа потомков, как наиболее удачливые самцы. Напротив, слабые самцы могут оказаться совсем без брачных партнеров



ГИПОТЕЗА О СООТНОШЕНИИ ПОЛОВ в потомстве исходит из того, что у полигинных млекопитающих успех размножения варьирует сильнее среди самцов, чем среди самок: сильные самцы спариваются со многими самками, а слабые могут остаться вовсе без брачного партнера, тогда как почти всем самкам удается спариться. Поэтому, если величина родительского вклада влияет на репродуктивные возможности потомков, то самки, способные к большим затратам на размножение, должны производить больше особей мужского пола, чем женского, а в потомстве самок, способных к меньшим затратам, должны преобладать особи женского пола.

и не оставят ни одного потомка. Таким образом, если считать, что величина родительских затрат влияет на репродуктивные возможности потомков, то среди них самцы должны больше, чем самки, выигрывать от высоких затрат и терпеть ущерб от низких. Поэтому самки, способные к высоким затратам, будут производить преимущественно самцов, а способные лишь к низким затратам — самок.

Несмотря на правдоподобность этих рассуждений, есть причины, заставляющие сомневаться в способности млекопитающих регулировать соотношение полов в потомстве. Во-первых, трудно представить себе механизм такой регуляции. Пол потомка зависит от того, каким сперматозоидом оплодотворена данная яйцеклетка — несущим X- или же Y-хромосому, и нет никаких данных, свидетельствующих о способности самца изменять соотношение этих сперматозоидов в зависимости от самки, с которой он спаривается. Во-вторых, домашний скот, который обеспечен хорошим кормом и забо-

той, предположительно должен быть способен к гораздо более высоким затратам на размножение, чем родственные дикие животные, а между тем в большинстве случаев соотношение полов среди потомков сбалансировано. Но ведь бывает, что верная научная теория создается прежде, чем открывают соответствующие механизмы (пример тому — теория дрейфа континентов). А поскольку одомашненные животные на протяжении очень долгого времени подвергались искусственному отбору, смысл нынешних тенденций в соотношении полов в потомстве у них неясен.

С целью проверить описанную выше гипотезу, мы снабжали самок опоссумов в природных условиях дополнительным кормом в надежде, что какие-то из них станут способными к необычайно большим затратам на размножение. На подопытных самок были надеты ошейники с радиомаяками, так что мы могли днем обнаруживать их убежища. С наступлением сумерек мы оставляли у входа в убежище корм, с тем чтобы животное, вылезая на ночную кормежку,

могло сразу же поесть. Контролем служила другая группа самок, также снабженная ошейниками с радиомаяками; они жили в том же местобитании, но не получали дополнительного корма. В подопытной группе было 20 животных, а в контрольной 18.

Результаты оказались совершенно четкими: в потомстве контрольных самок соотношение полов было сбалансированным, а животные, получившие дополнительный корм, производили больше самцов, чем самок. Число детенышей в помете в обеих группах было примерно одинаковым. Но каждый отдельный детеныш у подопытных животных был крупнее, чем у контрольных, т. е. родительский вклад у самок, которых подкармливали, был действительно выше. Как показали результаты отлова молодых особей, среди тех, чьи матери получали лишнее питание, число самцов увеличилось больше, чем число самок, по сравнению с потомками контрольных животных. Это свидетельствует о том, что от добавочных родительских затрат самцы выигрывают больше, чем самки.

Мы не проверяли в специальных экспериментах, действительно ли самки, способные лишь к малым затратам на размножение, приносят преимущественно потомков женского пола, но, судя по некоторым нашим наблюдениям, дело обстоит именно так. В природных условиях продолжительность жизни большинства опоссумов такова, что на отдельную особь приходится только один сезон размножения. А у тех немногих особей, которые доживают до следующего года, обнаруживаются такие признаки одряхления, как катаракты, потеря веса и нарушение координации движений. В колониях виргинского опоссума, содержащихся в неволе, у самок на второй год появляются также признаки атрофии в органах размножения, сокращается число детенышей в помете, повышается пренатальная смертность. Эти факты позволяют считать, что на второй год самки не способны к таким затратам на размножение, как в первый год. Наша выборка самок второго года была невелика, потому что они редки, но тем не менее за несколько лет нам удалось выловить 19 таких животных. Среди детенышей, находившихся в их сумках, сдвиг в сторону самок был даже сильнее, чем в сторону самцов в потомстве животных, получавших дополнительный корм.

ИЗУЧЕНИЕ самок второго года выявило еще одну черту опоссумов: среди млекопитающих такого же размера они относятся к числу самых

«короткоживущих». В Венесуэле из 78 половозрелых самок, снабженных радиомаяками, 18% дожили до второго сезона размножения и участвовали в нем, 1,2% — до третьего сезона и ни одна не дожила до четвертого. По данным Санкуиста, изучавшего виргинского опоссума во Флориде, 8,3% самок дожили до второго сезона размножения, 3% — до третьего и ни одна — до четвертого. Даже в размножающихся колониях, в которых постоянно ведется строгий учет, средняя продолжительность жизни составила примерно два года, а максимальная — 3—4 года. Необычно у опоссумов также то, что у особей старшего возраста наблюдаются очевидные признаки раннего старения в природных условиях, что считается редким явлением (впрочем, общепринятое мнение по этому поводу, может быть, неверно, поскольку старение млекопитающих в природных условиях почти не изучалось).

Существуют два традиционных подхода к изучению старения. Физиологический подход направлен на выявление непосредственных цитологических и биохимических механизмов, лежащих в основе самого процесса старения. Эволюционный подход стремится выяснить, какую роль играет в старении естественный отбор, и получить соответствующие данные путем сопоставления скоростей старения у разных видов или у одного и того же вида в различных условиях, а также путем анализа генетически обусловленных корреляций между скоростью старения и другими характеристиками жизненного цикла, например скоростью размножения.

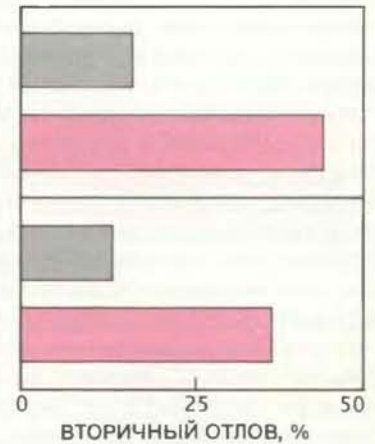
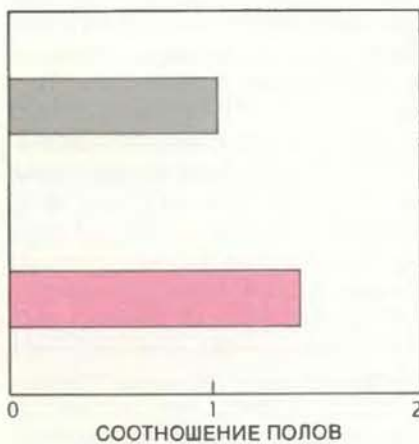
Общая эволюционная теория старения была впервые сформулирована П. Медавара в 1940-х годах, а затем

в 50-х годах расширена Дж. Уильямсом из Университета шт. Нью-Йорк в Стони-Брук. Медавара отмечал, что, если даже животные с возрастом не слабеют, влияние естественного отбора должно уменьшаться по мере старения особи, поскольку при этом возрастает вероятность случайной гибели, т. е. гибели от внешних для самок животного причин, таких как хищники или инфекционные заболевания. В результате вредные мутации, действующие на поздних стадиях жизненного цикла, будут подвергаться только слабому отбору. Медавара указывал также, что отбор может благоприятствовать мутациям, способствующим раннему размножению, даже если эти мутации одновременно повышают вероятность преждевременной смерти.

Оба аспекта этой гипотезы можно осознать, рассмотрев простой пример. Представим себе популяцию особей, которые не стареют. Это означает, что вероятности смерти и успешного размножения постоянны во времени. Если вероятность случайной гибели составляет 10% в год, то спустя 20 лет от исходной популяции останется в живых лишь 12% особей, а спустя 40 лет — лишь чуть больше 1%. Любая вредная мутация, проявляющаяся в позднем возрасте, будет влиять лишь на небольшую часть популяции, а, скажем, мутация, вызывающая мгновенную смерть в возрасте 60 лет, почти не будет элиминироваться отбором. Следовательно, ничто не сможет воспрепятствовать накоплению летальных или ослабляющих организм мутаций, действующих в позднем возрасте. Если же частота случайной гибели выше, то могут накапливаться мутации, летальный эффект которых проявляется раньше.

В зависимости от уровня случайной гибели усиление раннего размножения также может оказаться эволюционно выгодным, даже если за это усиление неизбежно придется расплачиваться снижением выживаемости. Пусть, например, уровень случайной гибели составляет 40% в год, а каждая особь начиная с годовалого возраста ежегодно производит по одному потомку; тогда одна особь на протяжении своей жизни будет приносить в среднем по 1,5 потомка. Представим себе далее, что возникла мутация, которая повышает среднюю продуктивность до двух потомков в год начиная с годовалого возраста, но что такое резкое усиление раннего размножения влечет за собой удвоение вероятности гибели в пострепродуктивный период. Эти мутантные особи будут приносить чуть больше 1,7 потомков в год и таким образом в конце концов заменят исходную популяцию. И снова, чем выше случайная смертность, тем большее преимущество дает интенсивное и раннее размножение. Итак, в общем следует ожидать, что популяции, для которых характерна высокая смертность от случайных причин, должны отличаться высокой репродуктивной активностью в раннем возрасте и ускоренным старением, тогда как в популяциях с низкой случайной смертностью будет наблюдаться обратная картина.

Главная практическая трудность при проверке этой гипотезы в природных популяциях состоит в том, чтобы найти подходящее мерило старения. Продолжительность жизни не годится на эту роль, потому что мы не можем отличить случайную гибель от смерти в результате старения. В идеале нужна какая-то физиологическая



ЭКСПЕРИМЕНТЫ с дополнительным кормлением показали, что потомки самок, получавших добавочный корм (цветные полоски), были крупнее и доля особей мужского пола среди них была больше, чем в потомстве контрольной группы животных (серые полоски). При вторичном отлове

молодняка выяснилось, что в потомстве подопытных животных по сравнению с потомством контрольных особей число самцов возросло больше, чем число самок; это позволяет считать, что самцы больше выиграли от повышения родительского вклада.

мера старения, которая была бы применима к особи любого возраста и к одной и той же особи в разном возрасте. У млекопитающих такой мерой может служить изменение физических свойств волокон, образующих хвостовое сухожилие. Сухожилие состоит в основном из пучков параллельных коллагеновых волокон. С возрастом прочность коллагена повышается, а его растворимость и гибкость понижаются, причем эти изменения носят закономерный характер. Кроме того, на скорости старения коллагена сказываются такие факторы, как недостаточное питание и введение в организм гормонов, которые, как известно, влияют на старение животных.

В начале 60-х годов Г. Элден и Р. Баусек из Медицинского института Говарда Хьюза разработали удобный метод, позволяющий измерять старение коллагена хвоста. Отдельные волокна коллагена помещают в концентрированный раствор мочевины при определенной температуре, подвешивают на них стандартный груз и регистрируют время, когда волокна разрываются. Показано, что у лабораторных грызунов это время увеличивалось в геометрической прогрессии с возрастом животного. Для таких измерений в полевых условиях диких животных отлавливают и под местной анестезией извлекают из хвоста пучки волокон; затем животное отпускают на волю. Проплавав это несколько раз с одной и той же особью, можно вычислить скорость старения коллагена, а затем сопоставить данные, полученные для ряда особей.

В моей лаборатории в Гарвардском университете мы рассматривали две гипотезы: 1) опоссумы стареют быстро, потому что раннее размножение сопряжено с большими затратами; 2) быстрое старение объясняется чрезвычайно высокой смертностью от случайных причин. В настоящее время мы проводим исследования, в которых искусственно снижаем затраты на размножение, изменяя размер помета, с тем чтобы выяснить, как это влияет на старение коллагена. Поскольку до родов родительский вклад незначителен, затраты на размножение в целом можно резко изменять, пересаживая детенышей от одних самок другим и создавая таким образом пометы самого разного размера. Уровень смертности от случайных причин мы изучаем, сравнивая старение коллагена, размножение и продолжительность жизни в основной наблюдаемой нами популяции опоссумов в районе электростанции на реке Саванна (шт. Южная Каролина) и в

популяции на острове Сапело (шт. Джорджия), где большая часть нападающих на опоссумов хищников отсутствует и, следовательно, случайная смертность должна быть ниже. Сейчас мы находимся на стадии предварительных исследований. Пока удалось убедиться, что коллагеновый метод позволяет выявлять различия в возрасте опоссумов вплоть до двух месяцев, что можно успешно пересаживать детенышей и что островная популяция генетически изолирована уже по крайней мере несколько тысяч лет.

КАК ЭТО ни парадоксально, именно экологический успех опоссумов рода *Didelphis* послужил косвенной причиной в общем пренебрежи-

тельного отношения к этим животным. Такое отношение, наверное, изменится хотя бы среди биологов, ведь благодаря опоссумам стали понятны важные аспекты биологии млекопитающих. Опоссумы — превосходный объект исследований, потому что за ними легко наблюдать и проводить на них эксперименты и в природе, и в лаборатории. Они дают возможность изучать как широкие экологические и эволюционные проблемы, так и отдельные тонкие механизмы. Быть может, в будущем опоссумы помогут вскрыть механизмы, посредством которых экологические факторы влияют на соотношение полов и скорость старения, а физиологи станут использовать их для изучения процесса старения и устойчивости к ядам.

Наука и общество

Генотерапия — дело решенное?

В БЛИЖАЙШЕЕ время исследователи из Национальных институтов здоровья намерены обратиться за разрешением лечить безнадежное наследственное заболевание путем введения больному нового функционального гена. Этот вопрос обсуждался неофициально в декабре 1987 г. с координационным комитетом, представляющим собой рабочую группу Консультативного комитета по рекомбинантным ДНК — наиболее значительного среди органов, облеченных властью давать ответ на конкретные предложения о применении метода генетической терапии. Таким образом, когда метод будет окончательно готов к практическому применению и появится подходящий пациент, можно будет приступить к лечению без проволочек и сомнений.

Предлагается применять генотерапию как последнее средство в случае так называемых тяжелых комбинированных иммунодефицитов (сокращенно SCID — от англ. severe combined immune deficiency disease), которыми в США поражены до 40 новорожденных в год. Если метод принесет успех применительно к SCID, его имеет смысл использовать и для лечения других наследственных заболеваний. Причиной того вида SCID, который предполагается лечить путем генотерапии, является дефект гена, кодирующего фермент аденозиндезаминазу.

Недостаточность этого фермента мешает развитию иммунной системы, и в отсутствие лечения больной в пределах двух лет неизбежно умирает.

По методу У. Андерсона и его коллег из Национальных институтов здоровья у больного берутся клетки костного мозга и заражаются модифицированным ретровирусом, в геном которого включен человеческий ген аденозиндезаминазы. Ретровирус модифицирован так, что он сам не может воспроизводиться, благодаря чему не распространяется за пределы тех первых клеток, в которые проникли вирусные частицы. Зараженные клетки вновь вводятся больному. Исследователи надеются, что ДНК-копия гена аденозиндезаминазы стабильно включится в клеточный геном и будет функционировать, обеспечивая образование нормального фермента.

Пока приходится именно надеяться. Хотя в опытах на мышах такая процедура дала хорошие результаты, в случае обезьян вирус проникал лишь в одну из ста клеток и только у двух из пяти животных признаки активности человеческого гена наблюдались продолжительное время. Как полагают критически настроенные исследователи, это означает, что заражается только последнее поколение костномозговых клеток, а не стволовые клетки, которые дают им начало. Остается под вопросом и безопасность метода. В экспериментах на животных негативных эффектов как буд-

то не наблюдалось, но нельзя сбрасывать со счета, что вирусный геном содержит последовательности, способствующие генной экспрессии и поэтому могущие активировать имеющийся в клетке онкоген, до тех пор не проявлявший себя, и таким образом инициировать рак. Серьезные опасения вызывает также тот факт, что в препарате вируса, предназначенном для введения в костномозговые клетки, все же есть вирусные частицы, способные к репликации: их примерно одна на тысячу. А значит, в принципе вероятна инфекция и человек становится источником вируса, возможно, обладающего опасными свойствами.

Под давлением этих соображений координационный комитет весьма осторожно ответил на представленный Андерсоном неофициальный доклад о новом методе. Сотрудник Уайтхедского института медико-биологических исследований при Массачусетском технологическом институте Р. Маллиган, являющийся членом координационного комитета, сказал, что «пока нет и в обозримом будущем не предвидится доказательств того, что метод действительно годится для лечения человека». Андерсон рассчитывает, что ему удастся снять такие сомнения. Он планирует добиться уменьшения способности вируса к репликации и, кроме того, ведет эксперименты с культурами клеток человека с целью доказать, что вирус заражает стволовые клетки. По его мнению, если никаких нежелательных эффектов не обнаружится, в ближайшие месяцы можно выступить с официальным предложением о применении метода. Как считает Маллиган, с научной точки зрения безрассудно сейчас применять генотерапию, но все же он допускает, что этот способ лечения этически оправдан в тех случаях, когда у больного нет никакой другой надежды.

Свет и вещество

НЕОБЫЧНОСТЬ мира квантовой механики стала теперь еще более ощутимой. Согласно квантовомеханическим представлениям, свет ведет себя так, как если бы в некоторых ситуациях он состоял из частиц, а в некоторых — из волн. Основные составляющие вещества также проявляют свойства частиц или волн в зависимости от того, как интерпретировать наблюдения. Это фундаментальное сходство природы света и природы вещества стало еще более очевидным в последнее время благодаря трем экспериментам, в которых пучки ато-

мов преломлялись или отражались светом точно так же, как свет обычно преломляется или отражается кристаллами, призмами и зеркалами.

Воздействие света на атомные пучки основано на так называемой градиентной силе, которая возникает при взаимодействии атомов с градиентом (изменением с расстоянием) интенсивности переменного электрического поля. Электрическая компонента лазерного луча может быть использована для того, чтобы оказать воздействие этой силой, особенно когда пучок отражается назад в направлении, откуда он падал. Пучки, распространяющиеся навстречу друг другу, взаимодействуют таким образом, что образуют стоячую световую волну, которая имеет характерное пространственное распределение интенсивности (амплитуды) — чередование узлов (нулей) и кучностей (максимумов).

Воспользовавшись тем, что такая стоячая волна образует постоянные сильные градиенты электрического поля, группе ученых из Массачусетского технологического института, как они сообщают в журнале «Physical Review A», удалось осуществить рассеивание пучка атомов кремния при пересечении им стоячей световой волны под углом 90° . Контролируя угол пересечения, а также форму и длину волны, они показали, что пучок может рассеиваться только в некоторых направлениях.

Используя такую же установку, группа исследователей из Высшей нормальной школы и Колледж-де-Франс в Париже обнаружила, что пучок атомов взаимодействует со светом в основном так же, как с веществом. В «Physical Review Letters» они сообщают, что направляли пучок атомов вдоль узлов стоячей световой волны, как при его распространении между рядами атомов в кристалле.

Наконец группа ученых из Института спектроскопии АН СССР сообщает в «Письмах в журнал экспериментальной и теоретической физики», что им удалось отразить пучок атомов натрия от светового «зеркала»*. Зеркало представляло собой градиент электрического поля, которое проникло за пределы кварцевой пластинки, где отражался луч лазера. Ученые обнаружили, что пучок атомов можно отразить, если он касается градиента лазерного поля вблизи поверхности пластинки.

* Имеется в виду работа В.И. Балыкина, В.С. Летохова и других ученых «Отражение атомного пучка от градиента светового поля» («Письма в ЖЭТФ», 1987, т. 45, с. 282). — Прим. ред.

Издательство МИР предлагает:

КЛОНИРОВАНИЕ ДНК. МЕТОДЫ

Под ред. Д. Гловера
Перевод с английского

Сборник новейших методов по генной инженерии, написанный выдающимися специалистами Великобритании, США, ФРГ, Италии и удачно дополняющий современным материалом ранее изданное руководство по молекулярному клонированию (Маниатис Т., Фрич Э., Сэмбрук Дж. «Молекулярное клонирование», М.: Мир, 1984).

Описано клонирование ДНК в клетках *E. coli* и в других грамотрицательных бактериях; в клетках млекопитающих, растений и в зародышах дрозофилы.

Для молекулярных биологов, генетиков, биотехнологов.
1988, 37 л. Цена 4 р. 30 к.

Г. Хорн ПАМЯТЬ, ИМПРИНТИНГ И МОЗГ. ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ

Перевод с английского

Монография известного английского нейрофизиолога — исчерпывающее по полноте обобщение данных, касающихся механизмов импринтинга. На примере этой формы поведения анализируются структурные и физиологические основы памяти и обучения.

Для физиологов и биохимиков — специалистов по высшей нервной деятельности, психологов, этологов.

1988, 25 л. Цена 4 р.



Электропроводящие полимеры

Привлекательные свойства пластмасс хорошо известны — они дешевы, долговечны, легки и универсальны, но их электропроводность обычно во внимание не принимается.

Полимеры нового поколения нарушают это традиционное представление

РИЧАРД Б. КАНЕР, ЭЛАН Г. МАКДАЙРМИД

ДВАДЦАТЬ ЛЕТ назад заголовок этой статьи вызвал бы недоумение. По представлениям того времени считалось, что пластмассы могут быть только диэлектриками. Мысль о том, что полимер может проводить электрический ток не хуже меди, тогда казалась абсурдной. А между тем в последние годы такое свойство удалось получить у обычных полимеров путем простой модификации их химической структуры. Получившие название «электропроводящие полимеры», эти новые материалы сочетают в себе электрические свойства металлов с преимуществами пластмасс. В 30-е и 40-е годы об этом можно было только мечтать.

Чтобы полимер проводил электрический ток, в него путем допирования нужно ввести небольшое количество определенных химических веществ. Технология допирования полимеров намного проще той, которая используется при легировании полупроводников, например кремния; фактически методы получения электропроводящих полимеров, равно как и методы их допирования, существовали задолго до того, как ученые поняли, что полимеры можно сделать электропроводящими. Стоило только научно показать потенциальную возможность полимеров проводить электрический ток, как идея о реализации этой возможности завладела умами многих исследователей. В 1977 г. был получен первый полимер — проводник; в 1981 г. был продемонстрирован первый элемент питания с электродами из полимера. В 1987 г. появились полимеры, проводимость которых не хуже, чем у меди, а совсем недавно выпущены в продажу перезаряжаемые батарейки из полимеров.

Последние достижения свидетельствуют о возможности получать такие полимеры, которые проводят электрический ток лучше, чем медь; во всяком случае лучше, чем любой

другой материал при комнатной температуре. Такие полимеры можно даже использовать вместо медных проводов там, где в качестве лимитирующего фактора выступает масса, например в самолетах. Электропроводящие полимеры, кроме того, обладают необычными оптическими, механическими и химическими свойствами, благодаря которым эти материалы могут эффективно использоваться в ряде новых областей, где медь по разным соображениям применить нельзя. Например, тонкие полимерные пленки на стеклах окон могут поглощать солнечный свет, причем степень затенения можно регулировать подводимым к пленке напряжением. Искусственные нервные волокна из электропроводящих полимеров, которые фактически инертны, можно даже имплантировать в живую ткань.

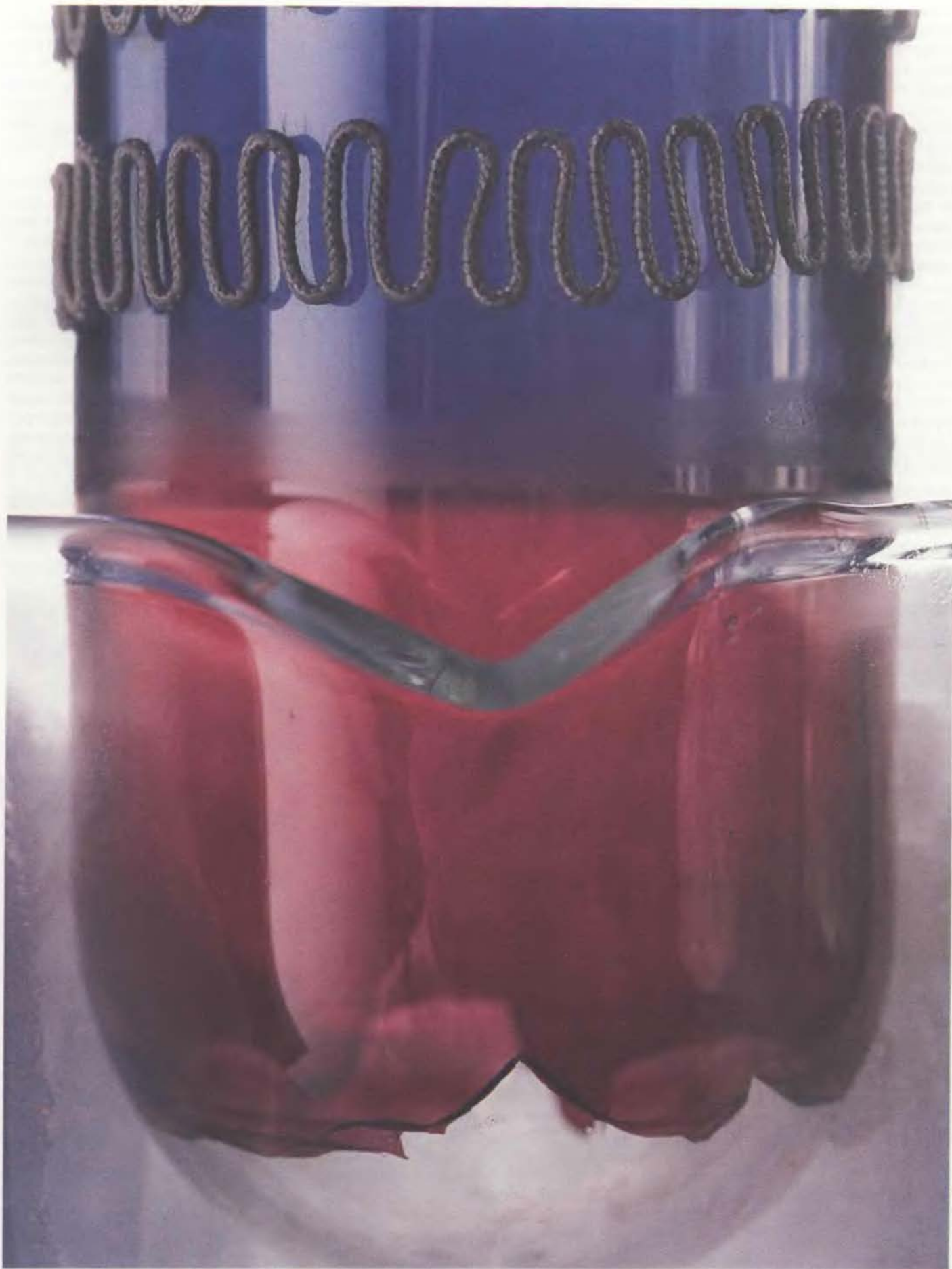
ОТКРЫТИЕ электропроводящих полимеров произошло случайно. В начале 70-х годов аспирант лаборатории Хидеки Сиракавы при Токийском технологическом институте пытался получить полимер под названием «полиацетилен» из обычного ацетилена — горючего газа, используемого при сварке. Этот полимер в виде порошка темного цвета впервые был получен в 1955 г., но о нем мало что было известно. Вместо темного порошка аспирант из лаборатории Сиракавы получил блестящую серебристую пленку, похожую на алюминиевую фольгу, но эластичную. Просматривая свои записи, аспирант заметил допущенную ошибку: оказалось, что он добавил в 1000 раз больше катализатора, чем требовалось по методике. То, что он получил, было, конечно, полиацетиленом, но по форме отличным от полиацетилена, известного ранее.

Когда в 1976 г. один из нас (Макдайдрид) посетил лабораторию Сиракавы, там в то время приступили к

изучению возможности получения так называемых синтетических металлов, и исследование свойств полиацетилена в его новой форме было одной из целей ученых лаборатории. Впоследствии Сиракава провел год в Пенсильванском университете, где вместе с Макдайдридом и его коллегой А. Хигером изучал свойства нового полимера. Сотрудничество принесло новые плоды, когда трое исследователей попытались допировать этот материал иодом. Эластичная серебристая пленка превратилась в золотистого цвета лист, похожий на металлический. Электропроводность полиацетилена стала в миллиард раз больше!

С тех пор обнаружено, что около десяти других полимеров и их производных претерпевают такое же случайное превращение в результате допирования. Все они состоят в основном из атомов углерода и водорода, упорядоченных в «повторяющиеся мономерные элементарные звенья», которые, будучи связанными вместе, образуют полимер (см. рисунок на с. 52). Некоторые повторяющиеся звенья содержат атомы азота или серы, а также атомы углерода и водорода. Полиацетилен — простейший из электропроводящих полимеров — представляет собой непрерывную углеродную цепь, в которой каждый атом углерода связан с атомом водорода. Атомы углерода соединены чередующимися одинарными и двойными связями, которые попеременно сменяют друг друга вдоль углеродного скелета, что в результате создает некую промежуточную связь между одинарной и двойной (см. рисунок на с. 53). Такая сопряженная структура типична для полимеров, проводящих электрический ток.

Несмотря на схожесть химических структур некоторых полимеров, они могут обладать далеко не одинаковыми свойствами. Чувствительность к



ИЗМЕНЕНИЕ ЦВЕТА в процессе синтеза полиацетилена — полимера, который после допирования становится проводником электрического тока. Когда тонкая пленка начинает полимеризоваться на стенках стеклянного реактора,

она имеет красный цвет; затем при нагревании пленка становится синей. Сухой лед (внизу) и нагревательный элемент (вверху) создают разность температур, чтобы показать переход одного оттенка в другой.

температуре и действию воздуха, растворимость, легкость, с которой они плавятся, а также способность проводить электрический ток у них различны и зависят от типа полимера и метода, с помощью которого он синтезирован. Благодаря особому сочетанию свойств такие полимеры, как полипарафенилен, политиофен, полипиррол и полианилин, привлекли к себе большое внимание, но полиацетилен все же считается прототипом всех электропроводящих полимеров, поэтому он изучается наиболее пристально. У полиацетилена обнаружена самая высокая электропроводность по сравнению с другими полимерами: в прошлом году исследователи западногерманской фирмы BASF объявили, что путем допирования высококачественного полиацетилена им удалось получить материал, электропроводность которого примерно в четыре раза ниже на единицу объема и в два

раза выше на единицу массы, чем у меди. Какой же молекулярный механизм обеспечил такие замечательные свойства?

У УЧЕНЫХ пока нет единого мнения относительно того, какие именно изменения происходят в полимере в результате допирования, но некоторые основополагающие аспекты этого механизма известны. Удельную проводимость (электропроводность) измеряют в единицах (См/см)^{*}, обратных единице удельного сопротивления (Ом·см). Различие проводимостей материалов, используемых в качестве изоляторов (диэлектриков) и в качестве проводников, огромна: у хо-

* В СССР удельную электропроводность принято измерять в единицах (Ом⁻¹·см⁻¹) или в системе СИ в единицах (См/м); сименс (См) — величина, обратная ому (Ом). — Прим. перев.

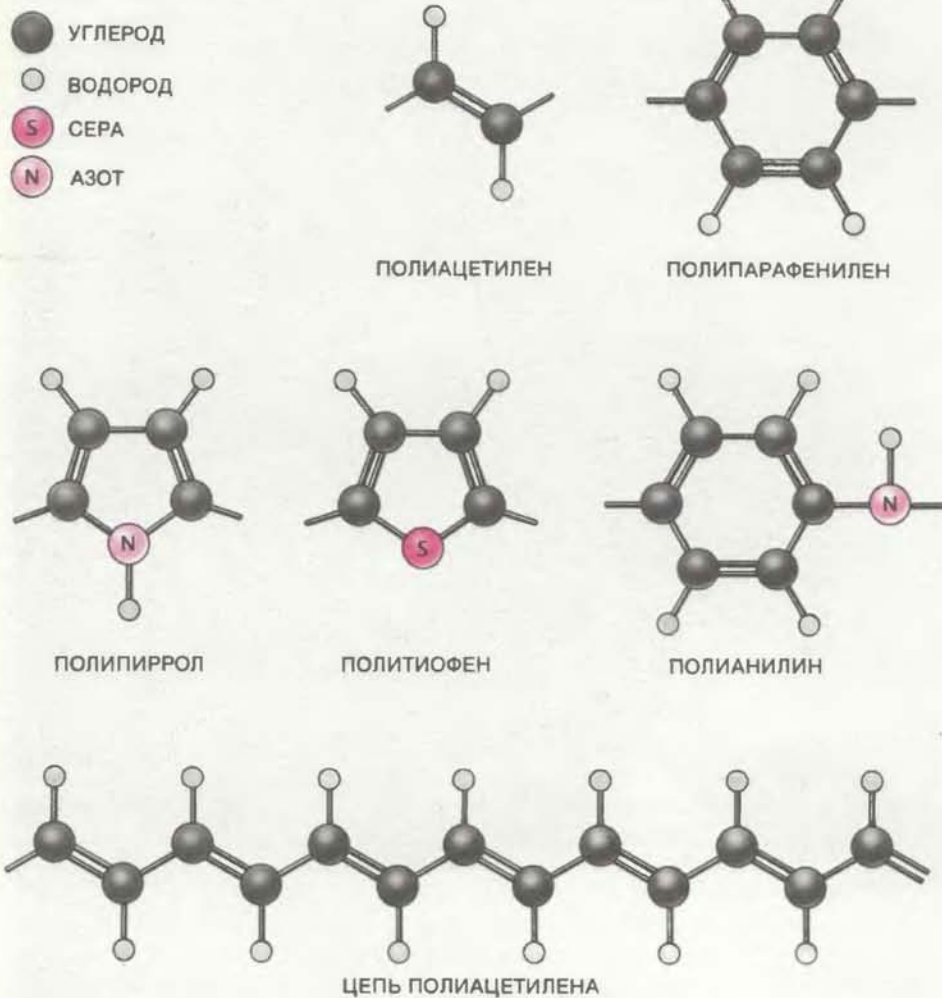
роших изоляторов, таких как тефлон и полистирол, удельная проводимость близка к 10⁻¹⁸ См/см; хорошие проводники, такие как медь и серебро, имеют проводимость около 10⁶ См/см. Проводимость полиацетилена, полученного специалистами фирмы BASF, равна примерно 1,47·10⁵ См/см.

Электрический ток есть направленное движение электронов; следовательно, в веществах, проводящих ток, часть электронов (носителей зарядов) должна быть свободной. В твердых веществах, в которых имеется много атомных связей, электроны «движутся» внутри дискретных энергетических состояний, называемых зонами, и между ними. В каждой энергетической зоне может находиться определенное число электронов; некоторые зоны могут быть пустыми. Электроны должны обладать определенной энергией, чтобы занять ту или иную зону. Для перехода из одной зоны в другую, имеющую большую энергию, электрону необходимо получить извне дополнительную порцию энергии.

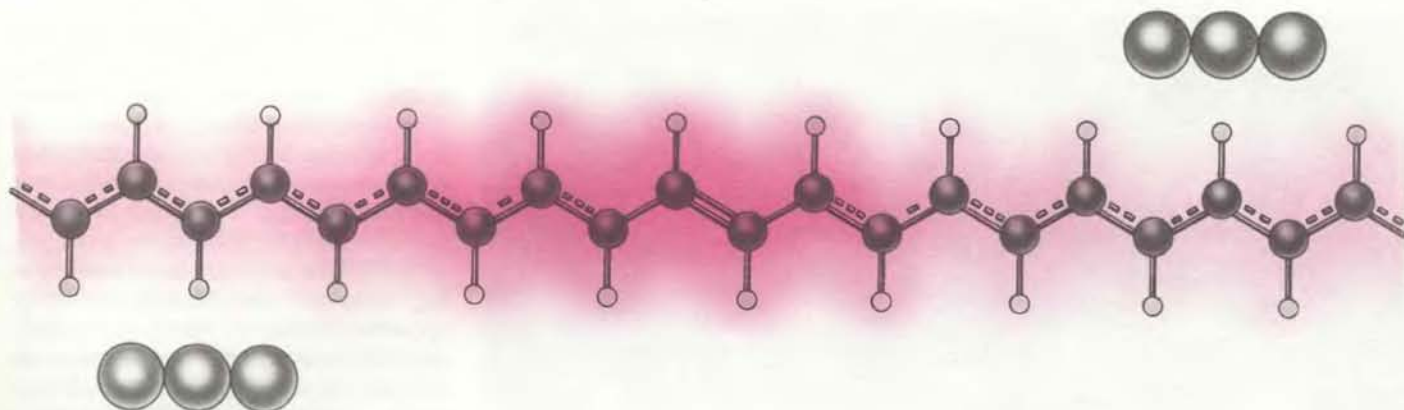
Движение электронов возможно только при условии, что одна из энергетических зон заполнена электронами частично. Если зоны пусты, электрический ток протекать не может, равно как и при условии, что зоны полностью заняты электронами. Проводимость напоминает работу реле, в котором ток создается электронами, «перебегающими» из одной энергетической зоны в другую, как это делают спортсмены, когда во время бега они переходят с одной беговой дорожки на другую. Чтобы включиться в поток, «бегун» должен ожидать на дорожке, поэтому зона не может быть пустой. Электроны должны также иметь возможность входить в зону, где своей очереди ожидают заряды, готовые включиться в поток; поэтому зона не может быть полностью заполненной.

Металлы проводят электрический ток, потому что они имеют частично заполненные энергетические зоны. Диэлектрики и полупроводники — это материалы, у которых энергетические зоны либо полностью заполнены электронами, либо совсем не заполнены. Верхняя заселенная зона называется валентной, а следующая над ней пустая зона — зоной проводимости. У диэлектрика между двумя этими зонами имеется большая энергетическая щель — широкая запрещенная зона; у полупроводников она несколько уже. Только возбужденные под воздействием света или тепла электроны могут «перескочить» запрещенную зону.

Полимеры обычно имеют такую



ПОВТОРЯЮЩИЕСЯ МОНОМЕРНЫЕ ЗВЕНЬЯ, соединенные в цепи, образуют различные полимеры. Особенность этих молекул — чередующиеся одинарные и двойные связи, которые создают электронную структуру, допускающую допирование. В двух верхних рядах показаны мономерные звенья пяти наиболее известных полимеров; внизу — цепь беспримесного полиацетилена. Все эти полимеры не проводят электрический ток, если они не допированы.



ПОЛИАЦЕТИЛЕНОВАЯ ЦЕПЬ, допированная *p*-примесью, имеет делокализованный положительный заряд, благодаря которому полимер становится проводником электрического тока, как металл. Плотность электронов (показана цветом) «размазана» по полимерному скелету в виде обла-

ка, которое исчезает вблизи отрицательных ионов допирующего агента. Различие между двойными и одинарными связями также стирается вблизи допирующего агента, что показано штриховыми линиями.

же электронную структуру, как диэлектрики и полупроводники: валентная зона у них заполнена, зона проводимости пуста, а между ними имеется широкая запрещенная зона. Допирование изменяет эту структуру: в запрещенной зоне возникают дополнительные энергетические уровни, на которые могут переходить валентные электроны (так называемое *p*-допирование, от англ. positive doping, поскольку молекула приобретает положительный заряд), либо из них в зону проводимости переходят дополнительные (донорные) электроны (*n*-допирование, от англ. negative doping, поскольку молекула становится отрицательно заряженной). Так, полимер становится проводником, поскольку либо валентная зона, либо зона проводимости становится частично заполненной.

В действительности механизм такого перехода несколько сложнее. Заряд, приобретенный полимерной цепью в результате допирования, вызывает незначительные, хотя и очень важные изменения в положении атомов. Это изменение приводит к образованию одного из трех типов зарядовых «островов», называемых солитонами, поляронами и биполяронами. Такие острова возникают около примесных ионов и при высоких концентрациях примеси; когда на каждую молекулу примеси приходится примерно 15 атомов углерода, острова начинают перекрывать друг друга. В промежутках между ними и при перекрывании валентной зоны и зоны проводимости соседние острова создают новые энергетические зоны, через которые электроны могут свободно переходить. Таким образом, благодаря солитонам, поляронам и биполяронам полимеры становятся проводниками.

НЕОБЫЧНЫЕ энергетические зоны, которые образуют в электропроводящих полимерах, в легированных полупроводниках не возникают. Тем не менее они могут играть определенную роль в механизме проводимости в новых высокотемпературных сверхпроводниках. Открытие солитонов в допированном полиацетилене привлекло к себе внимание физиков-теоретиков во всем мире, поскольку этот электропроводящий полимер является исключительно удачным объектом для изучения уникального явления.

Взаимосвязь между молекулой примеси и молекулой допируемого вещества в обычных полупроводниках также отличается от той, которая характерна для полимеров. Легирование кремния, например, сопровождается замещением некоторых атомов этого полупроводника атомами примеси, у которых электронов либо больше, либо меньше, чем у атома кремния. При допировании полимеров примесные молекулы никогда не замещают атомы основного вещества; они ведут себя как «компаньоны», которые удаляют или, наоборот, добавляют электроны в энергетические зоны полимера. При высокой концентрации вводимых в полимер добавок, когда солитоновые, поляроновые или биполяроновые острова сливаются, заряд, возникающий в полимере, делокализован (как бы размазан по многим атомам углерода).

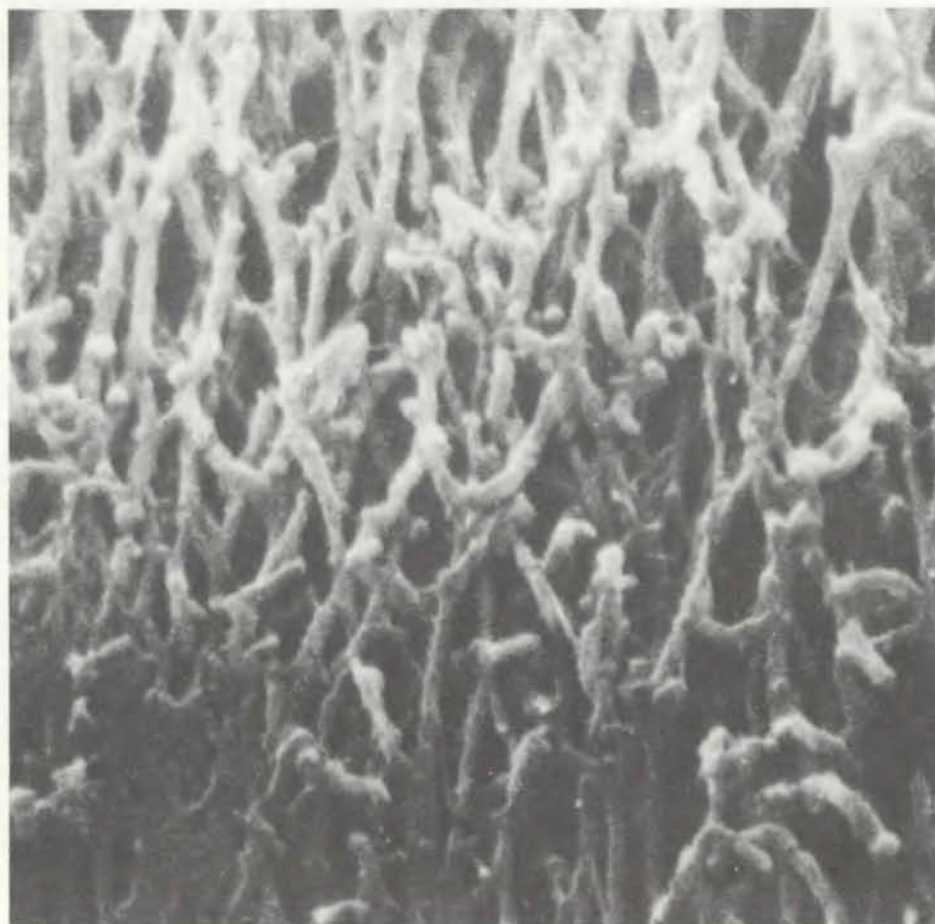
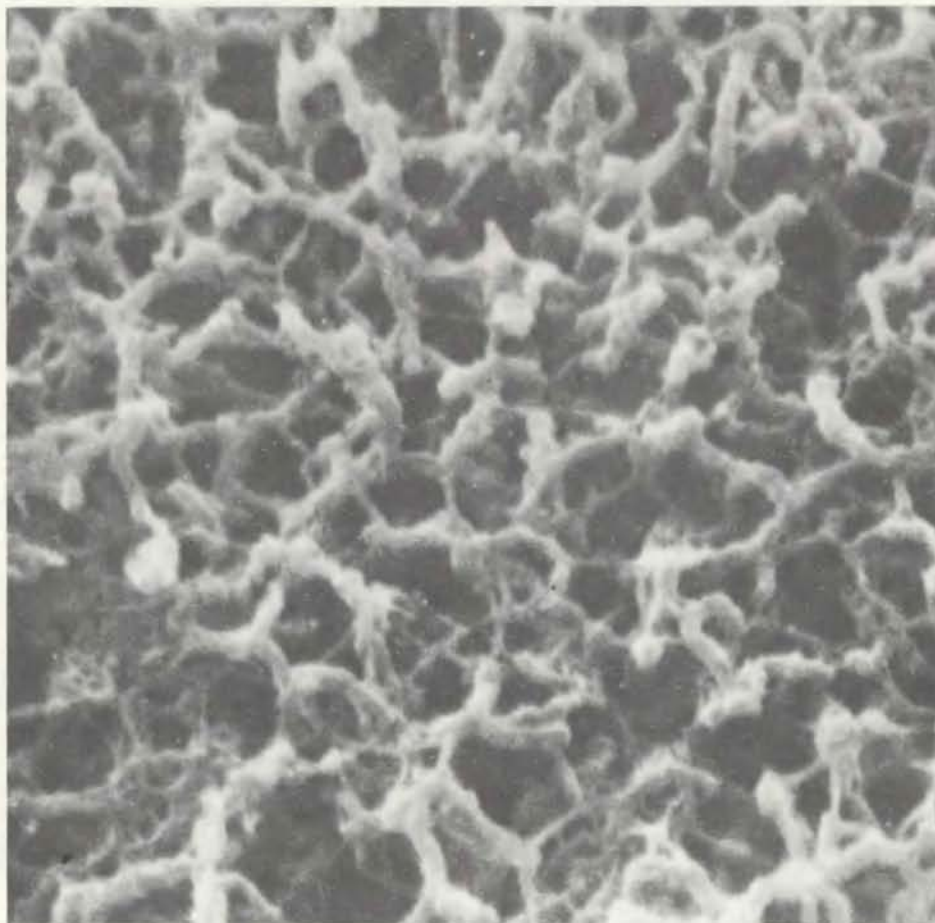
Пока в механизме внутрицепного переноса электронов многое остается неопределенным; к тому же ученые не могут детально объяснить, как электроны переходят от одной полимерной цепи к другой. И все же электроны должны переходить, потому что в полимерной пленке ни одна цепь не перекрывает всю ее ширину. Возмож-

но, происходит некий межцепной перенос; а возможно, в случае средней концентрации добавок в полиацетилене заряд переносится подвижной «жидкой» решеткой солитона, которая как бы омывает соседние с ней полимерные цепи.

И ни одна теория не может объяснить, почему проводимость электропроводящих полимеров лежит в таком широком диапазоне значений. Тем не менее ученые располагают некоторыми эмпирическими данными, которые помогли им выявить некоторые факторы, влияющие на проводимость полимеров. Концентрация допирующего агента является наиболее очевидным из определяющих факторов, и ее величину можно задавать с большой точностью. Другой фактор — ориентация полимерных цепей в материале. Структура цепи ответственна за появление анизотропии, или асимметрии; это означает, что цепь проводит электрический ток лучше в одном направлении, чем в другом. В допированном полиацетилене, например, проводимость может быть в 1000 раз выше в направлении продольной оси цепи, чем поперек молекулы.

Проводимость пленки из допированного полимера можно сделать максимальной, если ориентировать цепи так, чтобы они были параллельны друг другу. Частично это было реализовано в полиацетилене, синтезированном исследователями из фирмы BASF. После синтеза полимера, но еще до начала допирования полиацетиленовые листы были растянуты, чтобы придать определенную ориентацию его волокнам (см. рисунок на с. 54).

Чистота полимера также влияет на его проводимость. Наличие примесей может сказываться на подвижности



РАСТЯГИВАНИЕ ПОЛИМЕРНОЙ ПЛЕНКИ ориентирует волокна, и в результате электропроводность улучшается в направлении вытяжки. На микрофотографиях приведены структуры полиацетилена до (вверху) и после (внизу) вытяжки; каждое волокно содержит примерно 1500 полимерных цепей.

электронов из-за появления неоднородностей, блокирующих их свободное движение в полимерных цепях. Многие ученые связывают свойства полимера фирмы BASF с технологией его синтеза, обеспечивающей исключительно однородную структуру и чистоту полимера.

СИНТЕЗ и допирование полимеров проводят химическим или электрохимическим методами. Стандартный метод получения полиацетилена основан на химическом процессе, почти не отличающемся от того, которым воспользовался аспирант в лаборатории Сиракавы. Внутреннюю поверхность стеклянного реактора покрывают катализатором, ускоряющим полимеризацию, затем реактор заполняют газообразным ацетиленом. На его стенках начинает образовываться прочная пленка; за пять минут слой беспримесного полимера приобретает толщину листа бумаги. После промывки пленку можно снять со стеклянной поверхности и затем обработать ее раствором иода (*p*-допирование) или раствором металлического натрия в ртути (*n*-допирование).

При электрохимическом методе синтез и допирование происходят одновременно. Два металлических электрода погружают в раствор, содержащий ионы допирующего агента и мономер, из которого собственно и получается полимер. В типичном процессе синтеза с *p*-допированием прикладываемый к установке электрический потенциал отрывает электроны от мономера в зоне, прилегающей к положительному электроду. В результате мономер полимеризуется на поверхности этого электрода.

Во время полимеризации электроны продолжают отрываться от осаждающегося полимера, который становится положительно заряженным и поэтому притягивает из раствора отрицательные ионы допирующего агента. Затем пленка допированного полимера, образующегося на положительном электроде, может быть снята. Концентрация допирующего агента зависит от величины положительного заряда полимера, который в свою очередь определяется величиной приложенного к электроду напряжения. Изменяя это напряжение, можно регулировать количество допирующего агента в полимере, а следовательно, и его удельную проводимость.

Полиацетилен, как и многие другие полимеры, после их синтеза химическим способом можно допировать примесями *p*- или *n*-типа с помощью такого же электрохимического процесса. Для этого готовую пленку полимера накладывают на положитель-

ный или отрицательный электрод, погруженный в раствор, в котором содержатся ионы допирующего вещества. Когда методы получения, очистки и допирования будут усовершенствованы, можно будет получать полимеры с проводимостью большей, чем у меди, как на единицу объема, так и на единицу массы.

ПРОВОДИМОСТЬ — это, конечно, только одно из свойств, по которому можно судить о практической пригодности материала. Когда электропроводящие полимеры были впервые синтезированы, многие считали, что некоторые химические и физические свойства этих материалов ограничат их применение. Проводники были нерастворимы и не плавилась, поэтому их нельзя было отливать в формы, как обычные полимеры. Многие из них к тому же разлагались на воздухе, что значительно ограничивало область возможного использования.

В последние два года первая из этих проблем была решена путем присоединения к углеродному скелету других химических групп, которые изменяют свойства молекулы. Например, работы, проведенные в фирме Allied-Signal, Inc., показали, что если в цепи политиофена атомы водорода заменить большими по массе углеводородными группами, например бутильной, содержащей четыре атома углерода, то этот полимер может стать растворимым в обычных растворителях. Кроме того, когда цепь из 12 атомов углерода присоединяется к каждому мономерному звену, получается полимер, способный плавиться и вытягиваться в волокна, которые при допировании иодом могут проводить электрический ток не хуже металлических проводов.

При таких улучшениях область перспективного использования электропроводящих полимеров значительно расширилась. Быстрее, чем в каких-либо других областях, они стали применяться в производстве перезаряжаемых элементов питания (аккумуляторов). В начале 80-х годов Макдайрид и Хигер продемонстрировали на опытно образце возможность изготовления из полиацетилена, допированного *p*- и *n*-примесями, электродов перезаряжаемой батареи. С появлением электропроводящих полимеров о них стали говорить, как об изобретении, которое сделает электромобиль реальностью, потому что изготовленные из полимера аккумуляторы гораздо легче, чем тяжелые свинцовые кислотные аккумуляторы.

Хотя стремление разрабатывать электромобили несколько ослабло, интерес к аккумуляторам с электрода-

ми из полимеров не снизился. По-видимому, полимерные электроды будут долговечнее металлических, поскольку в этом случае ионы, участвующие в переносе зарядов и накоплении электрической энергии, поступают из раствора, а не с самих электродов. В этом случае полимерные электроды не подвергаются механическому износу, который неизбежен в обычных аккумуляторах вследствие разрушения материала электродов в процессе многократных циклов заряд — разряд. Кроме того, полимерные аккумуляторы в отличие от никель-кадмиевых (щелочных) и свинцовых (кислотных) не содержат токсичных веществ, поэтому не возникает проблема их захоронения после полного износа и выхода из строя.

Фирмы Bridgestone Corporation и Seiko Electronics Parts совместно разработали плоский круглый (величиной с монету) аккумулятор с полианилиновым электродом; другой электрод сделан из лития. Несколько месяцев назад в Японии такие аккумуляторы поступили в продажу. Сообщают, что емкость этих аккумуляторов в три раза больше, чем используемых в настоящее время литиевых аккумуляторов того же типа, а напряжение в два-три раза выше, чем у никель-кадмиевых аккумуляторов, или в полтора раза больше, чем у автомобильных кислотных аккумуляторов. Скорость самостоятельного разряда, которая определяет срок хранения аккумулятора, у них также значительно меньше, чем у щелочных или кислотных аккумуляторов.

Западногерманские фирмы BASF и Varta Batterie A.G. проводят испытания гибкого аккумулятора, у которого электрод в виде пленки сделан из литиевой фольги, а другой — из пленки полипиррола. Один из опытных образцов такого элемента имеет размеры почтовой открытки и толщину около 4 мм; его напряжение 3 В. Элемент может изгибаться, как картон. Фирма Allied-Signal работает также над созданием аккумулятора с электродом из электропроводящего полимера. О своей разработке фирма пока умалчивает, но есть основания полагать, что емкость нового аккумулятора на единицу массы может быть вдвое больше, чем у никель-кадмиевого аккумулятора.

ДОСТИЖЕНИЯ, связанные с изготовлением электродов из полимеров, весьма успешны, но потенциальные возможности электропроводящих полимеров этим не ограничиваются. Фирма Allied-Signal уже имеет несколько проектов, предусматривающих использование таких полимеров для производства датчиков. Возможны несколько путей реализации этих проектов. Некоторые допированные полимеры разлагаются при нагревании, и их проводимость при этом падает. Присоединенные к омметру, они могут сигнализировать о нарушении температурного режима при перевозке лекарств (в результате чего они могут утратить свои лечебные свойства). Электропроводящие полимеры используются в датчиках, которые показывают, были ли замо-



ПОЛИАЦЕТИЛЕНОВАЯ ПЛЕНКА после полимеризации снимается с внутренних стенок стеклянного реактора. Гибкую, как лист бумаги, полимерную пленку допируют, после чего она становится электропроводящей. Такая пленка отражает свет и поэтому имеет металлический блеск.

рожденные продукты оттаяны, а затем вновь заморожены, скажем, во время разгрузки. Аналогично можно проверить наличие токсичных веществ, которые вызывают в чистом полимере такой же эффект, как и примесь. Полимеры могут выступать также в роли датчиков радиации, если их поместить в газовую среду, которая становится активно действующей примесью при радиоактивном излучении.

В некоторых странах сейчас ведутся исследования, связанные с изучением возможности использования полиптофена и полианилина в электрохромных цветных дисплеях, цвет которых меняется в зависимости от величины электрического потенциала. Тонкая пленка полиптофена, например, имеет красный цвет, если полимер допирован, и темно-синий, если он без примесей. Применение электропроводящих полимеров возможно в информационных табло в аэропортах и на железнодорожных вокзалах, для создания рекламы внутри помещений, а также для индикаторов в калькуляторах, компьютерах, часах и других устройствах, в которых для отображения информации сейчас используют жидкие кристаллы. Хотя электрохромные дисплеи можно делать различного цвета, пока трудно сказать, будут ли они иметь существенные преимущества по сравнению с жидкокристаллическими. Чтобы электропроводящие полимеры нашли широкое применение в этой области, необходимо значительно снизить их инерционность (время включения и выключения) и увеличить срок службы.

Тот же механизм, благодаря которому электропроводящие полимеры изменяют свой цвет в электрохромных дисплеях, можно использовать в обычных оконных стеклах. Очень тонкие полимерные слои, вделанные в бесцветный твердый электролит и расположенные между двумя слоями стекла, могут затемнять окно, когда к полимерным слоям подводится электрическое напряжение. Степень затемнения можно регулировать, изменяя величину напряжения. Кроме того, поскольку электропроводящие полимеры способны поглощать солнечный свет, они привлекли внимание ученых, работающих над созданием солнечных батарей. Однако пока эффективность преобразования солнечной энергии в электрическую в этих батареях не дает оснований для оптимистичного прогноза.

Электропроводящие полимеры поглощают также электромагнитную энергию на низких частотах, поэтому их можно использовать в качестве электромагнитных экранов для предотвращения распространения излу-

чения от терминалов компьютерных систем. В настоящее время для этого применяют пластики с металлическим или углеродным наполнителем, однако возможность переработки и лучшая проводимость гомогенно допированного полимера придают ему особые преимущества. Способность полианилина поглощать значительную долю микроволнового излучения, о чем недавно сообщалось, позволяет надеяться на его успешное использование для этих целей.

Допированные полимеры испытывались в качестве проводников в новых печатных платах, в транзисторах, а также в качестве заменителей обычных полупроводников на $p-n$ -переходах, но оказалось, что их характеристики пока хуже, чем у используемых в настоящее время материалов. Тем не менее разработка более совершенной технологии синтеза полимеров, которая обеспечит упаковку молекул с заданной ориентацией и снизит количество дефектов, а также улучшение методов допирования, несомненно, обеспечат получение более качественных материалов. Благодаря своим необычным оптическим свойствам электропроводящие полимеры, возможно, найдут также применение в новом поколении вычислительных машин — оптических компьютерах. В этом направлении сейчас ведутся активные исследования.

Не исключено, что придет время, когда электропроводящие полимеры станут вживлять в человеческое тело. Поскольку эти материалы инертны и долговечны, некоторые из них, как предполагают, можно будет использовать для протезирования нервных волокон. Например, полипиррол, который нетоксичен, может быть проводником электрических импульсов. В качестве допирующего агента в данном случае можно было бы использовать гепарин, который препятствует свертыванию крови и в то же время может придать полипирролу электрические свойства. Но это не все. Вживленные в организм полимеры, допированные молекулами, которые обладают лечебными свойствами, могут выполнять роль внутреннего «депо» для доставки в организм лекарства. Когда по заданной программе путем регулирования подводимого к полимеру напряжения он будет переводиться в нейтральное состояние, лекарство начнет выделяться в организм.

Во многих отношениях электропроводящие полимеры сейчас, в конце 80-х годов, занимают примерно такое же положение, какое обычные полимеры занимали 50 лет назад. Хотя обычные полимеры синтезировались

и исследовались в лабораториях многих стран мира, они не получили широкого распространения в технике до тех пор, пока их химическая структура не подверглась существенной модификации, на что потребовались многие годы. Точно так же, чтобы использование электропроводящих полимеров в различных областях стало экономически целесообразным, их химические и физические свойства должны точно соответствовать конкретным требованиям. Но независимо от того, какие области применения будут найдены, несомненно, что в ближайшие годы электропроводящие полимеры станут предметом тщательных научных исследований. Только время покажет, будет ли роль этих пластмассовых проводников столь же значительной, какую когда-то сыграли их предшественники — диэлектрики.

Издательство МИР предлагает:

**П. Хочачка,
Дж. Сомеро**
**БИОХИМИЧЕСКАЯ
АДАПТАЦИЯ**

Перевод с английского

В книге американских авторов описаны биохимические механизмы адаптации к различным (в том числе экстремальным) условиям существования.

Особое внимание уделено адаптации к физической нагрузке, высокой температуре, холоду, дефициту кислорода.

Авторы уже известны советскому читателю по ранее вышедшей книге «Стратегия биохимической адаптации» (М.: Мир, 1977).

Для биохимиков и физиологов, а также специалистов-медиков, занимающихся спортивной медициной и изучением стрессовых воздействий на организм.

1988, 37 л. Цена 4 р. 70 к.



Стенограмма фрактала

ФРАКТАЛЫ — геометрические формы, нерегулярная структура которых повторяется в разных масштабах, — зачастую выглядят удивительно сложными. И все же оказывается, что можно построить фрактал, нанеся точки на бумагу в соответствии с двумя простыми правилами, применяемыми случайным образом. Начать можно в любой точке. Затем применяются правила, согласно которым следующая точка всегда наносится либо посередине отрезка до верхнего правого угла листа, либо на одной трети расстояния до центра с поворотом по часовой стрелке на 40° . При этом, какое из двух правил следует применить, можно определить, бросая монету. Сначала разброс точек выглядит случайным, однако после нескольких сот бросаний монеты начинает отчетливо проступать форма фрактального объекта.

Как считают М. Барнсли и Э. Слоан из Института технологических исследований шт. Джорджия, располагая достаточным количеством правил и компьютером, можно генерировать не только фрактальные узоры, но и изображения естественных явлений и объектов. Им удалось построить основанные на правилах алгоритмы, которые воспроизводят изображения соснового леса, следа, оставляемого на воде погруженной подводной лодкой, человеческих лиц и многих других объектов. По мнению авторов, главное преимущество метода заключается в том, что компьютерное изображение можно представить как своеобразную электронную «стенограмму» в виде правил его построения, а не в полном его цифровом эквиваленте.

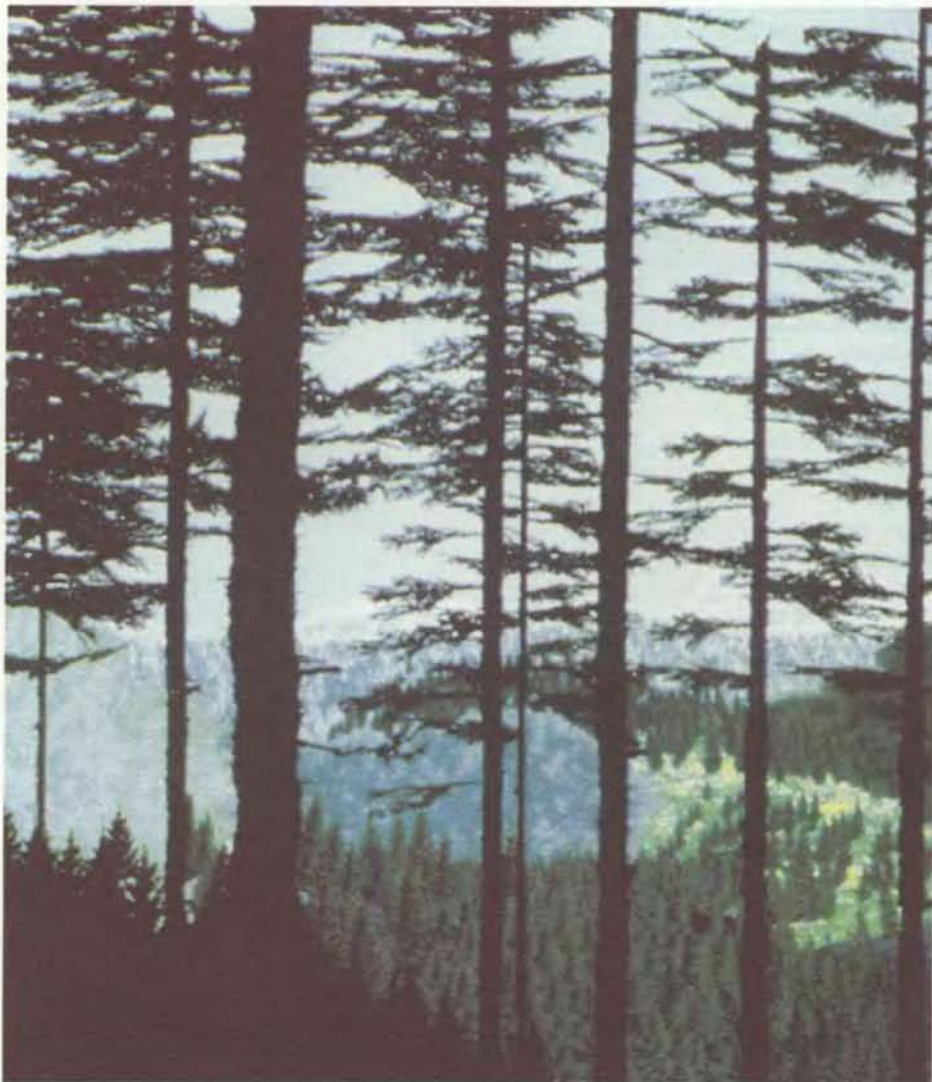
По свидетельству Барнсли достаточно 2 Кбайт памяти, чтобы компьютер мог хранить правила, позволяющие создать на экране цветное изображение соснового леса, состоящее из 10^6 пикселей (элементов изображения). При обычном представлении такая картинка потребовала бы не менее 3 Мбайт памяти. Подобное сжатие изображений, как говорит Барнсли, позволяет хранить в памяти компьютера и передавать по кабельным или радиоканалам значительно большее количество изображений.

Конечно, признает Барнсли, найти подходящие правила иногда нелегко. Процесс их поиска для черно-белого изображения таких объектов с очевидной фрактальной структурой, как облака, листья папоротника и горы, в значительной степени автоматизиро-

ван. Для получения более сложных изображений, таких, как цветной портрет человека, поиск правил пока остается трудным и требует больших временных затрат. Исследователь должен попытаться разбить изображение на компоненты, обладающие фрактальными свойствами, а затем найти для каждой компоненты свой набор правил. Дальнейшие исследования и разработка специальной аппаратуры, по словам Барнсли, со временем приведут к тому, что процесс определения правил для получения всех видов изображений станет полностью автоматизированным.

Для этого, полагает Барнсли, исследователям нужно воспользоваться достижениями так называемой компьютерно-графической индустрии, т. е. приемами, применяющимися, например, в автоматизированных системах конструирования, имитаторах полета и специальных устройст-

вах, предназначенных для создания графических трюков в кино. Американское оборонное агентство Defence Advanced Research Projects, которое финансирует эти исследования, проявляет большой интерес к возможности использования этих подходов для автоматического распознавания целей. Агентство надеется, например, на этой основе создать спутниковые системы, способные обнаруживать турбулентные следы на водной поверхности, оставляемые подводной лодкой, движущейся на глубине. Как отмечает Барнсли, современные подводные лодки создают значительно меньше турбулентности по сравнению с моделями лодок прошлых лет. Фрактальные алгоритмы позволили бы компьютеру на борту спутника ускорить процесс сопоставления изображений, хранимых в памяти, с теми, которые «видят» его оптические устройства. Кроме того, сжатые изображения спутник мог бы быстрее передать на землю для дальнейшего анализа.



ФРАКТАЛЬНЫЙ ЛЕС — изображение, построенное компьютером по алгоритму и программе, разработанными с фотографии соснового бора М. Барнсли, А. Жакэном, Ф. Малассне, Л. Рейтером и Э. Слоаном из Института технологических исследований шт. Джорджия.

Рамануджан и число π

Около 75 лет назад гениальный индийский математик придумал невероятно эффективные способы вычисления числа π . Созданные сейчас на той же основе алгоритмы для компьютеров позволяют найти миллионы десятичных знаков числа π

ДЖОНАТАН М. БОРВЕЙН, ПИТЕР Б. БОРВЕЙН

ЧИСЛО π — отношение длины окружности к ее диаметру — в 1987 г. было вычислено с беспрецедентной точностью: более ста миллионов десятичных знаков. Этот год ознаменовался также столетием со дня рождения Сринивасы Рамануджана — гениального индийского математика, который большую часть своей недолгой и загадочной жизни был оторван от остального математического мира. Эти два события тесно связаны между собой, ибо самые недавние методы вычисления π предвосхищены Рамануджаном, хотя для их реализации пришлось подождать, пока будут разработаны (многими специалистами, в том числе нами) эффективные алгоритмы, новейшие суперкомпьютеры и нетрадиционные методы умножения чисел.

Тяга к вычислению π с миллионами десятичных знаков может показаться довольно бессмысленной, а само это занятие — лишь ареной для установления рекордов. Действительно, уже 39 знаков π достаточно для вычисления окружности, опоясывающей наблюдаемую Вселенную, с погрешностью, не превышающей радиуса атома водорода. Трудно вообразить физические ситуации, которые потребовали бы большей точности. Почему же математики и вычислители не удовлетворяются, скажем, 50 знаками π ?

Этому есть несколько причин. Во-первых, вычисление π стало чем-то вроде эталона: по нему оценивается совершенство и надежность применяемого компьютера. Вдобавок погоня за все более точным значением π позволяет математикам проникнуть в таинственные и малодоступные закоулки теории чисел. Другая, более простая причина — «потому что оно всегда с нами». И в самом деле, π является неотъемлемой частью математической культуры вот уже более двух с половиной тысячелетий.

Кроме того, всегда есть шанс, что такие вычисления прольют свет на некоторые загадки, связанные с π . Ведь эта универсальная постоянная, несмотря на сравнительно простую

природу, не так уж хорошо понята. Например, хотя и доказано, что нельзя вычислить точное значение π путем применения к целым положительным числам какой бы то ни было комбинации сложения, вычитания, умножения, деления и извлечения корня [т. е. что π — трансцендентное иррациональное число. — *Перев.*], никому еще не удалось доказать, что десятичные знаки π распределены случайно, т. е. каждая цифра от 0 до 9 появляется с одинаковой частотой. Возможно, хотя и в высшей степени маловероятно, что, начиная с какого-то места, все остальные знаки π состоят только из 0 и 1 или проявляют какую-то другую закономерность. Более того, число π внезапно появляется в самых неожиданных задачах, не имеющих никакого отношения к окружностям. Так, допустим, что из множества целых чисел наугад выбирается какое-то число. Тогда вероятность того, что оно не имеет повторяющихся (кратных) простых делителей, равна $6/\pi^2$. Как и многие другие выдающиеся математики, Рамануджан был пленен волшебной силой этого числа.

ПОСТРОЕННЫЕ недавно алгоритмы для вычисления π придали новый блеск математическим сокровищам, извлеченным благодаря возрождению интереса к работам Рамануджана. Однако большая часть того, что он сделал, все еще недоступна исследователям. Основные его работы содержатся в «Тетрадах», где он вел личные записи, пользуясь собственной терминологией и обозначениями. Еще огорчительнее для математиков, изучивших «Тетрады» Рамануджана, то, что он обычно не записывал доказательств своих теорем. Расшифровка и редактирование «Тетрадей», предпринятые Брюсом К. Берндтом из Иллинойского университета в Эрбана-Шампейн, только сейчас близятся к завершению.

Насколько нам известно, никто и никогда еще не брался за работу по математическому редактированию такого объема и такой трудности. Но

усилия неверняка будут вознаграждены. Наследие Рамануджана, содержащееся в «Тетрадах», обещает не только обогатить чистую математику, но и найти применения в разных областях математической физики. Например, Родни Дж. Бакстер из Австралийского национального университета признает, что открытия Рамануджана помогли ему решить некоторые задачи статистической физики, относящиеся к поведению системы взаимодействующих частиц, рассматриваемых как твердые шарики в гексагональной решетке наподобие медовых сотов. А Карлос Дж. Морено из Университета г. Нью-Йорка и Фримен Дж. Дайсон из Института высших исследований отметил, что физики начинают применять результаты Рамануджана в теории суперструн.

Фигура Рамануджана как математика тем более удивительна, что его формальное образование было весьма ограниченным. Он родился 22 декабря 1887 г. в небогатой семье касты браминов в местечке Эрод на юге Индии и вырос в городке Кумбаконаме, где его отец служил бухгалтером в небольшой текстильной лавке. Его математический талант был замечен очень рано, и в возрасте 7 лет он получил право на стипендию для учебы в средней школе Кумбаконама. Он поражал одноклассников тем, что помнил наизусть сложные математические формулы и много знаков числа π .

В 12 лет Рамануджан изучил обширный труд С.Л. Лоуни «Плоская тригонометрия», включая рассмотренные там суммы и произведения бесконечных последовательностей, которым суждено было занять важное место в его последующих работах. (Бесконечная последовательность — это не имеющая конца цепочка членов, часто порожденных какой-то простой формулой. В этом контексте интерес представляют последовательности, для которых сумма или произведение их членов принимает конечное значение и его можно найти. Если члены последовательности складываются, полученное выра-

жение называется рядом; если они перемножаются, получается бесконечное произведение.) Через три года Рамануджан достал книгу «Сборник элементарных результатов чистой математики» (Synopsis of Elementary Results in Pure Mathematics), содержащий свыше 6000 теорем (большая часть без доказательств) и составленный преподавателем Кембриджского университета Г.С. Карром. Две эти книги и стали основой математической подготовки Рамануджана.

В 1903 г. Рамануджан был принят в местный колледж [входивший в состав Мадрасского университета. — *Перев.*]. Однако поглощенный своими математическими изысканиями в ущерб всему остальному, он провалился на экзаменах; то же самое повторилось четыре года спустя в другом колледже в Мадрасе. После женитьбы в 1909 г. Рамануджан на время оставил свое увлечение и попробовал найти работу. К счастью, в 1910 г. по рекомендации многих сочувствующих Рамануджану индийских математиков на него обратил внимание богатый любитель и покровитель математики Р. Рамачандра Рао. Под впечатлением открытий, зафиксированных Рамануджаном в его «Тетрадах», Рамачандра Рао предоставил ему ежемесячное пособие.

В 1912 г., желая все-таки иметь работу, Рамануджан устроился бухгалтером в Трест мадрасского порта, который возглавлял английский инженер Френсис Спринг. Вместе с основателем Индийского математического общества В. Рамасвами Айяром они уговорили Рамануджана сообщить свои результаты трем известным английским математикам. Двое из них, по-видимому, не отозвались. Третьим был Г.Х. Харди из Кембриджского университета, признанный теперь самым выдающимся английским математиком того времени.

ХАРДИ, привыкший к письмам от всякого рода «умников», получив послание Рамануджана 16 января 1913 г., сначала был склонен его проигнорировать. Однако вечером того же дня он решил вместе с коллегой и близким другом Джоном Э. Литтлвудом поломать голову над списком из 120 формул и теорем, которые Рамануджан приложил к своему письму. Через несколько часов они «вынесли приговор»: перед ними работа не маляка, а гения. (По составленной Харди позднее «шкале чистого таланта» для математиков Рамануджан получил 100 баллов, Литтлвуд — 30, а себе Харди поставил 25. Немецкий математик Давид Гильберт, самая

влиятельная фигура в математике того времени, заслужил только 80.) Этот эпизод и то, что за ним последовало, по словам Харди, было единственным романтическим событием его жизни. Он писал, что некоторые формулы Рамануджана его совершенно ошеломили, но тем не менее «они, несомненно, верны, ибо если бы они были неверны, ни у кого не хватило бы воображения их выдумать».

Харди немедленно пригласил Рамануджана приехать в Кембридж. Но серьезные возражения со стороны матери и собственные колебания задержали его отъезд до марта 1914 г. В течение следующих пяти лет Харди и Рамануджан работали совместно в Тринити-Колледже Кембриджского университета. Сочетание блестящего мастерства Харди-аналитика и фантастической интуиции Рамануджана привело к необычайно плодотворно-

му сотрудничеству. Они опубликовали серию основополагающих работ о свойствах различных теоретико-числовых функций, открывавших путь для ответа на вопросы типа: каково наиболее вероятное число простых делителей у данного целого числа? Сколькими способами можно выразить натуральное число в виде суммы меньших натуральных чисел?

В 1917 г. Рамануджан стал действительным членом Лондонского королевского общества и профессором Кембриджского университета. Впервые индеец был удостоен того и другого звания. Слава его росла, однако здоровье резко ухудшилось. В военное время, когда в Великобритании остро ощущалась нехватка продовольствия, трудно было придерживаться вегетарианской диеты, которую он строго соблюдал. Рамануджан не раз попадал в больницу, но по-



СРИНИВАСА РАМАНУДЖАН, родившийся в Индии в 1887 г., сумел, несмотря на неполное формальное образование, самостоятельно реконструировать большую часть здания теории чисел и дополнил его многими оригинальными теоремами и формулами. Как многие выдающиеся математики до него, Рамануджан был очарован числом π . На основе своих исследований модулярных уравнений (см. вставку на с. 62) он нашел точные выражения для π и вычислил из них приближенные значения. Работы многих современных исследователей (в том числе авторов) дали возможность лучше понять методы Рамануджана и реализовать их в виде алгоритмов.

ток его новых результатов не иссякал. В 1919 г., когда война закончилась и путешествия за границу снова стали безопасными, он вернулся в Индию. Ставший кумиром молодых индийских интеллектуалов 32-летний Рамануджан умер 26 апреля 1920 г., как

тогда думали, от туберкулеза, но, скорее, как считают теперь, от острого недостатка витаминов. До конца преданный математике Рамануджан и в последние месяцы жизни, измученный болезнью, продолжал свой труд и создал замечательную работу, запи-

санныю в его так называемой «Потерянной тетради».

РЕЗУЛЬТАТЫ Рамануджана, касающиеся числа π , связаны большей частью с его исследованиями модулярных уравнений — темы, наиболее подробно раскрытой в «Тетрадах». Грубо говоря, модулярное уравнение — это алгебраическое соотношение между функцией от некоторой переменной x , т. е. в математических обозначениях $f(x)$, и той же функцией от переменной x , возведенной в некоторую целую степень, например $f(x^2)$, $f(x^3)$ или $f(x^4)$. Эта целая степень задает «порядок» модулярного уравнения. Простейшим модулярным уравнением является уравнение 2-го порядка $f(x) = 2\sqrt{f(x^2)}/[1 + f(x^2)]$. Конечно, не всякая функция удовлетворяет какому-нибудь модулярному уравнению. Но существует класс функций, обладающих этим свойством. Они называются модулярными функциями. Кроме того, модулярное уравнение выполняется только при определенных значениях x , а именно тех, которые являются «решениями» данного уравнения.

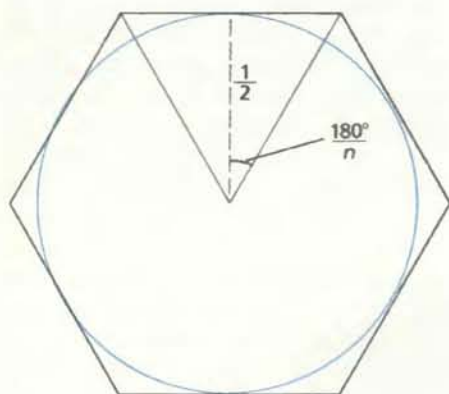
Рамануджан не имел себе равных в умении «откапывать» решения модулярных уравнений, удовлетворяющие также некоторым другим условиям. Такие решения называются сингулярными. Оказывается, поиски сингулярных решений в некоторых случаях приводят к числам, натуральные логарифмы которых совпадают с π (умноженным на константу) в поразительно большом числе десятичных знаков. Виртуозно пользуясь этим общим приемом, Рамануджан построил для приближения π много замечательных бесконечных рядов и одночленных формул. Некоторые из них приведены в его единственной формальной статье на эту тему «Модулярные уравнения и приближения к π », опубликованной в 1914 г.

Своими попытками вычислить π Рамануджан отдал дань древней традиции. Уже в самых ранних индо-европейских цивилизациях было известно, что площадь круга пропорциональна квадрату его радиуса, а длина окружности пропорциональна ее диаметру. Правда, не совсем ясно, когда впервые было осознано, что отношение длины любой окружности к ее диаметру и отношение площади любой одной и той же постоянной, которую принято обозначать символом π . (Сам этот символ был введен гораздо позднее — в 1706 г. английским математиком-любителем Уильямом Джонсоном и стал широко употребляться благодаря поддержке крупной-

ПЕРИМЕТР
ОПИСАННОГО
МНОГОУГОЛЬНИКА

$$P_c = n \operatorname{tg} \left(\frac{180^\circ}{n} \right)$$

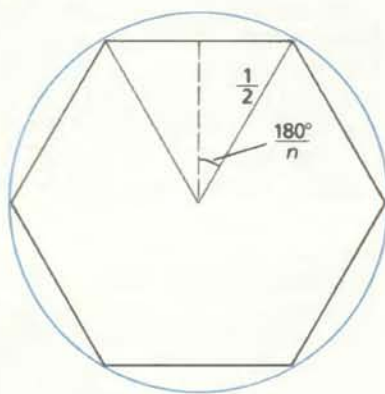
ГДЕ n — ЧИСЛО СТОРОН



$$P_c = 3,464\dots$$

ПЕРИМЕТР
ВПИСАННОГО
МНОГОУГОЛЬНИКА

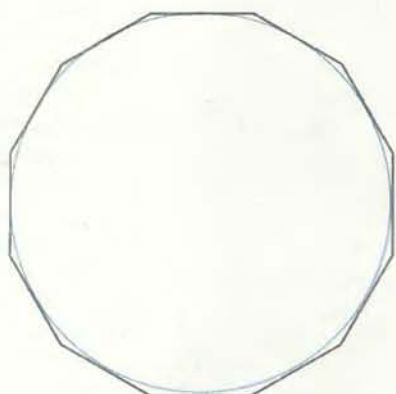
$$P_i = n \sin \left(\frac{180^\circ}{n} \right)$$



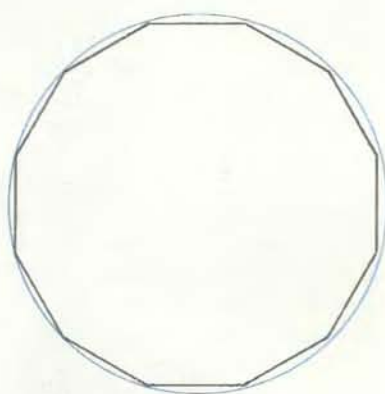
$$P_i = 3,000\dots$$

$n=6$

$n=12$

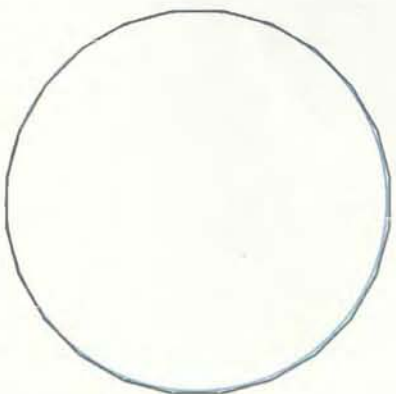


$$P_c = 3,215\dots$$



$$P_i = 3,105\dots$$

$n=24$



$$P_c = 3,159\dots$$



$$P_i = 3,132\dots$$

МЕТОД АРХИМЕДА приближения к π состоял в том, что в окружность диаметра 1 вписывались и около нее описывались правильные многоугольники. Периметры вписанных многоугольников служат соответственно нижними и верхними границами для значения π . Для нахождения периметров можно, как здесь показано, воспользоваться синусами и тангенсами, однако Архимеду пришлось изобретать эквивалентные соотношения на основе геометрических построений. С помощью 96-угольника он установил, что π больше, чем $3\frac{1}{7}$, и меньше, чем $3\frac{1}{4}$.

шего математика XVIII в. Леонарда Эйлера.)

ВЕЛИЧАЙШИЙ математик древности Архимед из Сиракуз строго доказал равенство двух указанных отношений в своем трактате «Измерение круга». Он вычислил и приближенное значение π , причем на основе математических принципов, а не прямых измерений длины окружности, площади круга и диаметра. Архимед вписывал в окружность и описывал около нее правильные многоугольники (т. е. многоугольники со сторонами одинаковой длины). Диаметр окружности принимался за единицу, а периметры описанного и вписанного многоугольников рассматривались как приближения соответственно сверху и снизу к длине окружности, которая в данном случае численно совпадала с π (см. рисунок на с. 60).

Этот метод приближения π не был новшеством: еще раньше вписывать многоугольники с возрастающим числом сторон предложил Антифон, а его современник Брисон из Гераклеи дополнительно ввел описанные многоугольники. Новшеством был выполненный Архимедом правильный расчет результата удвоения числа сторон как вписанного, так и описанного многоугольников. Тем самым он разработал процедуру, повторение которой достаточное число раз в принципе позволяет вычислить π с любым количеством знаков. (Следует заметить, что периметр правильного многоугольника легко вычисляется с помощью простых тригонометрических функций: синуса, косинуса и тангенса, однако во времена Архимеда, т. е. в III в. до н. э., эти функции еще не были полностью изучены и вычисление периметров было далеко не таким легким делом, как может сейчас показаться.)

Архимед начал с вписанного и описанного шестиугольников и получил неравенство $3 < \pi < 2\sqrt{3}$. Четырежды удвоив число сторон (т. е. доведя его до 96), он сузил интервал для π : $3\frac{1}{71} < \pi < 3\frac{1}{70}$ и получил приближенное значение $\pi \approx 3,14$. Есть некоторые основания предполагать, что дошедший до нас текст трактата «Измерение круга» представляет собой часть более обширного труда, в котором Архимед объясняет, как, начав с десятиугольников и применив шесть раз операцию удвоения, он получил приближение с пятью знаками: $\pi \approx 3,1416$. Сам по себе метод Архимеда прост, но при отсутствии готовых таблиц тригонометрических функций требует извлечения корней; выполнение этой операции вручную занимает довольно много времени. Кроме того, приближения сходятся к

π очень медленно: с каждой итерацией погрешность уменьшается лишь вчетверо. Тем не менее до середины XVII в. все попытки европейских ученых вычислить π так или иначе опирались на этот метод. Голландский математик XVI в. Лудольф ван Цейлен посвятил вычислению π большую часть своей научной деятельности. К концу жизни он нашел приближение с 32 десятичными знаками, вычислив периметры вписанного и описанного многоугольников с 2^{62} (т. е. порядка 10^{18}) сторонами. Говорят, полученное им значение π , которое в некоторых европейских странах называют в его честь числом Лудольфа, высечено на его надгробном камне.

РАЗВИТИЕ анализа в основном трудами Исаака Ньютона и Готфрида Вильгельма Лейбница позволи-

ло намного ускорить вычисление приближенных значений π . В анализе существуют эффективные методы нахождения для функции ее производной (скорости изменения значения функции при изменении переменных) и интеграла (суммы значений функции на некоторой области изменения переменных). С помощью этих методов можно показать, что обратные тригонометрические функции представляются в виде интегралов от квадратичных функций, связанных с окружностью. (Обратная тригонометрическая функция задает угол, которому отвечает данное значение самой тригонометрической функции. Так, значение функции, обратной тангенсу, т. е. арктангенсу, от 1 равно 45 градусам, или $\pi/4$ радианам.)

Связь между тригонометрическими функциями и алгебраическими выра-

ПРОИЗВЕДЕНИЕ ВАЛЛИСА (1665)

$$\frac{\pi}{2} = \frac{2 \times 2}{1 \times 3} \times \frac{4 \times 4}{3 \times 5} \times \frac{6 \times 6}{5 \times 7} \times \frac{8 \times 8}{7 \times 9} \times \dots = \prod_{n=1}^{\infty} \frac{4n^2}{4n^2 - 1}$$

РЯД ГРЕГОРИ (1671)

$$\frac{\pi}{4} = 1 - \frac{1}{3} + \frac{1}{5} - \frac{1}{7} + \dots = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{2n+1}$$

ФОРМУЛА МЭЧИНА (1706)

$$\frac{\pi}{4} = 4 \operatorname{arctg} (1/5) - \operatorname{arctg} (1/239), \quad \text{где } \operatorname{arctg} X = X - \frac{X^3}{3} + \frac{X^5}{5} - \frac{X^7}{7} + \dots = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{X^{2n+1}}{2n+1}$$

РАМАНУДЖАН (1914)

$$\frac{1}{\pi} = \frac{\sqrt{8}}{9801} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(4n)! [1103 + 26390n]}{(n!)^4 396^{4n}}, \quad \text{где } n! = n \times (n-1) \times (n-2) \times \dots \times 1 \text{ и } 0! = 1$$

ДЖ. БОРВЕЙН И П. БОРВЕЙН (1987)

$$\frac{1}{\pi} = \frac{12 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n (6n)! [212175710912\sqrt{61} + 1657145277365 + n(13773980892672\sqrt{61} + 107578229802750)]}{(n!)^3 (3n)! [5280(236674 + 30303\sqrt{61})]^{3n+3/2}}}{1}$$

ЧЛЕНЫ МАТЕМАТИЧЕСКИХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ можно складывать и перемножать, иногда получая при этом ряды или бесконечные произведения, сходящиеся к π (деленному на константу) или к $1/\pi$. Первые две последовательности, открытые математиками Джоном Валлисом и Джеймсом Грегори, широко известны, однако для вычислительных целей практически бесполезны. Для нахождения ста знаков π не хватило бы и ста лет работы суперкомпьютера, запрограммированного на сложение или умножение членов любой из этих последовательностей. Формула, открытая Джоном Мэчином, сделала вычисление π выполнимым, так как из анализа известен способ представлять арктангенс числа x в виде ряда, который сходится к значению арктангенса тем быстрее, чем меньше x . Все известные вычисления π с начала XVIII в. и до начала 70-х годов нашего века опирались на варианты формулы Мэчина. Сумма последовательности Рамануджана сходится к истинному значению $1/\pi$ гораздо быстрее: каждый очередной член последовательности добавляет, грубо говоря, восемь новых правильных цифр. Самая нижняя последовательность, найденная авторами, добавляет около 25 цифр с каждым новым членом. Первый член (соответствующий $n = 0$) дает число, совпадающее с π в 24 десятичных знаках.

жениями станет понятней, если рассмотрим окружность единичного радиуса с центром в начале координат на декартовой плоскости x - y . Уравнение этой окружности (ее площадь численно совпадает с π) имеет вид $x^2 + y^2 = 1$; оно получается по теореме Пифагора для прямоугольного треугольника с гипотенузой 1. Синус и косинус угла между положительной полуосью x и радиусом, проведенным в любую точку окружности, равны соответственно координатам y и x этой точки, а его тангенс равен y/x .

Однако для вычисления π гораздо важнее тот факт, что обратную тригонометрическую функцию можно разложить в ряд, члены которого выражаются через ее производные. Сам Ньютон нашел 15 знаков π , суммируя несколько первых членов ряда для арксинуса. Позднее он писал одному из коллег: «Мне стыдно сказать вам, до скольких знаков я выполнил эти вычисления, не занимаясь больше ничем».

В 1674 г. Лейбниц вывел формулу $1 - 1/3 + 1/5 - 1/7 + \dots = \pi/4$ (арктангенс единицы). (Общий ряд

для арктангенса был открыт в 1671 г. шотландским математиком Джеймсом Грегори, хотя аналогичные выражения, по-видимому, были получены в Индии на несколько столетий раньше.) Погрешность этого приближения, определяемая как разность между суммой n членов ряда и точным значением $\pi/4$, приблизительно равна $(n + 1)$ -му члену. Так как знаменатель каждого следующего слагаемого возрастает лишь на два, то, чтобы получить приближение с точностью до двух знаков, приходится суммировать около 50 членов, с точностью до трех знаков — около 500 и т. д. Таким образом, этот ряд практически непригоден для нахождения более чем нескольких первых знаков π .

Спасла положение формула Джона Мэчина: $\pi/4 = 4\arctg 1/5 - \arctg 1/239$. Поскольку ряд для арктангенса при заданном значении переменной сходится тем быстрее, чем меньше это значение, благодаря этой формуле вычисления сильно упростились. Пользуясь своей формулой и рядом для арктангенса, Мэчин в 1706 г. вычислил 100 знаков π . Его метод ока-

зался столь мощным, что с начала XVIII в. и до самого недавнего времени все вычисления π с большим числом знаков были выполнены с помощью тех или иных вариантов этого метода.

ИЗ ВЫЧИСЛЕНИЙ, проведенных в XIX в., два следует упомянуть особо. В 1844 г. Иоганн Дазе нашел 205 знаков π в течение нескольких месяцев, вычисляя значения трех арктангенов и пользуясь формулой, аналогичной формуле Мэчина. Дазе был чудо-вычислителем: он мог примерно за 8 часов перемножать в уме стозначные числа. (Его, наверное, можно считать предтечей современного суперкомпьютера, по крайней мере по объему памяти.) В 1853 г. Уильям Шенкс обошел Дазе, опубликовав полученное им значение π с 607 знаками, хотя начиная с 528-го все остальные оказались неверными. Шенкс потратил на свой труд многие годы — это было рутинное, хотя и трудоемкое применение формулы Мэчина. Свообразным рекордом стало и то, что ошибка Шенкса была обнаружена только через 92 года при сравнении его значений с приближением π до 530 знаков, вычисленным Д.Ф. Фергюсоном с помощью механического калькулятора.

С появлением цифровых вычислительных машин попытки найти еще больше десятичных знаков π возобновились, так как машина идеально приспособлена к долгому и упорному «перемалыванию» чисел. В июне 1949 г. Джон фон Нейман и его сотрудники применили один из первых цифровых компьютеров ENIAC. Машина выдала 2037 знаков за 70 часов. В 1957 г. Г.Э. Фелтон пытался вычислить 10 000 знаков π , но из-за ошибки компьютера только первые 7480 знаков оказались правильными. Рубеж в 10 000 знаков был достигнут годом позже Ф. Женкой с помощью компьютера IBM 704. В 1961 г. Дэниел Шенкс [по утверждению М. Гарднера, не имеющий отношения к Уильяму Шенксу. — *Перев.*] и Джон У. Ренч-младший вычислили 100 000 знаков π с помощью компьютера IBM 7090 менее чем за 9 часов. Отметка в миллион знаков была пройдена в 1973 г. Жаном Гийу и М. Буйе. Это заняло чуть меньше одного дня работы компьютера CDC 7600. (Вычисления Шенкса — Ренча и Гийу — Буйе были продлены дважды при помощи двух разных выражений для π через арктангены. С учетом всех ошибок, допущенных в подобных вычислениях как человеком, так и машиной, только после такой проверки современные «охотники за знаками» считают рекорд официально установленным.)

Главная причина, по которой стало

МОДУЛЯРНЫЕ ФУНКЦИИ И ПРИБЛИЖЕНИЯ К π

Модулярная функция — это некоторая функция $\lambda(q)$, связанная алгебраическим соотношением, называемым модулярным уравнением, с той же функцией от той же переменной q , возведенной в некоторую целую степень p : $\lambda(q^p)$. Эта степень p определяет «порядок» модулярного уравнения. Примером модулярной функции служит функция

$$\lambda(q) = 16q \prod_{n=1}^{\infty} \left(\frac{1+q^{2n}}{1+q^{2n-1}} \right)^8.$$

Отвечающее ей модулярное уравнение 7-го порядка, связывающее $\lambda(q)$ и $\lambda(q^7)$, имеет вид

$$\sqrt[8]{\lambda(q)\lambda(q^7)} + \sqrt[8]{[1-\lambda(q)][1-\lambda(q^7)]} = 1.$$

Сингулярные решения модулярного уравнения — это такие решения, которые удовлетворяют некоторым дополнительным условиям. Один класс сингулярных решений получится, если вычислить последовательность значений

$$k_p = \sqrt{\lambda(e^{-\pi/\sqrt{p}})}$$

для целых p . Эти значения обладают замечательным свойством: логарифмическое выражение

$$\frac{-2}{\sqrt{p}} \ln \left(\frac{k_p}{4} \right)$$

имеет много первых десятичных знаков, общих с π , причем число их тем больше, чем больше значение p .

Рамануджан не имел себе равных в способности находить эти сингулярные значения. Одно из самых известных, когда $p = 210$, содержалось в его первом письме к Харди. Вот оно:

$$k_{210} = (\sqrt{2}-1)^2 (2-\sqrt{3}) (\sqrt{7}-\sqrt{6})^2 (8-3\sqrt{7}) (\sqrt{10}-3)^2 (\sqrt{15}-\sqrt{14}) (4-\sqrt{15})^2 (6-\sqrt{35}).$$

Если подставить его в логарифмическое выражение, получится число, которое совпадает с π в первых 20 десятичных знаках. Для сравнения, k_{240} приводит к числу, которое совпадает с π в более чем 1 млн. знаков.

Пользуясь этим общим приемом, Рамануджан построил много замечательных рядов для π , включая тот, что приведен на предыдущем рисунке. Тот же общий подход лежит в основе двухшагового итерационного алгоритма, показанного на верхнем рисунке на следующей странице. Первый шаг каждой итерации (вычисление y_n) соответствует нахождению одного из последовательности сингулярных значений путем решения модулярного уравнения подходящего порядка, второй шаг (вычисление α_n) отвечает взятию логарифма этого сингулярного значения.

возможным все более точное вычисление π , состояла в увеличении быстродействия компьютеров. Однако вскоре выявились серьезные препятствия к дальнейшему росту точности. При традиционных способах выполнения на компьютере арифметических действий, если бы мы захотели удвоить число знаков, нам пришлось бы увеличить время вычисления по крайней мере вчетверо. Таким образом, даже при стократном увеличении быстродействия программе Гийу и Буйе для получения миллиардного знака π понадобилось бы четверть века машинного времени. В 70-е годы казалось, что такое вычисление практически невыполнимо.

Однако теперь эта задача осуществима, причем не только благодаря появлению «скоростных» компьютеров, но и благодаря применению новых методов умножения чисел. Решающим было и третье нововведение — итерационные алгоритмы, быстро сходящиеся к π . (Итерационный алгоритм можно реализовать в виде программы, которая повторно выполняет одни и те же арифметические действия, используя выход одного цикла в качестве входа для следующего.) Эти алгоритмы (некоторые из них построены нами) во многих отношениях превосходятся Рамануджаном, хотя он и не знал ничего о программировании. Компьютеры не только позволили применить результаты Рамануджана, но и помогли разгадать их. Совершенное программное обеспечение, предусматривающее сложные алгебраические манипуляции, позволило уверенно двигаться по дороге, по которой в одиночку, лишенный помощи пробирался Рамануджан 75 лет назад.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ информатика научила нас тому, что многие привычные алгоритмы, например способ умножения чисел, которому обучают в школе, весьма далеки от оптимальных. В информатике эффективность алгоритма измеряют его так называемой бит-сложностью: числом сложений и умножений отдельных цифр при выполнении алгоритма. Так, сложение двух n -значных чисел обычным способом имеет бит-сложность, которая растет как n , а вот бит-сложность умножения двух n -значных чисел обычным способом растет как n^2 . Таким образом, умножение при традиционных методах намного «труднее», чем сложение, т. е. поглощает намного больше времени.

Однако в 1971 г. А. Шёнхаге и Ф. Штрассен показали, что теоретически бит-сложность умножения двух чисел может быть лишь ненамного больше бит-сложности их сложения. Один из способов добиться этого по-

ПОЛАГАЕМ

$$(a) \quad y_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} \quad \alpha_0 = \frac{1}{2}$$

и

$$y_{n+1} = \frac{1 - \sqrt{1 - y_n^2}}{1 + \sqrt{1 - y_n^2}} \quad \alpha_{n+1} = [(1 + y_{n+1})^2 \alpha_n] - 2^{n+1} y_{n+1}$$

ПОЛАГАЕМ

$$(b) \quad y_0 = \sqrt{2} - 1 \quad \alpha_0 = 6 - 4\sqrt{2}$$

и

$$y_{n+1} = \frac{1 - \sqrt[4]{1 - y_n^4}}{1 + \sqrt[4]{1 - y_n^4}} \quad \alpha_{n+1} = [(1 + y_{n+1})^4 \alpha_n] - 2^{2n+3} y_{n+1} (1 + y_{n+1} + y_{n+1}^2)$$

ПОЛАГАЕМ

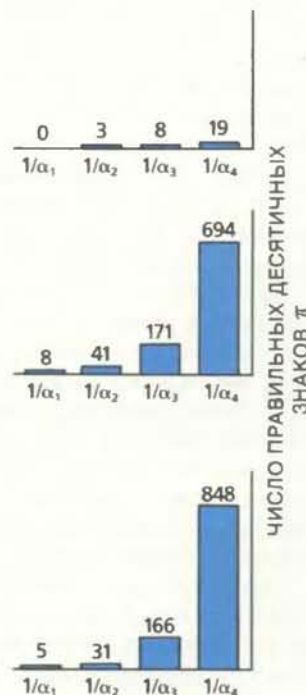
$$(c) \quad S_0 = 5(\sqrt{5} - 2) \quad \alpha_0 = \frac{1}{2}$$

и

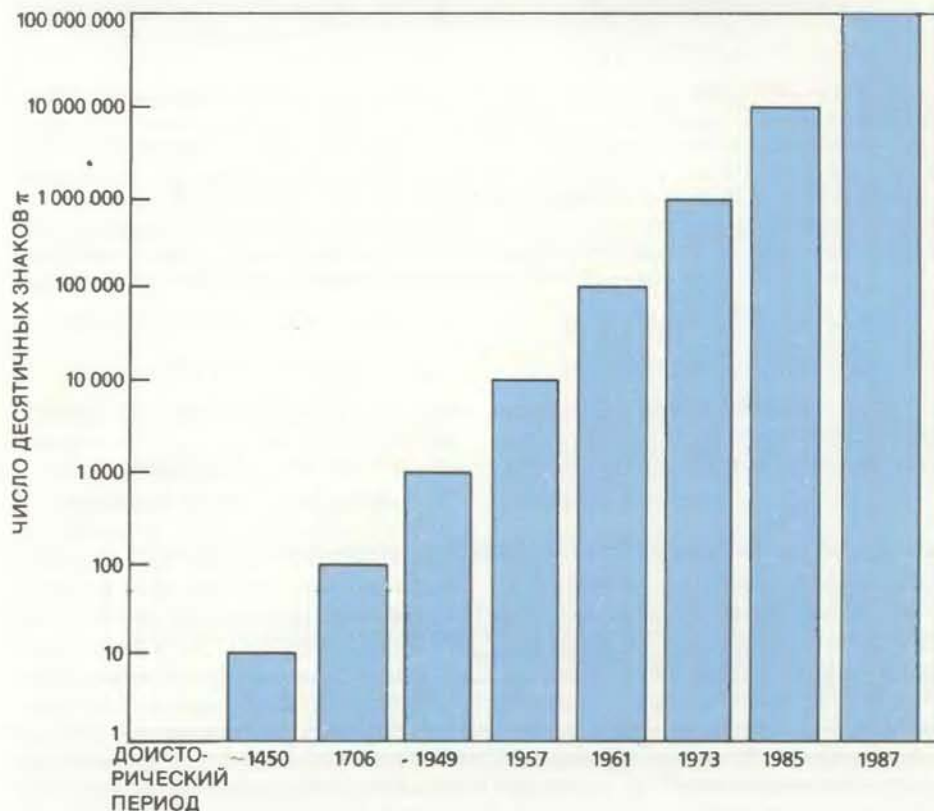
$$S_{n+1} = \frac{25}{S_n(Z + X/Z + 1)^2} \quad \text{где } X = \frac{5}{S_n} - 1, \quad Y = (X-1)^2 + 7$$

$$\text{и } Z = \frac{\sqrt[5]{X(Y + \sqrt{Y^2 - 4X^3})}}{2}$$

$$\alpha_{n+1} = S_n^2 \alpha_n - 5^n \left[\frac{S_n^2 - 5}{2} + \sqrt{S_n(S_n^2 - 2S_n + 5)} \right]$$



ИТЕРАЦИОННЫЕ АЛГОРИТМЫ, разработанные авторами, позволяют вычислять π с невероятной точностью. (Итерационный алгоритм — это повторяющаяся последовательность операций, причем результат, полученный на выходе одного цикла, становится входом для следующего цикла.) Алгоритм (a) квадратично сходится к $1/\pi$: число правильных цифр, определяемых величиной α_n , увеличивается более чем вдвое всякий раз, когда l увеличивается на 1. Алгоритм (b) при каждой итерации увеличивает количество правильных цифр более чем вчетверо, а алгоритм (c) — более чем впятеро. Алгоритм (b), возможно, самый эффективный из всех известных алгоритмов вычисления π : три последних рекордных вычисления выполнены на суперкомпьютерах с помощью именно этого алгоритма. Когда авторы работали над своими алгоритмами, им стало ясно, что Рамануджан при построении своих приближений к π следовал аналогичным методам. Так, вычисление s_n в алгоритме (c) основано на замечательном модулярном уравнении пятого порядка, открытом Рамануджаном.



Число известных знаков π за последние 10 лет выросло на два порядка благодаря разработке итерационных алгоритмов и их реализации на суперкомпьютерах, снабженных новыми эффективными методами умножения.

тенциального уменьшения состоит в том, чтобы реализовать так называемые быстрые преобразования Фурье. Основанное на таком преобразовании умножение двух больших чисел позволяет организовать промежуточные действия над отдельными цифрами столь искусно, что дублирование исключается. Поскольку деление и извлечение корня можно свести к последовательности умножений, их бит-сложность тоже может стать ненамного большей, чем у сложения. В результате получится огромная экономия бит-сложности, а значит, и машинного времени. По этой причине в последнее время все попытки вычисления π основывались на тех или иных вариантах умножения с применением быстрых преобразований Фурье.

Однако для практического вычисления сотен миллионов десятичных знаков π пришлось «переоткрыть» одну красивую формулу, известную полто-

ра столетия назад Карлу Фридриху Гауссу. В середине 70-х годов Ричард П. Brent и Юджин Саламин независимо обнаружили, что эта формула дает для π квадратично сходящийся алгоритм, т. е. при каждой итерации число знаков удваивается. С 1983 г. Ясумаса Канада из Токийского университета и его сотрудники с помощью этого алгоритма установили несколько мировых рекордов по числу знаков для π .

Нас заинтересовали причины столь быстрой сходимости алгоритма Гаусса—Брента—Саламина. Исследуя их, мы разработали общую методику построения аналогичных алгоритмов, быстро сходящихся к π , а также к некоторым другим величинам. Основываясь на теории, в общих чертах описанной в 1829 г. немецким математиком Карлом Густавом Якобом Якоби, мы поняли, что в принципе значения π можно вычислять при

помощи одного класса интегралов, называемых эллиптическими интегралами — они позволяют находить периметр эллипса. (Окружность, прежняя геометрическая база для получения приближения к π , есть эллипс с осями одинаковой длины.)

Эллиптические интегралы обычно не берутся, но могут быть легко аппроксимированы при помощи итерационных процедур, опирающихся на модулярные уравнения. Мы обнаружили, что алгоритм Гаусса—Брента—Саламина представляет собой частный случай нашего более общего метода, связанный с модулярным уравнением второго порядка. Используя модулярные уравнения более высоких порядков, можно добиться более быстрой сходимости к значению интеграла, а значит, и получить лучший алгоритм для вычисления π . Поэтому мы тоже построили различные алгоритмы на основе модулярных уравнений третьего, четвертого и более высоких порядков.

В январе 1986 г. Дэвид Х. Бейли из Исследовательского центра Национального управления по авиации и исследованию космического пространства, пользуясь одним из наших алгоритмов, после 12 итераций на суперкомпьютере Cray-2 получил 29 360 000 десятичных знаков π . Основанный на модулярном уравнении 4-го порядка этот алгоритм более чем вчетверо увеличивает количество знаков после каждой итерации. Год спустя Я. Канада и его сотрудники выполнили еще одну итерацию на суперкомпьютере NEC SX-2 и получили 134 217 000 знаков, проверив тем самым своей более ранний такой же результат, полученный с помощью алгоритма Гаусса—Брента—Саламина. Еще две итерации нашего алгоритма — дело нехитрое, если бы удалось как-нибудь на несколько недель заполнить суперкомпьютер в монопольное пользование, — дали бы более двух миллиардов знаков π .

ИТЕРАЦИОННЫЕ методы лучше всего приспособлены для вычисления π именно с помощью компьютера, поэтому не удивительно, что Рамануджан никогда не пытался им следовать. Однако главные составляющие итерационных алгоритмов для π , и в частности модулярные уравнения, следовало искать в работах Рамануджана. Оригинальный путь, которым он шел к бесконечным рядам и приближенным формулам для π более чем три четверти века назад, в чем-то наверняка совпадал с нашими собственными усилиями вывести алгоритмы для вычисления π . И действительно, формулы, приведенные в

КАК ПОЛУЧИТЬ ДВА МИЛЛИАРДА ЗНАКОВ π ПРИ ПОМОЩИ КАЛЬКУЛЯТОРА *

Полагаем

$$y_0 = \sqrt{2} - 1$$

$$y_1 = [1 - \sqrt[4]{1 - y_0^4}] / [1 + \sqrt[4]{1 - y_0^4}]$$

$$y_2 = [1 - \sqrt[4]{1 - y_1^4}] / [1 + \sqrt[4]{1 - y_1^4}]$$

$$y_3 = [1 - \sqrt[4]{1 - y_2^4}] / [1 + \sqrt[4]{1 - y_2^4}]$$

$$y_4 = [1 - \sqrt[4]{1 - y_3^4}] / [1 + \sqrt[4]{1 - y_3^4}]$$

$$y_5 = [1 - \sqrt[4]{1 - y_4^4}] / [1 + \sqrt[4]{1 - y_4^4}]$$

$$y_6 = [1 - \sqrt[4]{1 - y_5^4}] / [1 + \sqrt[4]{1 - y_5^4}]$$

$$y_7 = [1 - \sqrt[4]{1 - y_6^4}] / [1 + \sqrt[4]{1 - y_6^4}]$$

$$y_8 = [1 - \sqrt[4]{1 - y_7^4}] / [1 + \sqrt[4]{1 - y_7^4}]$$

$$y_9 = [1 - \sqrt[4]{1 - y_8^4}] / [1 + \sqrt[4]{1 - y_8^4}]$$

$$y_{10} = [1 - \sqrt[4]{1 - y_9^4}] / [1 + \sqrt[4]{1 - y_9^4}]$$

$$y_{11} = [1 - \sqrt[4]{1 - y_{10}^4}] / [1 + \sqrt[4]{1 - y_{10}^4}]$$

$$y_{12} = [1 - \sqrt[4]{1 - y_{11}^4}] / [1 + \sqrt[4]{1 - y_{11}^4}]$$

$$y_{13} = [1 - \sqrt[4]{1 - y_{12}^4}] / [1 + \sqrt[4]{1 - y_{12}^4}]$$

$$y_{14} = [1 - \sqrt[4]{1 - y_{13}^4}] / [1 + \sqrt[4]{1 - y_{13}^4}]$$

$$y_{15} = [1 - \sqrt[4]{1 - y_{14}^4}] / [1 + \sqrt[4]{1 - y_{14}^4}]$$

$$\alpha_0 = 6 - 4\sqrt{2}$$

$$\alpha_1 = (1 + y_1)^4 \alpha_0 - 2^3 y_1 (1 + y_1 + y_1^2)$$

$$\alpha_2 = (1 + y_2)^4 \alpha_1 - 2^5 y_2 (1 + y_2 + y_2^2)$$

$$\alpha_3 = (1 + y_3)^4 \alpha_2 - 2^7 y_3 (1 + y_3 + y_3^2)$$

$$\alpha_4 = (1 + y_4)^4 \alpha_3 - 2^9 y_4 (1 + y_4 + y_4^2)$$

$$\alpha_5 = (1 + y_5)^4 \alpha_4 - 2^{11} y_5 (1 + y_5 + y_5^2)$$

$$\alpha_6 = (1 + y_6)^4 \alpha_5 - 2^{13} y_6 (1 + y_6 + y_6^2)$$

$$\alpha_7 = (1 + y_7)^4 \alpha_6 - 2^{15} y_7 (1 + y_7 + y_7^2)$$

$$\alpha_8 = (1 + y_8)^4 \alpha_7 - 2^{17} y_8 (1 + y_8 + y_8^2)$$

$$\alpha_9 = (1 + y_9)^4 \alpha_8 - 2^{19} y_9 (1 + y_9 + y_9^2)$$

$$\alpha_{10} = (1 + y_{10})^4 \alpha_9 - 2^{21} y_{10} (1 + y_{10} + y_{10}^2)$$

$$\alpha_{11} = (1 + y_{11})^4 \alpha_{10} - 2^{23} y_{11} (1 + y_{11} + y_{11}^2)$$

$$\alpha_{12} = (1 + y_{12})^4 \alpha_{11} - 2^{25} y_{12} (1 + y_{12} + y_{12}^2)$$

$$\alpha_{13} = (1 + y_{13})^4 \alpha_{12} - 2^{27} y_{13} (1 + y_{13} + y_{13}^2)$$

$$\alpha_{14} = (1 + y_{14})^4 \alpha_{13} - 2^{29} y_{14} (1 + y_{14} + y_{14}^2)$$

$$\alpha_{15} = (1 + y_{15})^4 \alpha_{14} - 2^{31} y_{15} (1 + y_{15} + y_{15}^2)$$

$1/\alpha_{15}$ совпадает с π более чем в двух миллиардах десятичных знаков

* Разумеется, на дисплее калькулятора должно воспроизводиться два миллиарда цифр; на карманном калькуляторе вычисление после второй итерации теряет интерес

ТОЧНЫЕ ИНСТРУКЦИИ ВЫПОЛНЕНИЯ АЛГОРИТМА (b) на верхнем рисунке предыдущей страницы в принципе позволяют вычислить первые два миллиарда десятичных знаков π за несколько минут. Для этого нужен всего лишь калькулятор с двумя регистрами памяти и обычной способностью складывать, вычитать, умножать, делить и извлекать корни. К сожалению, у большинства калькуляторов на дисплее помещается только восемь цифр, и это делает такое вычисление сомнительным.

его статье, посвященной π , и в «Тетрадах», во многом помогли нам при построении некоторых алгоритмов. Например, хотя мы могли доказать существование алгоритма 11-го порядка и знали его общую формулировку, только натолкнувшись на модулярные уравнения этого порядка у Рамануджана, мы сумели открыть неожиданно простую форму этого алгоритма.

С другой стороны, из полученных нами общих формул удалось вывести все ряды Рамануджана для π . При выводе одного из них, который сходил к π быстрее любого другого известного нам в то время ряда, небольшая помощь пришла с неожиданной стороны. Мы проверили все величины, входящие в выражение этого ряда, кроме одной — коэффициента 1103 в числителе (см. рисунок на с. 61), поскольку были уверены, как, должно быть, и сам Рамануджан, что это правильное число. Для доказательства требовалось либо упростить некое устрашающего вида уравнение, в котором переменные возводились в степени с показателями, равными нескольким тысячам, либо погрузиться в малодоступные глубины теории чисел.

По счастливому совпадению Р. Уильям Госпер-младший из фирмы Symbolics, Inc., в 1985 г. решил провести испытание именно этого ряда Рамануджана на точность приближения к значению π . Он довел вычисления более чем до 17 млн. знаков (в то время это было рекордом), однако само по себе это не могло служить доказательством, что сумма ряда действительно равна π . Конечно, Госпер знал, что миллионы знаков полученного им числа совпадают с найденными ранее Я. Канадой при помощи алгоритма Гаусса—Брента—Саламина, и понимал, что вероятность ошибки Рамануджана ничтожно мала.

Но как только Госпер закончил свои вычисления и сверил их с результатом Канады, мы получили все, что требовалось для обоснования числа 1103, а именно что ряд дает верное значение с точностью до $1/10^{10\,000\,000}$. Этот результат на основании примерно тех же соображений, из которых следует, что два целых числа с разностью меньше 1 обязательно совпадают, позволяет точно установить, что упомянутый коэффициент равен 1103. Таким образом, проведенное Госпером вычисление стало частью нашего доказательства. Нам было известно, что этот ряд (и соответствующий алгоритм) столь чувствителен к малейшим неточностям, что если бы Госпер взял какой-нибудь другой коэффициент, а компьютер в процессе вычисления допустил ошибку хотя бы в одной

326. If β be of the 3rd degree,

- i. $\sqrt[3]{\frac{\alpha}{\beta}} - \sqrt[3]{\frac{1-\alpha}{1-\beta}} = \sqrt[3]{\frac{\alpha-\beta}{1-\beta}} - \sqrt[3]{\frac{\beta}{1-\beta}} = 1$.
- ii. $\sqrt[3]{\alpha\beta} + \sqrt[3]{(1-\alpha)(1-\beta)} = 1$
- iii. $m = 1 + 2\sqrt[3]{\frac{\alpha}{\beta}}$ and $\frac{3}{m} = 1 + 2\sqrt[3]{\frac{1-\alpha}{1-\beta}}$
- iv. $m^2(\sqrt[3]{\frac{\alpha}{\beta}} - \alpha) = \sqrt[3]{\frac{\alpha}{\beta}} - \alpha$
- v. $m = \frac{1 - 2\sqrt[3]{\frac{\alpha^2(1-\beta)^3}{\beta(1-\alpha)^3}}}{1 - 2\sqrt[3]{\frac{\alpha}{\beta}}} = \sqrt[3]{1 + 4\sqrt[3]{\frac{\beta^2(1-\alpha)^3}{\alpha(1-\beta)^3}}}$ and $\frac{3}{m} = \frac{2\sqrt[3]{\frac{\alpha^2(1-\alpha)^3}{\beta(1-\beta)^3}} - 1}{1 - 2\sqrt[3]{\frac{\alpha}{\beta}}} = \sqrt[3]{1 + 4\sqrt[3]{\frac{\beta^2(1-\alpha)^3}{\alpha(1-\beta)^3}}}$
- vi. If $\alpha = p\left(\frac{2+p}{1+p}\right)^3$ then $\beta = p^3 \cdot \frac{2+p}{1+p}$ so that $1-\alpha = (1+p)\left(\frac{1-p}{1+p}\right)^3$ & $1-\beta = (1+p)\frac{1-p}{1+p}$
- vii. $m^2 = \sqrt{\frac{\beta}{\alpha}} + \sqrt{1-\frac{\beta}{\alpha}} = \sqrt{\frac{\beta(1-\alpha)}{\alpha(1-\beta)}}$ and hence $9/m^2 = \sqrt{\frac{\alpha}{\beta}} + \sqrt{1-\frac{\alpha}{\beta}} = \sqrt{\frac{\alpha(1-\alpha)}{\beta(1-\beta)}}$
- viii. $\sqrt[3]{\alpha\beta^5} + \sqrt[3]{(1-\alpha)^5(1-\beta)^5} = 1 - \sqrt[3]{\frac{\beta^3(1-\alpha)^3}{\alpha(1-\beta)^3}} = \sqrt[3]{\alpha^5\beta} + \sqrt[3]{(1-\alpha)^5(1-\beta)} = \sqrt[3]{1 + \sqrt{\alpha\beta} + \sqrt{(1-\alpha)(1-\beta)}}$
- ix. $\sqrt{\alpha(1-\beta)} + \sqrt{\beta(1-\alpha)} = 2\sqrt[3]{\alpha\beta(1-\alpha)(1-\beta)}$
 $m^2\sqrt{\alpha(1-\alpha)} + \sqrt{\beta(1-\beta)} = 9/m^2 \cdot \sqrt{\alpha(1-\beta)} + \sqrt{\alpha(1-\alpha)}$
- x. $m\sqrt{1-\alpha} + \sqrt{1-\beta} = \frac{3}{m}\sqrt{1-\beta} - \sqrt{1-\alpha} = 2\sqrt[3]{(1-\alpha)(1-\beta)}$ and $m\sqrt{\alpha} - \sqrt{\beta} = \frac{3}{m}\sqrt{\beta} + \sqrt{\alpha} = 2\sqrt[3]{\alpha\beta}$
- xi. $m - \frac{3}{m} = 2\left\{\sqrt[3]{\alpha\beta} - \sqrt[3]{(1-\alpha)(1-\beta)}\right\}$ and $m + \frac{3}{m} = 4\sqrt[3]{1 + \sqrt{\alpha\beta} + \sqrt{(1-\alpha)(1-\beta)}}$
- xii. If $P = \sqrt[3]{16\alpha\beta(1-\alpha)(1-\beta)}$ and $Q = \sqrt[3]{\frac{\beta(1-\alpha)}{\alpha(1-\beta)}}$, then $Q + \frac{1}{Q} + 2\sqrt{2}\left(P - \frac{1}{P}\right) = 0$

«ТЕТРАДИ» РАМАНУДЖАНА содержат записанные им формулы и утверждения. На приведенной странице можно увидеть разные модулярные уравнения пятого порядка; все они записаны в нестандартных, изобретенных самим Рамануджаном обозначениях. К сожалению, Рамануджан не потрудился дать доказательства, предоставив другим собирать, проверять и доказывать открытые им уравнения. Среди формул в «Тетрадах» имеются тонкие соотношения между числами и между функциями, которые находят применения в других областях математики и даже в теоретической физике.

цифре, то получилось бы не значение π , а бессмысленный набор цифр.

Можно показать, что алгоритмы рамануджановского типа очень близки к наилучшим возможным. Если собрать все операции, которые производятся при выполнении подобных алгоритмов (с применением наилучших известных методов сложения, вычитания и умножения), то окажется, что бит-сложность вычисления n знаков π ненамного больше бит-сложности перемножения двух n -значных чисел, а последняя, когда умножение выполняется с применением быстрых преобразований Фурье, ненамного превосходит бит-сложность

сложения двух n -значных чисел — простейшей возможной арифметической операции, выполняемой при помощи компьютера.

МАТЕМАТИКА, по-видимому, еще не ощутила в полной мере влияния гениальных открытий Рамануджана. В его «Тетрадах» содержится множество других удивительных формул с интегралами, бесконечными рядами и непрерывными дробями (представлениями числа как суммы целого и дроби, в знаменателе которой снова стоит целое число плюс дробь, в ее знаменателе опять целое число плюс дробь и т. д.). К сожалению

нию, они приводятся почти без всяких указаний на метод, которым Рамануджан их доказывал. Литтлвуд писал: «Если какой-то значительный кусок рассуждений уже встречался где-то в другом месте и общая совокупность фактов и интуитивных соображений давала ему уверенность, он не искал ничего больше».

Титанический труд по редактированию «Тетрадей», начатый 60 лет назад английскими аналитиками Г.Н. Ватсоном и Б.Н. Уилсоном и

завершаемый ныне Брюсом Берндтом, требует поисков доказательств, источников, а иногда небольших исправлений каждого из многих тысяч содержащихся в них утверждений и тождеств. Одна строчка в «Тетрадах» легко может вызвать многие страницы комментариев. Задача дополнительно затруднена нестандартными математическими обозначениями, в которых записаны формулы. Поэтому большая часть работы Рамануджана останется недоступной матема-

тическим кругам до тех пор, пока Берндт не закончит свой труд.

Уникальная способность Рамануджана оперировать чисто интуитивно сложнейшими формулами позволила ему посвятить семяна в математическом саду (метафора, заимствованная у Фримена Дайсона), который только сейчас вступает в пору цветения. Как и многим другим математикам, нам не терпится увидеть, какие из семян в ближайшие годы взойдут и сделают сад еще прекраснее.

Наука и общество

Пример сострадания

ОДИННАДЦАТЬ тысяч лет назад — в эпоху, когда ледниковый период в Европе уже подходил к концу, основная часть человечества еще пребывала в состоянии дикости. Не-



КАРЛИК, который жил 11 тыс. лет назад в Южной Италии, имел короткие, искривленные кости предплечий — симптом акромегалической дисплазии.

большие группы первобытных людей вели бродячий образ жизни, передвигаясь в поисках ягод, орехов, рыбы, дичи и других съедобных продуктов. Они охотились и разделывали добычу с помощью орудий, сделанных из камня, и ночевали в пещерах. «Выживание сильнейших» было законом их бытия; старые или больные, не способные прокормить себя, обычно не имели никаких шансов на существование и быстро погибали. Так во всяком случае выглядит картина, которую рисуют нам большинство ископаемых находок каменного века.

Два палеолитических скелета, обнаруженные в южной части Апеннинского полуострова, неожиданно открыли первые примеры человеческой нежности и сострадания в этой довольно мрачной картине. Останки двух захороненных вместе людей были найдены в глубине так называемой пещеры Ромито в Южной Италии близ современного города Козенца. Сама находка относится к 1963 г., но детально скелеты были обследованы совсем недавно группой из четырех специалистов. В своей публикации в журнале «Nature» они сообщили, что один скелет, названный Ромито-1, принадлежал женщине 35 лет, отличавшейся разве что несколько субтильным телосложением. Зато другой скелет — Ромито-2 — был крайне необычным. Он принадлежал юноше примерно 17 лет, который был уродливым карликом всего около 1 м ростом. Радиоуглеродная датировка позволила определить возраст обоих скелетов в 11 500 лет. Эта находка, по мнению руководителей группы экспертов Дэвида Фрэйера из Университета штата Канзас (США), отодвигает наиболее ранний известный науке случай карликовых уродств у современного человека сразу на 5 тыс. лет. Гораздо важнее, однако, что она подтверждает нам, что палеолитические охотники и собиратели, говоря слова-

ми Фрэйера, «могли испытывать чувство сострадания к человеку, который в принципе никогда не мог быть полезным для коллектива».

Фрэйер и его коллеги обнаружили, что скелет Ромито-2 принадлежал человеку, который был чудовишно изуродован редкой формой недоразвитости всей костной системы, известной в медицине как акромегалическая дисплазия. Скорее всего такая болезнь могла быть следствием инбридинга (близкородственного скрещивания). Кости предплечий у карлика Ромито-2 были уродливо короткими и искривленными, так что он мог сгибать руки в локтях лишь с большим трудом. Передвигался он неуклюжей, переваливающейся походкой и, должно быть, очень быстро уставал, особенно при ходьбе по горной местности, характерной для Южной Италии.

Тем не менее, считает Фрэйер, судя по могиле карлика в пещере, он явно не был дискриминируемым членом группы. Скорее он был вполне принятым членом своего коллектива и более того — его захоронение могло иметь какое-то специальное ритуальное значение. Стены пещеры украшены фресками с изображениями животных, а сама пещера входом обращена к долине, которая могла служить важным миграционным проходом для верхнепалеолитических племен.

Как думает Фрэйер, женщина Ромито-1 могла играть особую роль в поддержании жизни палеолитического карлика. Рабочие, которые участвовали в первоначальных раскопках скелетов 25 лет назад, сообщили, что голова карлика в могиле лежала на щеке женщины и что рука женщины охватывала его маленькое тельце. Фрэйер отмечает также, что сходство между двумя скелетами — например, у обоих черепные кости соединялись сходным образом — может свидетельствовать о том, что эта женщина была матерью карлика.

Правда, по мнению других антропологов, Фрэйер может несколько

преувеличивать степень зависимости карлика от членов своей группы. «Конечно, здесь должны были существовать какие-то специальные механизмы поддержки, — говорит Дональд Ортнер из Смитсоновского института. — Но нужно помнить, что люди проявляют исключительные способности к самоприспособлению в случае тех или иных физических недугов». По словам Эрика Тринкауса из Университета штата Нью-Мехико, ископаемые находки подтверждают возможность выживания палеолитических гоминид с тяжелыми прижизненными переломами рук, артритами и другими физическими нарушениями. Но ни в одном обществе охотников и собирателей, утверждает Тринкаус, не зарегистрированы случаи восстановления здоровья у людей с тяжелыми переломами ног или другими нарушениями двигательной активности. «Такого человека просто оставили бы умирать на стоянке при следующей перекочевке», — говорит Тринкаус.

Космический мираж

В НАЧАЛЕ прошлого года В. Петросян из Станфордского университета и К. Линдс из Национальной оптической обсерватории сообщили, что они обнаружили две огромные звездные дуги очень правильной формы, как будто нарисованные гигантским циркулем. Дуги расположены в двух отдельных скоплениях галактик — Эйбелл 370 и 2244-02, каждое из которых находится на расстоянии около 7 млрд. световых лет от Земли. Длина обеих дуг составляет примерно 300 тыс. св. лет, что в три раза превышает размер Млечного Пути. Таким образом, они являются наиболее длинными светящимися объектами, которые когда-либо наблюдались. Петросян и Линдс первоначально предположили, что эти дуги могут представлять фронт ударной волны, образованной вспышкой сверхновой или звездами, захваченными черной дырой. Однако они признают, что ни одна теория не может объяснить необычайно правильную форму этих образований.

В настоящее время эти астрономы считают, что дуги представляют собой оптическую иллюзию и на самом деле являются изображениями отдельных галактик, увеличенными до огромных размеров мощными гравитационными линзами. Они пришли к такому выводу, анализируя спектр излучения от дуги в Эйбелл 370. Красное смещение спектра дуги, соответствующее приблизительно рассто-

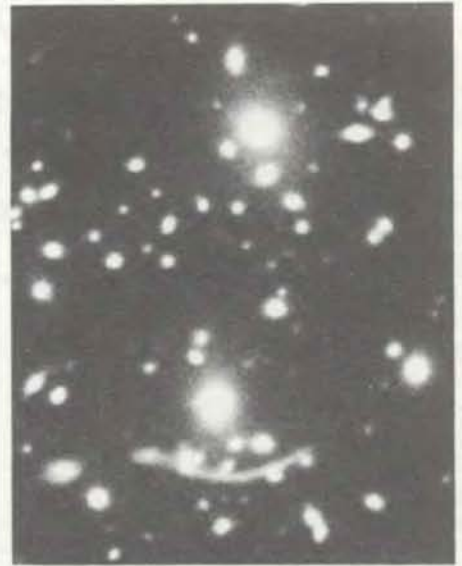
янию до Земли, примерно в два раза превышает красное смещение у галактик в скоплении Эйбелл 370. Исследователи пришли к выводу, что свет от дуги приходит не от окрестности Эйбелл 370, а от области, расположенной в два раза дальше. Астрономы из Тулузской обсерватории во Франции опубликовали данные, подтверждающие эту гипотезу.

Линдс полагает, что спектральный анализ света от дуги в скоплении 2244-02 даст те же результаты. «Я буду очень удивлен, — заметил он, — если эти две дуги не есть следствие одного и того же явления».

Ф. Шафе из Обсерватории Маунт-Гопкинс Смитсоновского института, специалист по гравитационным линзам, находит это объяснение происхождения дуг «весьма убедительным». «Когда я первый раз об этом услышал, я подумал: странно, что это не пришло мне в голову». Он отмечает, что дуги представляют собой наилучший пример так называемого кольца Эйнштейна — кольцеобразного изображения, которое должно появиться вокруг гравитационной линзы, расположенной точно между наблюдателем и наиболее удаленным объектом, испускающим свет.

Согласно Эйнштейну (который в 30-х годах высказал идею о том, как должны проявлять себя гравитационные линзы), при точном расположении линзы свет, проходящий на равных расстояниях от нее, отклоняется вовнутрь и сходится в месте расположения наблюдателя. Если линза расположена немного не точно, кольцо разбивается на две дуги, причем чем больше неточность расположения, тем больше разбивается кольцо, до тех пор пока не останется несколько маленьких частей. Единственный пример гравитационной линзы, наблюдавшейся ранее, относился к квазарам, где картина разбивалась на два или три точечных изображения, что было вызвано, как считает Шафе, плохим расположением линз.

Петросян вспоминает, что вначале он был обеспокоен тем, что в скоплениях Эйбелл 370 и 2244-02 наблюдалась только одна дуга. Но он и студент-выпускник А. Бергман создали модель, которая показывает, что линза, состоящая из двух или более объектов, обладающих массой, может давать одну дугу. Петросян считает, что две гигантские эллиптические галактики, ясно видимые внутри Эйбелл 370, и есть эти гравитирующие объекты. По его оценкам, чтобы отклонить свет на такой большой угол, эти гигантские галактики должны иметь массу, по крайней мере в 10 раз превышающую ту, которая полу-



ОГРОМНАЯ ДУГА, по-видимому, представляет собой изображение удаленной галактики, увеличенное двумя ближними галактиками (самые яркие объекты на фотографии) в скоплении Эйбелл 370.

чена из наблюдений их светимости. Это примерно согласуется с прогнозами относительно так называемого невидимого (темного) вещества, возможно находящегося в галактиках, считает Линдс.

Издательство
МИР
предлагает:

К. Хаусман
ПРОТОЗООЛОГИЯ

Перевод с немецкого

Книга профессора Свободного университета Западного Берлина представляет собой учебник, отличающийся высоким научным уровнем, компактностью и четкостью изложения материала. Описаны систематика и эволюция простейших, организация клеток, структура и функции органелл, а также методы сбора, культивирования и исследования простейших.

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

1988, 22 л. Цена 1 р. 80 к.



Бубонная чума

Это бактериальное заболевание, переносимое блохами, которые паразитируют на крысах, поражает людей в течение более 1000 лет. Факторы, ответственные за чередующиеся подъемы и спады этой болезни, пока до конца не известны

КОЛИН МАКЭВЕДИ

В 1346 г. население Европы, Северной Африки и прилегающей к ним западной части Ближнего и Среднего Востока составляло около 100 млн. человек. В течение следующих нескольких лет четверть из них умерла. Они оказались жертвами новой ужасной болезни, распространившейся в этих областях и убившей большинство из тех несчастных, которых она поразила. Болезнь остановила дальнейший рост населения, который был характерен для средневековья: в течение четырех лет только Европа потеряла около 20 млн. человек. Причиной такой мрачной картины была бубонная чума. Вспышка длилась с 1346 по 1352 г.; тогда она была известна как «великий мор» или «великая зараза». Позднее при упоминании событий прошлого ее стали называть «черная смерть». Это название сохранилось до сих пор.

Хотя последствия «черной смерти» можно считать поистине катастрофическими, ужасающими, какими они собственно и были после длительного периода, когда на Западе еще не было известно, какая болезнь уносит миллионы жизней, все же это был не первый случай опустошительного нашествия чумы на Европу. Примерно 800 лет до этого в период правления императора Юстиниана в VI в. была эпидемия примерно такой же силы. Эпидемия, хотя и не такого масштаба, повторялись и в следующих двух веках, после чумы периода Юстиниана, а также в течение 400 лет после «черной смерти». С тех пор масштабы поражения этим заболеванием резко сократились, хотя спорадически оно все же возникает в разных частях земного шара, включая США.

Из тех, кто в XIV в. заболел чумой,

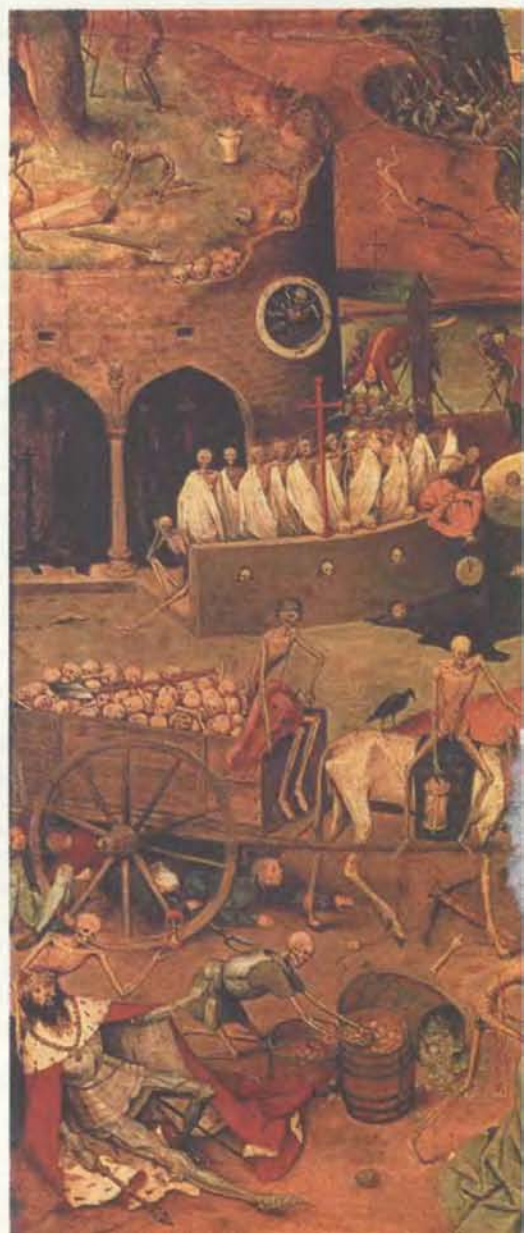
70—80% умирали. Действительно, симптомы сами по себе были настолько тяжелыми, что вызывали смерть в течение пяти дней. Название «бубонная чума» произошло от одного из ранних признаков болезни: появление больших, болезненных, названных бубонами припухлостей лимфатических узлов на шее, в паху и под мышками. Через три дня после появления бубонов люди, как правило, становились подавленными высокой температурой, начинали бредить и покрывались черными неровными пятнами, которые были результатом подкожных геморрагий. По мере развития болезни бубоны продолжали увеличиваться и становились все более болезненными, часто они лопались и вскрывались.

Говорят, что это произвольное вскрытие бубонов является особенно тяжелым явлением, способным довести даже умирающего до состояния буйства. До сих пор врачи рассматривают вскрытие бубонов как хороший признак, так как он всегда указывает на то, что организм больного продолжает еще бороться, даже спустя неделю и больше после начала болезни. Около половины обреченных на смерть умирали до наступления этой стадии.

Говоря о механизме передачи инфекции, можно отметить, что в некоторых случаях происходит прямое инфицирование кровотока человека, что ведет к септическому шоку, крупным геморрагиям и быстрой смерти. Эта форма болезни известна как септическая чума. В других случаях чума передается от человека к человеку через легкие (капельная инфекция), если возникает пневмония. При легочной (пневмонической) чуме жертвы этой

болезни сильно слабеют, харкают кровью и почти всегда умирают в течение нескольких дней.

Как ни странно, но ни частые случаи заболевания бубонной чумой, ни испытываемый перед нею ужас не заставили в то время никого попытаться выяснить природу этой болезни, ее первоначальные причины и механизм передачи. Когда разразилась «черная смерть», люди были склонны связывать возникновение эпидемии с неблагоприятными астрологическими ком-



СТРАХ, НАВОДИМЫЙ ЧУМОЙ, запечатлен на картине Питера Брейгеля Старшего «Триумф смерти», где смерть в виде бродячих скелетов уничтожает все живое. Ни король с его золотом, ни молодые кутилы за столом не могут избежать нашествия безжалостной армии мертвецов. На заднем плане скелеты сталкивают свои жертвы в наполненную водой могилу; неподалеку можно видеть бесплодный, безжизненный ландшафт. Апокалиптические видения такого рода были характерными во времена, когда чума опустошала Европу и за несколько дней уносила жизни многих людей.

бинациями или вредоносными атмосферными явлениями («миазмами»); ни одна из этих причин не могла мобилизовать людей на принятие действенных мер по борьбе с болезнью. Высказывались и предположения, которые возлагали вину за болезнь на умышленные козни ведьм, мусульман (идея, выдвинутая христианами), христиан (как полагали мусульмане) или евреев (как считали и те и другие).

ТАК ПРОДОЛЖАЛОСЬ до 1894 г., пока французский бактериолог Александр Иерсин не установил, что бубонная чума вызывается грам-отрицательной бактерией *Yersinia pestis*, относящейся к группе бактерий, известных как палочковидные бактерии. Чумные бактерии, хотя и изредка, находят повсюду во многих популяциях диких грызунов; передаются они от одного грызуна другому блохами. Бубонная чума наиболее часто распространяется азиатской крысиной блохой *Xenopsylla cheopis*. Когда блоха кусает инфицированную крысу, она проглатывает бактерии, которые раз-

множаются в ее пищеварительном тракте, образуя твердую массу, закрывающую кишечник. Блоха теряет способность глотать кровь, становится прожорливой, но всегда голодной. Стремясь насытиться, блоха многократно кусает животное-хозяина, изрыгая при этом обратно в его кровотоки бактерии чумы. Места укусов действуют как очаги распространения бактерий. Если животное погибает, что и происходит в большинстве случаев, блоха перескакивает на другую живую крысу. Таким образом болезнь быстро распространяется. Если количество живых крыс снижается, блохи перемещаются на другого теплокровного хозяина, на котором они обычно не кормятся. Им может быть человек или домашние животные; именно так и создаются условия для начала эпидемии.

Как только заболевание поражает человеческую популяцию, оно начинает передаваться прямо от человека человеку, иногда при вдыхании инфицированных капельных аэрозолей, выдыхаемых больным легочной чумой.

Однако нормальная передача происходит укусом крысиной блохой; в отсутствие грызунов, которые являются первичным носителем чумных бактерий и крысиных блох, болезнь не возникает.

Преимущественным причинным фактором эпидемии среди людей является эпизоотия, возникающая у грызунов. Именно она обуславливает начало и дальнейшее распространение болезни среди людей. Конечно, передача инфекции возможна только при условии, если эти две популяции находятся в близком контакте, но в средние века в этом отношении вряд ли одни районы сколько-нибудь заметно отличались от других. Как в сельской местности, так и в городах люди жили в окружении крыс.

Считается, что «черная смерть» двигалась вдоль трансасиатского «шелкового пути», по которому китайский шелк доставляли в Европу. Имеются две причины верить в это. Во-первых, вспышки чумы в 1346 г. были зарегистрированы в Астрахани и Сарая (теперь территория СССР); они были караванными пунктами



на нижней Волге. Во-вторых, только в 1347 и 1348 гг., а не раньше, Ибн Баттута, арабский ученый и путешественник, вернувшийся после пребывания в Индии, впервые сообщил новость о чуме, когда он достиг Алеппо в Северной Сирии. Эти данные исключают возможность распространения чумы по пути перевоза специй через Индийский океан и порты Персидского залива.

ВЕСЬМА вероятно, что впервые эта болезнь проникла в человеческую популяцию через сурков, крупных грызунов, живущих в Центральной

Азии (они являются родственниками лесного североамериканского сурка), чей мех был важным предметом торговли на всей территории этой части мира. Согласно историческим данным, трапперы собирали шкурки от мертвых или умирающих животных, радуясь, что нашли такой благодатный источник наживы, и продавали их торговцам, которые в свою очередь (не беспокоясь о большой заболеваемости среди сборщиков шкурок) перепродавали их западным купцам. Когда тюки с мехом сурков после долгой дороги на запад по «шелковому пути» первый раз распако-

вывали в Астрахани и Сарая, голодные блохи выскакивали из меха в поисках крови любой новой жертвы. Считается, что из Сарая болезнь перекочевала вниз по Дону в Каффу, крупный порт на Черном море, где большое количество крыс послужило благодатной почвой для размножения чумной бациллы. Отсюда чума без труда перенеслась в Европу, так как многие крысы в Каффе жили на кораблях, приписанных к портам европейских стран.

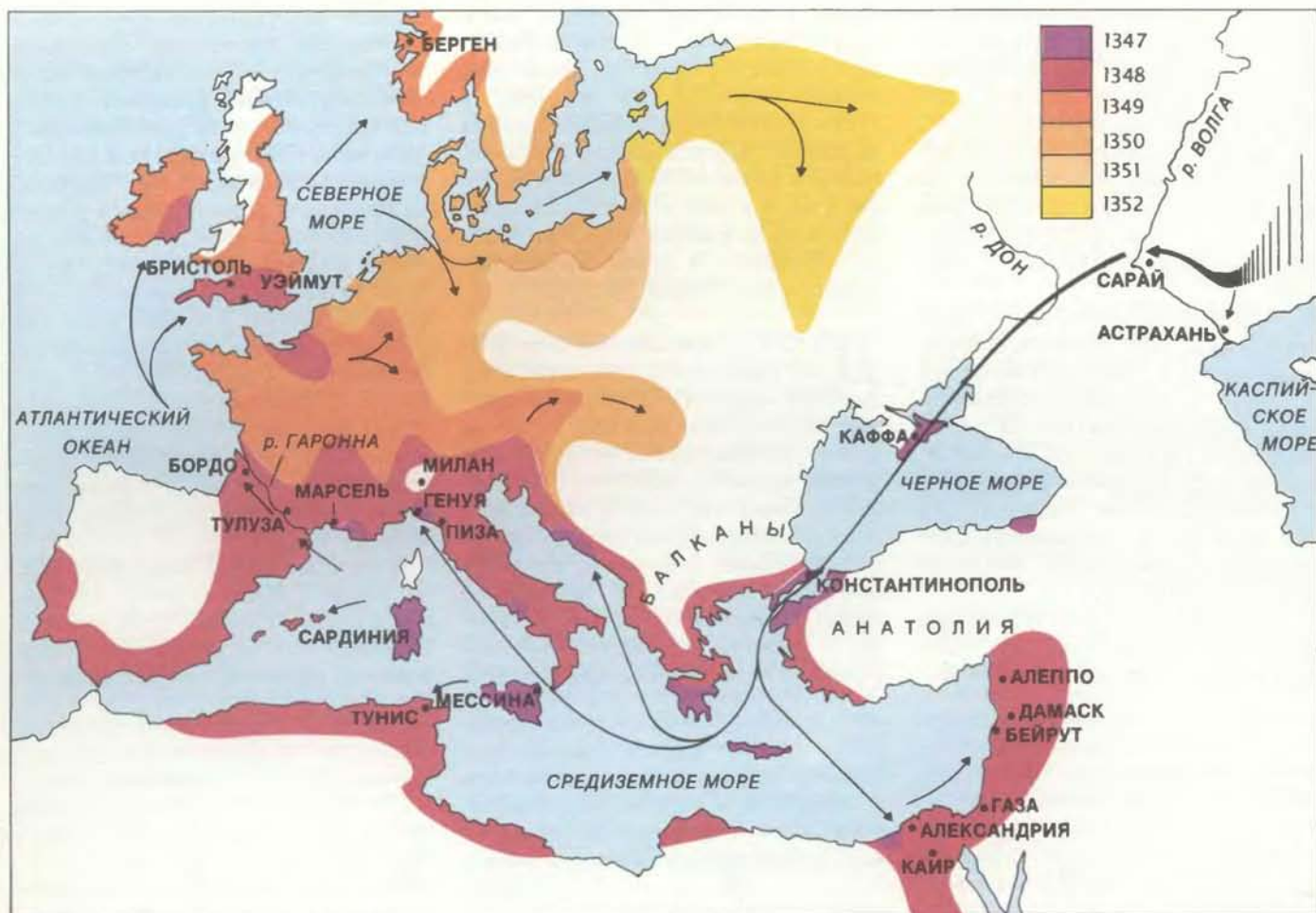
Действительно, придумать более эффективные средства распространения чумы, чем средневековые корабли, было бы очень трудно. Трюмы этих кораблей обычно кишели крысами, и, как только команда засыпала, они принимали вахту, носясь повсюду среди такелажа и буквально сея блох на всех палубах. Цикл инфекции от блохи к крысе и от крысы к блохе мог продолжаться только до тех пор, пока популяция крыс не сокращалась от заболевания до такой степени, когда она уже переставала быть способной прокормить всех блох, зараженных чумными бактериями. Голодные блохи в поисках нового хозяина переносили затем заболевание на человека. Не вызывает поэтому большого удивления тот факт, что к концу 1347 г. чума разразилась в большинстве портовых городов по дороге, соединяющей Каффу с Генуей на севере Италии.

НАИБОЛЕЕ важными были два порта вдоль этой дороги — Пера, пригород Константинополя, и Мессина в Сицилии. Оба они были промежуточными пунктами причала кораблей, пересекающих Средиземное море, и поэтому стали главными очагами дальнейшего распространения чумы. Византийский император Кантакузин, у которого от этой болезни в 1347 г. умер сын, дал красочное описание чумы в Константинополе. Он подробно рассказал, как чума, убивая «большинство людей», распространялась на греческих островах, вдоль побережья Анатолии и на Балканах. В Мессине первая вспышка была зафиксирована в октябре 1347 г. и стала началом эпидемии, которая быстро распространилась по всему острову.

Отсюда в начале 1348 г. «черная смерть» перенеслась на северный берег Африки в Тунис, а затем через Сардинию в Испанию. К тому моменту, когда «черная смерть» достигла Испании, она уже была в сердце Европы, в чем отчасти повинны генуэзцы, которые, как свидетельствует история, бессердечно отказывались принимать корабли с востока со своими больными соотечественниками. Эта



КОСТЮМ ВРАЧА, который носили во время вспышки чумы в Марселе в 1720 г. Птичьего вида облачение из кожи покрывало врача с головы до пят; полагали, что такое одеяние способно защитить от заразы. В большой клюв клали приятно пахнущие травы для фильтрации заразы, передающейся по воздуху; в жезле был ладан, который, как думали, может защитить от нечистой силы. Даже отверстия для глаз, в которые вставляли стеклянные линзы, были защищены.



«ЧЕРНАЯ СМЕРТЬ» пришла в Европу из центральной Азии по «шелковому пути», достигнув в 1347 г. Каффы. Отсюда она была перевезена кораблями в главные порты Европы и Северной Африки. Большая часть Европы была поражена

эпидемией, которая затихла в 1352 г. К этому времени она, пройдя по кругу, достигла мест, откуда началась. Милан, один из крупнейших городов, избежал чумы; как полагают, это объясняется тем, что он удален от моря.

бессердечность была не только малоэффективной (поскольку город был уже поражен в такой степени, как никакой другой в Европе), но и ускорила распространение чумы по всей Европе, так как не принятые в Генуе корабли вынуждены были направиться в другие порты, такие, как Марсель и Пиза.

К этому времени эпидемия уже свирепствовала по всему побережью Средиземноморья. Корабли, доставляющие шелк, рабов и меха, привезли ее в Александрию еще до конца 1347 г.; отсюда она распространилась на юг в Каир, на восток в Газу, Бейрут и Дамаск и наконец вдоль северного побережья Африки в Марокко.

До начала 1348 г. «черная смерть» перескочила из Средиземноморья на атлантическое побережье Европы. Она пересекла юго-западную Францию, захватив по дороге региональную столицу Тулузу, и быстро продвинулась вниз по Гаронне в Бордо на западном берегу. Отсюда, вероятно, один из кораблей, доставляющих бордоское вино (кларет) на британ-

ский рынок, привез «черную смерть» в Англию. Впервые она была зарегистрирована здесь в 1348 г. в Уэймуте на южном побережье Англии и, как полагают, распространилась в Ирландии, попав туда из Бристоля.

Из Англии через Северное море чума попала в Скандинавию, зажав ее в свои смертельные клещи. Согласно одной из легенд, нашествие чумы на Скандинавию началось в 1349 г., когда в мае из Лондона в Берген направился корабль с полным составом команды и грузом шерсти. По имеющимся сведениям корабль несколько дней спустя видели дрейфующим у берегов Норвегии. Местные жители, которые подплыли, чтобы узнать, в чем дело, нашли команду мертвой. Они вернулись на берег, забрав с собой шерсть, а вместе с ней, ничего не ведая, и переносчиков чумы. Так началась цепная инфекционная реакция, когда один поселок за другим вдоль норвежского побережья становились жертвами завезенной заразы.

В следующем году «черная смерть» подвергла опустошению населенные

пункты Дании и Германии, затем в 1351 г. проникла в Польшу, а год спустя — в Россию. Итак, круг замкнулся: болезнь не только вернулась в места, отстоящие лишь на несколько сот километров от волжских степей, откуда началось ее опустошительное шествие по Европе, но и после четырех изнурительных лет смертельного ужаса, каким была охвачена западная Европа, она наконец отступила.

ОБЩЕСТВО, которое пережило «черную смерть», стало довольно процветающим. Оставшиеся в живых люди наследовали богатство своих умерших родственников, и многие имели возможность занять лучшее положение, которое прежде было для них недостижимым. Однако это благополучие длилось не долго. В 1356 г. произошла вторая вспышка чумы в Германии, которая быстро распространилась по всей Европе. Особые страдания выпали на долю детей, родившихся после эпидемии «черной смерти».

Вслед за этими печальными собы-

тиями чума регулярно возвращалась в Европу; действительно, похоже, что континент никогда не был свободным от нее, за исключением отдельных периодов не более чем в несколько лет. Хотя все последующие эпидемии по уровню общей смертности никогда не превосходили «черную смерть», они все же продолжали сдерживать рост населения в Европе до конца XIV столетия.

В это время было достигнуто равновесие между естественным приростом населения и смертностью от чумы, а в XV в. численность населения начала восстанавливаться. В особо пораженных регионах для восстановления прежней численности населения потребовалось более столетия, так что к концу XVI в. численность населения повсюду была выше, чем перед началом «черной смерти».

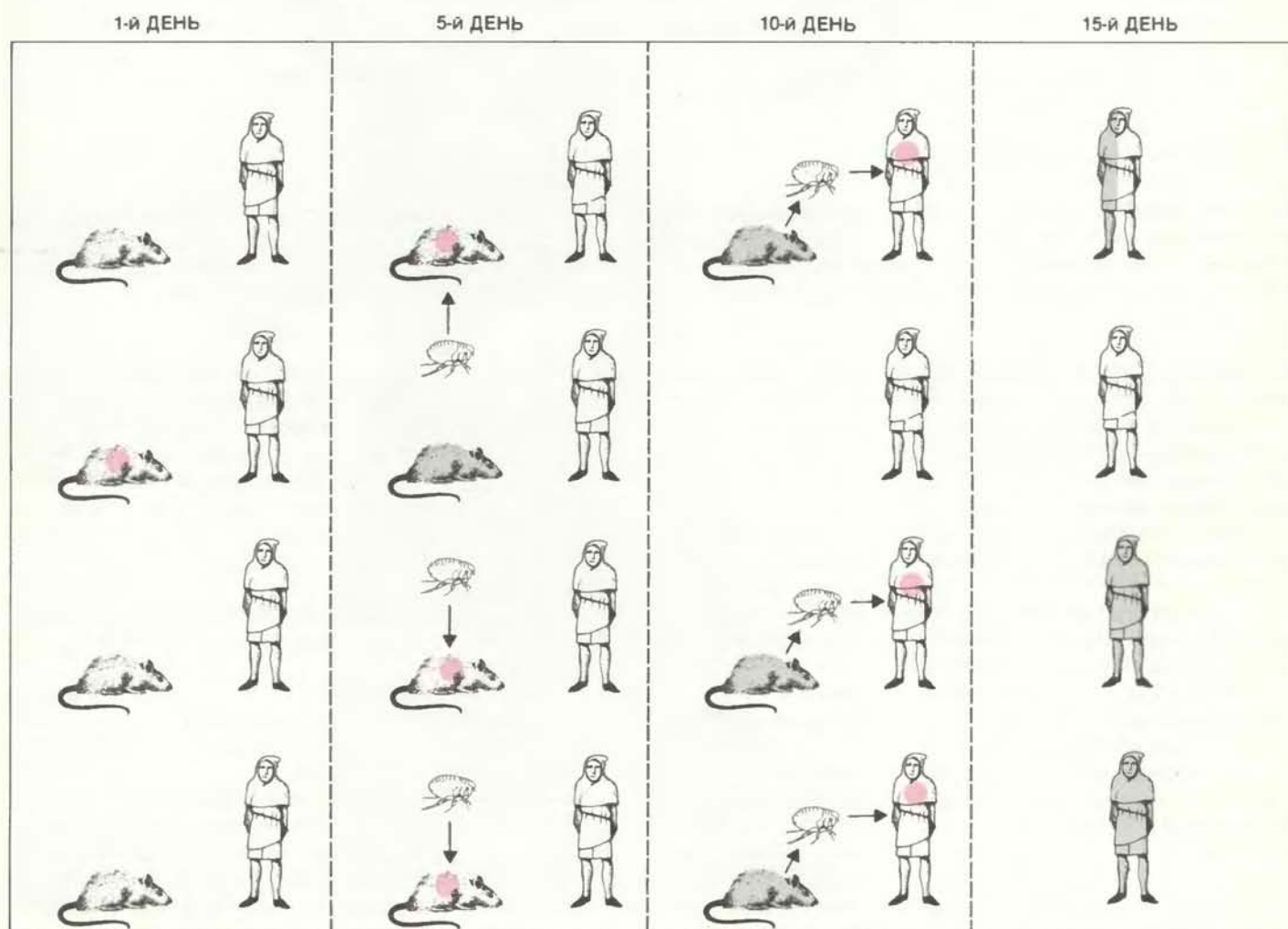
Странно, но когда чума появлялась вновь (а это продолжало случаться, хотя и нечасто), она почти всегда про-

текала с такой же тяжестью, как и другие вспышки, зарегистрированные в прежние годы. Во время последней эпидемии во Франции в 1720—1722 гг. умерла почти половина населения Марселя вместе с 60% горожан в соседнем Тулоне, 44% жителей в Арле и 30% в Эксе и Авиньоне. Эпидемия не распространилась дальше Прованса, и общее количество умерших было менее 100 тыс.

До XVI в. повсеместно полагали, что чума распространяется в результате заразного начала (контагиона): токсического фактора, который может передаваться от больного здоровому человеку. Передача от человека к человеку, как думали, может проходить или прямым путем через физический контакт с больным, или через предметы одежды и постельное белье. В ответ на это во многих городах и сельских местностях были учреждены карантинные правила. На-

пример, власти Англии рекомендовали запираить жертв чумы в их домах или помещать в специальные «чумные дома». Одним из примеров крайней приверженности народным обычаям может быть известный случай с Уильямом Момпессоном, пастором из маленькой деревни Эйам в Дербишире, который убеждал всю общину перейти на карантин, когда в 1666 г. чума разразилась в этой местности. Один за другим его прихожане, кто оставался верным своим зараженным домочадцам, становились жертвами болезни. Смертность, составившая 72%, указывает, что община, видимо, имела 100%-ную заболеваемость (зараженность). Право, это была слишком большая плата за неправильно понятую идею.

Изоляция людей в своих домах была, конечно, одним из наихудших способов борьбы с чумой. Чума является болезнью «местоположения», с наибольшей вероятностью она проявля-



РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЧУМЫ среди членов одной семьи в средневековье могло быть очень быстрым, если крысы, живущие в доме, оказывались инфицированными. Зараженная крыса, помеченная красной точкой в графе «1-й день», на 5-й день погибала от болезни. Когда крыса поды-

хает, блохи покидают ее, перенося чуму другим крысам в доме. К 10-му дню эти крысы тоже погибают, и теперь блохи переходят на людей, инфицируя примерно 75% из них. К 15-му дню примерно половина людей в доме умрет от чумы; четверть выздоровеет, а четверть избежит заражения.

ется, когда крысы, блохи и люди находятся в близком контакте друг с другом. При держании людей взаперти шансы быть укушенными блохами, переносящими чуму, или инфицированными через близкий контакт с другим человеком еще больше увеличиваются.

Власти понимали, что карантин опасен для здоровых людей, содержащихся взаперти вместе с больными родственниками, но тем не менее они заставляли людей идти на это, полагая, что некоторые жизни должны быть принесены в жертву, чтобы остановить дальнейшее распространение болезни. Так как основным переносчиком чумы являются крысы (а они были свободны в своем передвижении), все карантинные усилия оказались потерей времени и жизни.

Были также сделаны попытки налагать карантин на пассажиров и на грузы, прибывавшие на кораблях из-за моря. Когда заболевание с подозрением на чуму обнаруживалось среди членов команды или пассажиров, корабли переводились в «лазареты» (карантинные станции), где содержались до тех пор, пока власти не сочтут, что они безопасны. Так, в Марселе в мае 1720 г. парусное судно «Гран Сен-Антуан» было помещено в карантин на три недели, так как восемь человек из его команды умерли на обратной дороге с Ближнего Востока. Несмотря на такие усилия по ограничению распространения чумы, болезнь проникла в Марсель — вначале она появилась среди докеров, которые разгружали груз с корабля после его возвращения из карантина, а затем распространилась среди остального населения города.

Существует мало свидетельств тому, чтобы такие карантинные меры были когда-либо очень эффективными. Венеция была одним из первых морских портов, которые ввели карантинные правила в начале XV в., установив смертную казнь всякому, кто нарушит эти правила. Однако чума поражала Венецию не реже, чем другие города Италии, по-видимому, из-за того, что предохраниться от проникновения корабельных крыс с находящегося на карантине судна на берег было невозможно. Крысы и несли чуму в город.

НАКОНЕЦ, после многочисленных нашествий и отступлений, чума исчезла в Европе. Последнее испытание выпало на долю англичан в 1665 г., когда в Лондоне разразилась «великая чума»; закончилась она зрелищным финалом, вошедшим в историю

как «великий пожар» 1666 г. В то время для лондонцев было естественным верить, что своим избавлением от чумы они обязаны большому очистительному пожару. Позднее родилась идея, что за свою резистентность к чуме лондонцы должны быть благодарными той реконструкции, которая началась после пожара, и тому факту, что перестроенный город может гордиться новыми кирпичными домами и широкими, лишенными грязи улицами, появившимися на месте беспорядочных строений и зловонных узких улочек средневекового периода.

Эти объяснения привлекательны, но они не подходят для внимательного исследования вопроса. Одна из причин заключается в том, что пожар уничтожил только центральную часть Лондона, т. е. районы, которые меньше всего поражались чумой в любую из вспышек в начале столетия, и в то же время оставил нетронутыми перенаселенные пригороды, которые были рассадником чумы в прежние годы. Вторая причина в том, что другие города в Европе, такие, как Париж и Амстердам, остались нетронутыми чумой в тот же период — феномен, который не может быть связан с «великим пожаром» в Лондоне.

Другая, более подходящая теория (хотя тоже не вполне убедительная) основана на том, что исчезновение чумы по времени совпало с началом постепенного улучшения системы здравоохранения и гигиены. Конечно, улучшение гигиены нельзя не учитывать как профилактический фактор, однако это не объясняет, почему последующие вспышки чумы, как и раньше, протекали очень тяжело и несли с собой высокую смертность. Тем не менее каждый раз они появлялись все дальше и дальше от центра Европы. Это выглядело почти так, как будто европейские страны вырабатывали какую-то форму защиты от чумы, которая сдерживала распространение инфекции. На севере дорога отступления чумы была направлена на восток; в Средиземноморье она уходила на юг. Чем позже возникали эпидемии, тем, казалось, они меньше были способны распространяться. Кроме того, это происходило в то время, когда по всем имеющимся данным перевозки наземным и морским транспортом интенсивно увеличивались.

Когда, наконец, в конце XIX в. была установлена роль крыс в распространении бубонной чумы, то стали полагать, что затухание чумы можно объяснить изменениями в динамике популяции черных крыс (*Rattus rattus*). На основе наблюдений в течение XVIII в. было установлено, что чер-

ная крыса, исторический носитель чумной инфекции, в основном была вытеснена новым видом — серой крысой (*Rattus norvegicus*), которая оказалась намного менее активным переносчиком чумы: она также чувствительна к чумной палочке, как и черная крыса, но не живет обычно близко к человеку. Серая крыса, как правило, обитает в темных погребах и сточных трубах, в то время как черные крысы наводняют в доме верхние комнаты и чердаки. Так как азиатская крысиная блоха может максимально прыгнуть на 90 мм, разница в предпочтительном обитании разных видов крыс может оказаться достаточным фактором для санитарного отделения людей от блох, инфицированных чумой.

Предположение о том, что серые крысы сыграли определенную роль в сдерживании масштабов чумной эпидемии в Европе, кажется правдоподобным, но оно не вяжется с географическими данными; в XVIII в. серые крысы распространялись в Европе с востока на запад, в то время как чума отступала с запада на восток. В Москве серые крысы появились намного раньше, чем там разразилась исключительная по своим масштабам эпидемия чумы в 70-е годы XVIII в.; в Англии их не было до 1727 г., спустя более 60 лет после последней вспышки чумы в этой стране.

ПОКОЙНЫЙ Эндрю Б. Апплеби из Университета Сан-Диего предложил альтернативную теорию, согласно которой на протяжении XVII в. у определенного процента черных крыс выработалась невосприимчивость к чуме, а затем во время следующих 100 лет популяция этих невосприимчивых животных увеличивалась, распространяясь по всей Европе. Хотя эти крысы могли быть еще инфицированы чумными бактериями, сами они уже не погибали и, таким образом, могли поддерживать большую популяцию блох, которые в таких условиях не нуждались в смене хозяина. Эта теория все же не подтверждает того, что известно о резистентности к чуме в популяциях животных. Как отмечает Пол Слек из Оксфордского университета, в популяциях крыс часто развивается резистентность, когда они контактируют с патогенными бактериями или вирусами, но такая резистентность очень кратковременна и поэтому едва ли может быть причиной появления иммунитета к чуме у подавляющего большинства крыс.

Более вероятна теория, утверждающая, что появился новый вид чумных бактерий, *Yersinia pestis*, кото-

рый оказался менее вирулентным, чем более ранний штамм. Будучи менее вирулентным, он может действовать как вакцина, стимулируя у инфицированных животных и людей относительный иммунитет к более вирулентному штамму этих бактерий.

Микробиологическая теория более приемлема по многим соображениям. Во-первых, она подтверждает высказывание американского патолога Т. Смита, что «патологические проявления являются только инцидентами в развитии паразитизма», так что за длительный период времени легкие формы болезни имели тенденцию заменять более вирулентные и тяжелые. Во-вторых, она объясняет, почему снижение активности чумы связано с ее неспособностью распространяться вокруг локальной вспышки: болезнь не может перемещаться на большие расстояния, когда количество чувствительных к ней людей незначительно. В-третьих, она поддерживается существованием близкого родственника чумной бациллы — иерсинии псевдотуберкулеза, *Yersinia pseudotuberculosis*, которая не продуцирует у крыс видимого заболевания, но вызывает у них высокий уровень иммунитета к чуме.

Мы не знаем, распространялась ли постепенно иерсиния псевдотуберкулеза или родственные ей виды со схожими свойствами среди популяций грызунов в начальный период современной Европы, создавая при этом условия, не позволяющие чуме укорениться в этом регионе. Пока нет прямых доказательств в поддержку этой гипотезы, но по сравнению с другими она представляется наиболее резонансной.

Открытие и широкое применение антибиотиков позволили создать несколько форм защиты людей от чумы. Хотя болезнь еще возникает регулярно в некоторых районах Африки, Южной Америки и на юго-западе США (в 1986 г. в США было зафиксировано 10 случаев), она, по видимому, уже никогда не достигнет эпидемического уровня, поскольку теперь мы знаем, как она распространяется, какие необходимы медико-санитарные меры и как лечить больных чумой. Тем не менее многие вопросы, связанные с чумой, все еще остаются без ответа. Например, совсем не ясны механизмы передачи чумы в сельской местности, где популяции крыс чрезвычайно велики. И как объяснить распространение чумы по всему миру в наши дни? Наконец, почему только отдельные популяции грызунов являются резервуарами этой болезни, в то время как другие совершенно свободны от нее?

Спасение в неволе

ГЕПАРД, единственное млекопитающее, способное в бегах развивать скорость более 100 км/ч, в настоящее время находится на финишной прямой к вымиранию. Его существованию угрожают два фактора. Во-первых, у этого вида низкая генетическая изменчивость, что проявляется в неэффективности размножения, чрезмерной смертности детенышей и подверженности болезням*. Такие проблемы усугубляются в неволе, и численность особей, живущих в зоопарках, стремительно падает. В зоопарках США из 200 животных только 12 активно размножаются, что намного ниже уровня, необходимого для поддержания популяции.

Во-вторых, из-за деятельности человека сокращаются естественные местообитания. В Африке, в частности в Намибии, сельское хозяйство необратимо захватило открытые пространства, на которых гепарды охотились на газелей, антилоп и других животных. Крестьяне, озабоченные ущербом, который наносят гепарды домашнему скоту, добились закона, дающего право ловить и отстреливать этих животных. По официальным данным, в Намибии за 1985 г. людьми убито 700 гепардов; осталось их, вероятно, всего около 2000.

Л. Маркер, сотрудник фирмы Wildlife Safari в шт. Орегон и хранитель Международной родословной книги гепарда (эта должность учреждена Международным союзом директоров зоопарков с целью координировать размножение гепарда в неволе), разработал новаторский план борьбы против вымирания гепарда. Проект «Большой план по спасению гепарда», одобренный Американской ассоциацией зоопарков и аквариумов, должен обеспечить выживание вида путем создания жизнеспособной популяции в неволе.

Первый шаг — глубокий детальный анализ таких факторов, как питание, стрессовые воздействия и особенности поведения, от которых, как считается, зависят плодовитость и смертность. Есть надежда, что с трудностями размножения гепарда в неволе можно справиться и тогда в зоопарках сформируется самоподдерживающаяся популяция. Животных,

выращенных в неволе, предполагается выпускать в природные местообитания с тем, чтобы поддержать уменьшающуюся численность вида в естественных условиях.

Чтобы начать реализацию проекта, необходимо в совокупную популяцию гепарда, существующую сейчас в зоопарках, ввести свежую группу здоровых особей, полноценных с точки зрения продолжения рода. В Намибии крестьяне согласились не уничтожать гепардов на своих землях, а передавать пойманных животных государственным служащим. Каждая особь, предположительно предназначенная для участия в размножении в неволе, будет проходить тщательное ветеринарное обследование, и те экземпляры, которые окажутся совершенно пригодными к размножению, подлежат отправке в США, где их распределят по зоопаркам, принимающим участие в проекте.

План с энтузиазмом принят сотрудниками соответствующих организаций и в США, и в Намибии, и если все пойдет хорошо, первые 50 гепардов отправятся за океан этим летом. «Первоочередная задача в том, — сказал С. О'Брайен из Национального института рака, являющийся главным консультантом проекта «Большой план по спасению гепарда», — чтобы убедить крестьян не убивать гепардов, а ловить их. Мы вовсе не хотим разводить животных в неволе в ущерб природным популяциям».

Дарвиновская эволюция молекул

ЛЕГКО увидеть, как в результате действия естественного отбора в ходе эволюции возникают такие морфологические признаки, как отстоящий большой палец или толстый покров шерсти. Гораздо труднее продемонстрировать дарвиновский отбор в молекулярном масштабе: показать, что специфическая последовательность аминокислот в белке или нуклеотидов в гене представляет собой выработавшееся в ходе эволюции приспособление к среде обитания или образу жизни. К.-Б. Стюарт и А. Уилсон из Калифорнийского университета в Беркли и Дж. Шиллинг из фирмы California Biotechnology, Inc., изучая особенности пищеварения у обезьян из группы тонкотелов, или лангуров, получили данные, позволяющие им описать адаптивные изменения одного белка; их статья опубликована в журнале «Nature».

* См. статью: О'Брайен С. Гепард в генетической опасности, «В мире науки», № 7, 1986. — Прим. ред.

Исследователям пришлось распутывать клубок множества изменений на молекулярном уровне, происшедших в результате «нейтрального дрейфа» генов. При сравнении последовательности определенного белка или гена у разных видов обычно оказывается, что скорость изменения у всех видов и во все периоды геологического времени примерно одинакова. Если же молекулярные изменения отражают давление естественного отбора, должна наблюдаться совершенно иная картина. Многие специалисты придерживаются мнения, что постоянство скорости молекулярных изменений свидетельствует об их нейтральности, т. е. эти изменения не дают преимущества организму и не приносят ему вреда, а возникают случайным образом.

В своей статье Стюарт и его коллеги сообщают, что у лангуров эволюция фермента лизоцима не укладывается в концепцию нейтрального дрейфа генов. У большинства млекопитающих лизоцим содержится в слезной жидкости, слюне и в лейкоцитах, где он служит для уничтожения проникших в организм бактерий (лизоцим разрушает стенку бактериальной клетки). У жвачных, например коров и овец, лизоцим используется еще для другой цели: с его помощью переваривается целлюлоза, в значительном количестве содержащаяся в растительной пище. У этих животных специализированная передняя часть желудка действует наподобие ферментера — там бактерии расщепляют целлюлозу; а в задней части желудка сами бактерии перевариваются при участии лизоцима. Сходная специализация отделов желудка развилась в ходе эволюции независимо у некоторых обезьян, питающихся листьями, в частности у лангуров.

Стюарт определил аминокислотную последовательность лизоцима одного из видов лангура и сравнил ее с таковой бабуина, человека и ряда других видов, в том числе коровы. Если бы лизоцим возник в результате только нейтрального дрейфа генов, белок каждого из этих видов дивергировал бы с постоянной скоростью по сравнению с белком любого другого вида. Например, лизоцим лангура и лизоцим бабуина должны были измениться в равной степени, с тех пор как эти виды обособились от общего с человеком предка. В свою очередь белки этих трех видов приматов должны в равной степени отличаться от лизоцима коровы. Однако анализ показал, что у лангура лизоцим изменялся вдвое быстрее, чем у бабуина. Еще важнее, что примерно в половине из тех положений аминокислотной по-

следовательности, которые изменялись, белок лангура приобрел сходство с белком коровы. Как считают авторы статьи, в совокупности полученные результаты означают, что эволюция лизоцима лангура на 50% обусловлена дарвиновским отбором. Они предполагают, что у лангуров лизоцим попал под давление естественного отбора, когда этот фермент стал принимать участие в пищеварении, как у коров. Стюарт и Уилсон также изучили значение конвергентных изменений аминокислотной последовательности. В 1987 г. на симпозиуме в Колд-Спринг-Харборе они выдвинули гипотезу, что те аминокислоты, по которым лизоцимы лангура и коровы совпадают, важны для функционирования фермента в кислом содержимом желудка и для устойчивости к продуктам брожения и к пищеварительным ферментам.

Цунами не застанет врасплох

ПРИЛИВНЫЕ волны, возникающие при подвижках морского дна и вулканических извержениях, в бассейне Тихого океана унесли за последние 100 лет 52 000 жизней. Системы, предупреждающие о приближении гигантской волны — цунами, должны работать быстро: большей частью люди гибнут в первые 20 мин от момента возникновения волны и в пределах 100 км от ее источника. Развивающиеся страны не могут позволить себе иметь сложные системы, типа тех, что размещены на Гавайях, островах Французской Полинезии, Аляске, Японии и тихоокеанском побережье СССР (их установка обходится в 1 млн. долл., а эксплуатация — в 500 тыс. долл. в год). Однако теперь ситуация меняется: Национальное управление по исследованию океана и атмосферы (НОАА) разработало систему, установка которой обходится всего в 20 тыс. долл.; кроме того, она может обслуживаться неспециалистами и посылает предупреждение об опасности в течение одной минуты — в 10 раз быстрее, чем большие системы. Для этой цели используются приборы, устанавливаемые вне зоны шельфа, и один из спутников, принадлежащих НОАА.

При поддержке Агентства по международному развитию группа сотрудников НОАА построила опытную станцию в Вальпараисо. (На этот город, расположенный на тихоокеанском побережье Чили, за последние 200 лет обрушилось 18 цунами.) Вследствие своей простоты и кон-

структивных особенностей (она выполнена из модулей) опытная система, по словам руководителя группы Э. Бернарда, служит «основой для более эффективного использования систем предупреждения в целях смягчения разрушительных воздействий цунами».

В сотрудничестве с местными официальными лицами группа из НОАА, опираясь на исторические данные и компьютерное моделирование, разработала план эвакуации населения из тех частей города, которые находятся под наибольшей угрозой затопления во время быстрого подъема воды. Затем специалисты установили один часто используемый прибор, называемый акселерометром, на материнской породе под Вальпараисо и датчики уровня воды в порту города. Когда землетрясение силой 7,0 или выше по шкале Рихтера происходит в пределах 100 км от берега, акселерометр улавливает колебания породы и посылает сигнал на спутник погоды НОАА. Со спутника сигнал передается компьютеризованному приемнику в Вальпараисо. Компьютер запрограммирован на посылку срочного сообщения по телефонным каналам различным официальным лицам; одновременно начинается постоянное слежение за уровнем воды.

Эта система, замечает Бернард, надежна, работает на батареях и доступна по цене. Каждая компонента может дополняться новыми устройствами или использоваться отдельно, а на связь со спутником расходуется совершенно незначительное время.

С тех пор как была установлена эта система, никаких цунами в этом районе не было. Но в ходе 5000 тестов, проведенных в последний год, она сработала с надежностью 98%, опознав «землетрясения» с магнитудой выше пороговой величины. В то же время, согласно Бернарду, более сложные и дорогие системы, обеспечивающие непрерывное слежение за сейсмической активностью и уровнем моря с помощью самых совершенных датчиков, имеют надежность лишь около 90% и тратят от 10 до 15 мин на передачу предупреждения об опасности. Бернард считает, что жертвовать точностью ради скорости имеет смысл: какое имеет значение, в конце концов, что во время проведения эвакуации «сила землетрясения равна не 7,0, а 7,8», указывает он.

Наука вокруг нас

След движущегося судна представляет собой сложную интерференционную картину



ДЖИРЛ УОЛКЕР

ТОТ, кому доводилось летать над водой на не слишком большой высоте, вероятно, замечал, что плывущее судно оставляет за собой хорошо выраженный след. Он всегда имеет вид буквы V, которая как бы буксируется судном, и состоит из большого количества наложенных друг на друга волн. Внешний вид следа наводит на мысль, что след судна аналогичен ударной волне, возникающей за сверхзвуковым самолетом. (Хотя в воздухе ударная волна обычно не видна, ее можно сфотографировать с помощью специальных методов в аэродинамической трубе, где установлена модель самолета.) Ударная волна также имеет V-образную форму, причем вершина угла как бы прикреплена к самолету.

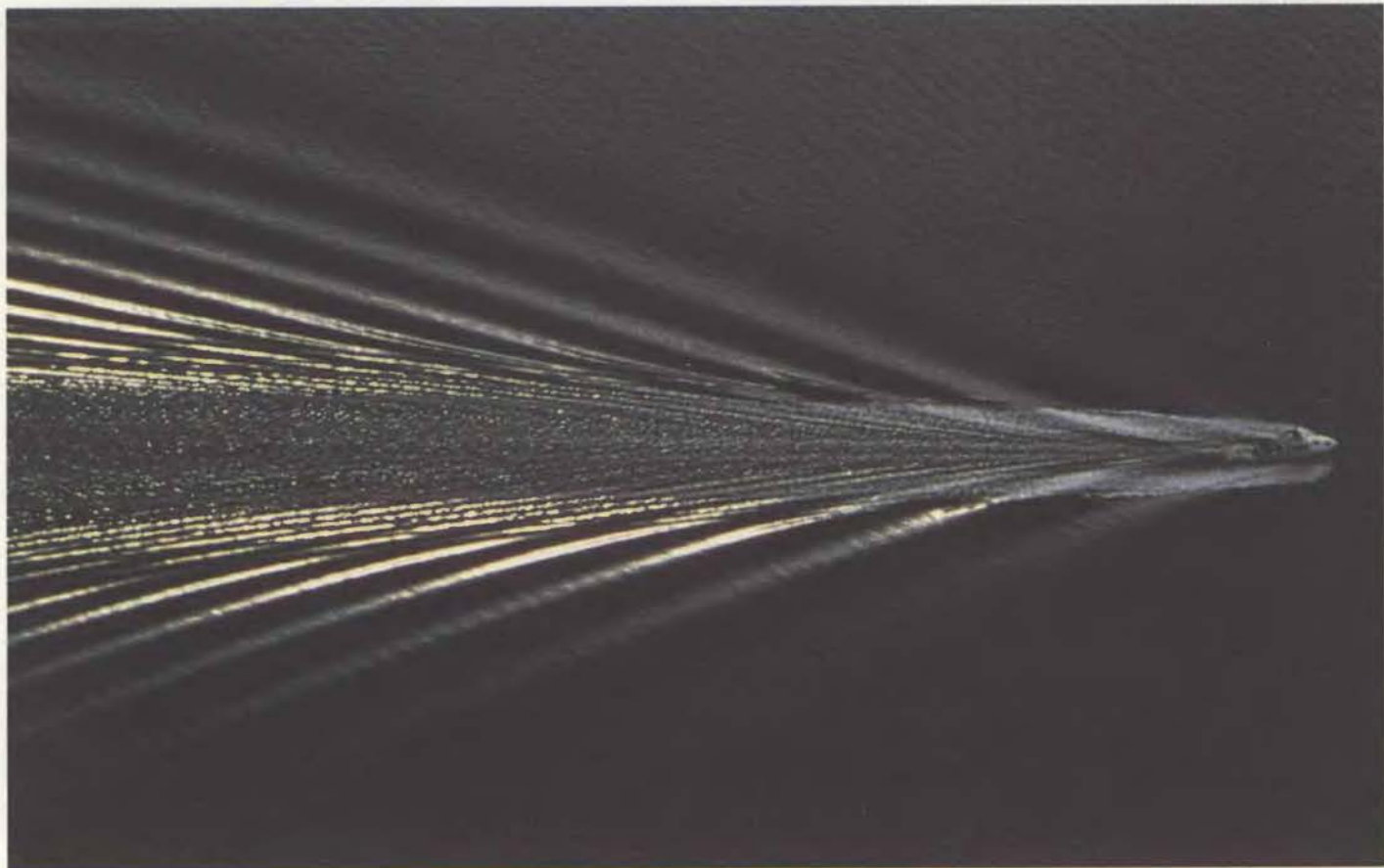
Несмотря на внешнее сходство двух картин, в основе их лежат разные механизмы. Это становится ясно, если обратить внимание на угол между двумя лучами V-образного следа. В ударной волне этот угол зависит от отношения скорости самолета к скорости звука на данной высоте. Если скорость самолета возрастает, угол уменьшается, так что буква V сужается. При уменьшении скорости происходит расширение следа (если скорость самолета ниже скорости звука, след не возникает).

Если бы след движущегося судна представлял собой ударную волну, угол раствора следа также должен был бы зависеть от скорости судна. На самом деле он всегда равен 39° , независимо от скорости движения суд-

на. Всякое движущееся в воде тело, будь то утка или громадный танкер, оставляет след с одним и тем же углом раствора. Этот след отличается также от ударной волны тем, что имеет сложную структуру. Лучи буквы V не являются простыми одиночными длинными волнами, а составлены из пакетов коротких волн, которые и придают следу «перистую» структуру (см. рисунок на соседней странице). Между лучами буквы V располагаются изогнутые поперечные волны, которые кажутся движущимися вместе с судном.

Механизм, ответственный за создание следа движущимся судном, был впервые проанализирован лордом Кельвином в 1887 г. Найти решение оказалось непросто: для этого потребовалось разработать новый математический метод, названный методом стационарной фазы. С его помощью Кельвин приближенно описал, как создаются волны судном и как они накладываются друг на друга (интерferируют). Исследования генерации следа продолжаются по сегодняшний день ввиду практической важности проблемы: ведь на генерацию следа уходит значительная часть энергии судна.

Большинство людей, вероятно, представляют волну на воде в виде си-



Вид с воздуха следа, оставляемого моторной лодкой

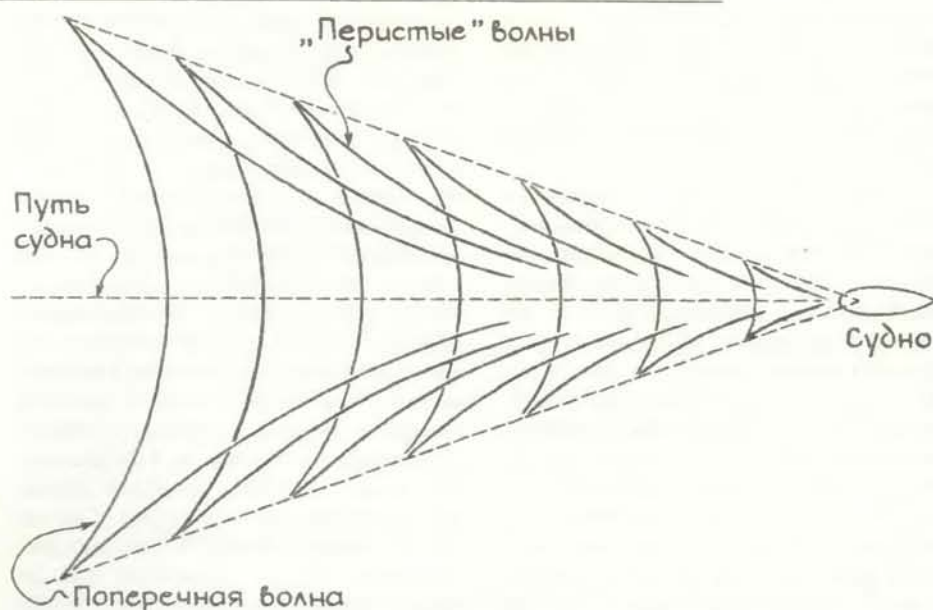
нусоидальных колебаний поверхности, распространяющихся с постоянной скоростью. Назовем такую волну фазовой волной; она состоит из гребней и ложбин, расположенных на одинаковом расстоянии друг от друга и имеющих одинаковые высоты и глубины. Расстояние между гребнями равно длине волны. Число гребней, проходящих через неподвижную точку за единицу времени, определяет частоту волны; при данной скорости распространения волны ее частота обратно пропорциональна ее длине. Амплитуда волны равна высоте гребня относительно невозмущенной поверхности воды.

Хотя фазовая волна служит удобной моделью, в природе она в чистом виде практически никогда не встречается. Связано это с тем, что скорость волны на воде зависит от ее длины (или, что то же, от частоты). Поэтому всякое возмущение водной поверхности приводит к появлению сложной волновой картины, которая представляет собой результат интерференции многих фазовых волн, распространяющихся с различными скоростями. Хотя отдельные фазовые волны и присутствуют в этой картине, они скрыты от глаз.

Получить некоторое подобие фазовой волны можно, если поддерживать в воде колебания с постоянной частотой. (При этом следует позаботиться и о том, чтобы погасить отраженные волны, которые в противном случае нарушали бы картину.) Не слишком близко от волнопродуктора колебания поверхности в этом случае будут близки к синусоидальным. Частота этой волны будет совпадать с частотой колебаний волнопродуктора.

Измерим скорость волны при данной частоте волнопродуктора, а затем увеличим его частоту (длина волны при этом уменьшится). Мы увидим, что волна бежит медленнее, чем в предыдущем случае. Проведя достаточно много таких измерений, мы обнаружим, что скорость волны пропорциональна корню квадратному из ее длины. Явление зависимости скорости волны от ее длины называется дисперсией. Именно это свойство и объясняет характерный вид следа, оставляемого движущимся судном.

В учебниках явление дисперсии обычно иллюстрируют на примере распространения двух фазовых волн, имеющих близкие частоты и длины. Эти волны интерферируют и создают сложную картину колебаний, в которой сами они оказываются как бы «спрятанными». Возмущенная поверхность воды разбивается на группы гребней и ложбин, движущиеся



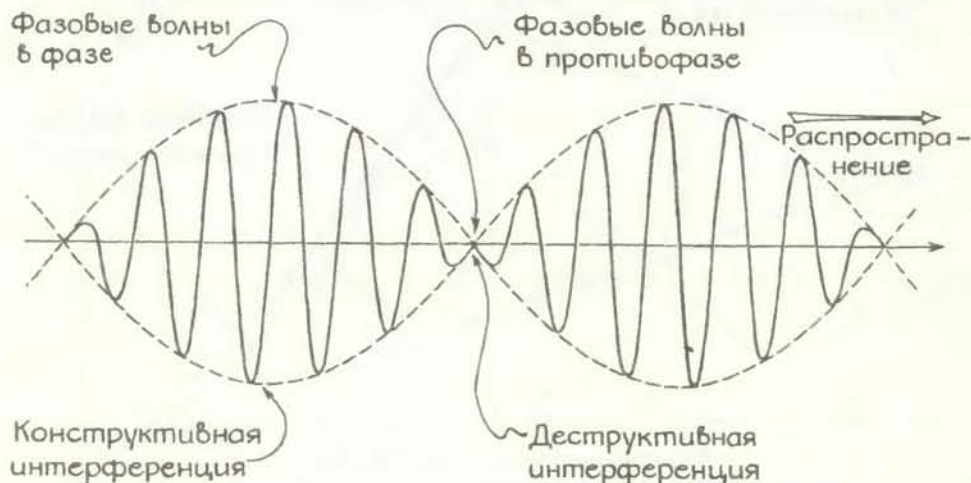
Волны, составляющие след судна

друг за дружкой в направлении распространения фазовых волн (см. рисунок внизу). Внутри группы гребни и ложбины движутся со скоростью, которая в два раза больше скорости движения группы в целом; они зарождаются у тылового края группы, нарастают в середине и исчезают, достигнув фронтального края группы.

Гребни и ложбины «отмечают» те места, где фазовые волны находятся примерно в фазе (гребень приходится на гребень, ложбина на ложбину), и поэтому чередующиеся повышения и понижения поверхности воды относительно велики. Ближе к краям группы они уже частично сдвинуты относительно друг друга, так что повышения и понижения водной поверхности оказываются менее выраженными. Между группами деструктивная интерференция (гребень одной волны попадает на ложбину другой) приводит к полному исчезновению колебаний уровня. Заметим, что хотя группы движутся как одно целое (в особен-

ности с точки зрения наблюдателя, который находится достаточно далеко и не различает их внутреннюю структуру), в действительности они в каждый момент создаются заново — по мере прохождения через данное место фазовых волн. Фактически эти кажущиеся реальными физическими объектами группы являются областями конструктивной интерференции.

Если вместо двух фазовых волн взять набор волн, длины которых лежат в небольшом диапазоне значений, интерференционная картина в целом будет напоминать только что описанную: те же группы, те же гребни и ложбины, движущиеся внутри группы в два раза быстрее самой группы. Однако эта картина не сохраняется постоянной, поскольку фазовые волны с большей длиной начинают обгонять более короткие волны (вследствие дисперсии скорость длинных волн больше). По мере удаления волн от их источника группы меняют свой вид. Один из способов описать



Группы, образованные двумя фазовыми волнами

такие группы — это представить их в виде областей, где образующие их фазовые волны все время находятся в фазе. Отсюда и термин, введенный Кельвином, — «метод постоянной фазы».

В реальности колебания водной поверхности имеют более сложный вид, чем в двух предыдущих примерах, поскольку диапазон частот реальных фазовых волн всегда достаточно велик. Предположим, в большой пруд бросили камень, и вы, стоя достаточно далеко от места падения камня, наблюдаете вызванные им колебания поверхности воды. В течение какого-то времени, возможно несколько десятков секунд, из места падения продолжают разбегаться фазовые волны. Самые длинные волны (а значит, и наиболее быстрые) дойдут до вас первыми. За ними поочередно будут подходить все более короткие волны. Хотя вскоре в месте наблюдения оказывается довольно много волн, поверхность воды остается спокойной, поскольку все волны интерферируют деструктивно: гребень одной волны целиком «съедается» ложбиной другой.

Впервые о падении камня вы узнаете, когда до вас доходят первые группы волн. Каждая группа движется вдвое медленнее составляющих ее фазовых волн. Первая, наиболее быстрая, группа включает фазовые волны, имеющие наибольшую длину и, следовательно, наивысшую скорость распространения. Со временем через точку наблюдения проходят более медленные группы, образованные фазовыми волнами с меньшей длиной и меньшей скоростью. Если в первом рассмотренном нами примере возникает последовательность одинаковых групп, то упавший в воду камень рождает череду различных групп, которые смешиваются друг с другом.

Переходы между группами столь плавны, что их можно не заметить (к тому же возмущения распространяются весьма быстро). Если сфотографировать картину, «остановив» тем самым бегущие волны, и измерить расстояния между последовательными гребнями, можно увидеть, что более быстрые группы движутся впереди более медленных. Вдалеке от места падения камня эти расстояния наиболее велики, из чего следует, что там присутствуют длинные фазовые волны. Чем ближе к месту падения камня, тем меньше расстояние между соседними гребнями, а это значит, что более короткие фазовые волны находятся ближе к источнику. Сделав ряд последовательных во времени фотографий, можно убедиться, что цепочка групп растягивается: более быстрые фазовые волны удаляются от более медленных. В конце концов в результате потерь энергии и расширения волновых фронтов колебания водной поверхности практически исчезают.

Камень создает возмущение в точке. Движущееся судно эквивалентно непрерывной последовательности точечных источников, посылающих расширяющиеся группы волн, которые интерферируют и образуют характерный след. Решение Кельвина для интерференции такого типа довольно сложно, поэтому я вначале приведу более простое объяснение, которое впервые было предложено в 1984 г. Ф. Кроуфордом-младшим из Калифорнийского университета в Беркли.

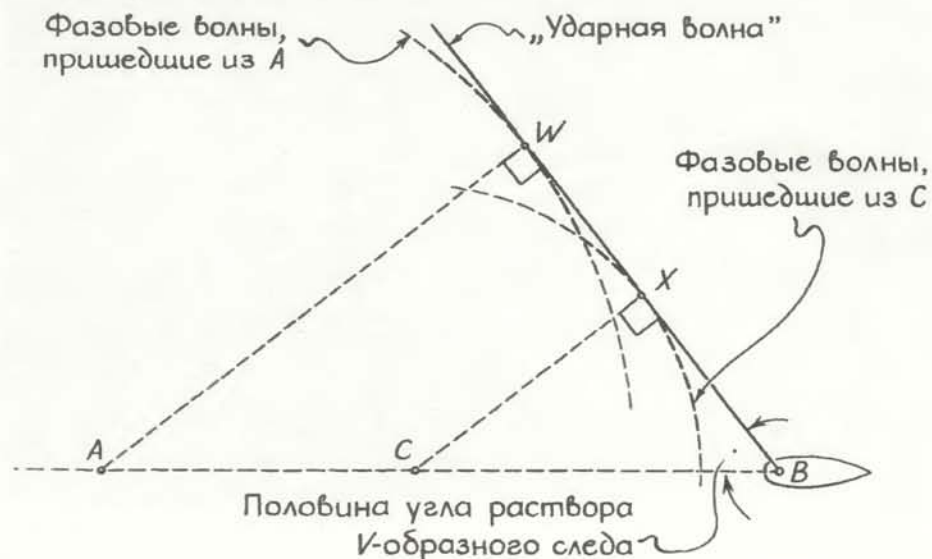
Кроуфорд начинает свой анализ, рассматривая «ударную волну», которую создавала бы движущаяся лодка, если бы отсутствовала дисперсия. Пусть судно движется из точки A в точку B с постоянной скоростью (см. рисунок внизу). Возмущение, создаваемое судном в точке A , распространя-

ется в виде круговых фазовых волн (имеющих одинаковую скорость, поскольку мы пренебрегаем дисперсией). Фазовые волны генерируются также в каждой точке между A и B и в результате на воде появляется множество кругов разного размера, касательные к которым образуют V -образную «ударную волну». В качестве угловой меры «ударной волны» принято брать половину раствора буквы V . Из рисунка видно, что синус этого угла равен отношению скорости фазовых волн к скорости судна.

Такая фиктивная «ударная волна» служит основой для построения действительной картины следа при наличии дисперсии. Хотя судно генерирует фазовые волны различной длины, существенными, очевидно, являются те, скорость которых не превышает скорости судна. Рассмотрим вначале небольшой «пакет» фазовых волн с близкими длинами, движущихся со скоростью, близкой к скорости судна (для удобства расчетов примем, что скорость волн составляет 0,866 от скорости судна). Когда судно приходит в точку B , фазовые волны, возникшие в A , достигают точки W на стороне фиктивной «ударной волны», которая в соответствие с соотношением для скоростей отходит под углом 60° от траектории судна. Идентичные волновые пакеты, возникшие между A и B (например, в C), достигают стороны фиктивной «ударной волны» в то же самое время.

Мы называем «ударную волну» фиктивной, поскольку вода вдоль ее границ абсолютно спокойна вследствие деструктивной интерференции фазовых волн в этом месте. Возмущения водной поверхности, создаваемые фазовыми волнами, существуют позади — в группах, которые движутся вперед со скоростью, равной половине скорости фазовой волны (см. рисунок вверху на следующей странице). Соответственно группа, связанная с фазовыми волнами, достигшими точки W , находится на полпути между A и W . Проведем линию от точки B до этого места. Линия, которую можно назвать линией следа, отмечает текущее положение групп, связанных с выбранными нами фазовыми волнами, которые были созданы в точках между A и B .

Если бы судно генерировало только эти выбранные волны, след был бы заключен между линиями следа, а раствор следа, т. е. угол между одной из линий и траекторией движения судна, был бы равен $19,1^\circ$. Найти этот угол можно следующим образом. Пусть L — это расстояние между A и B . Поскольку фазовые волны распространяются со скоростью, равной



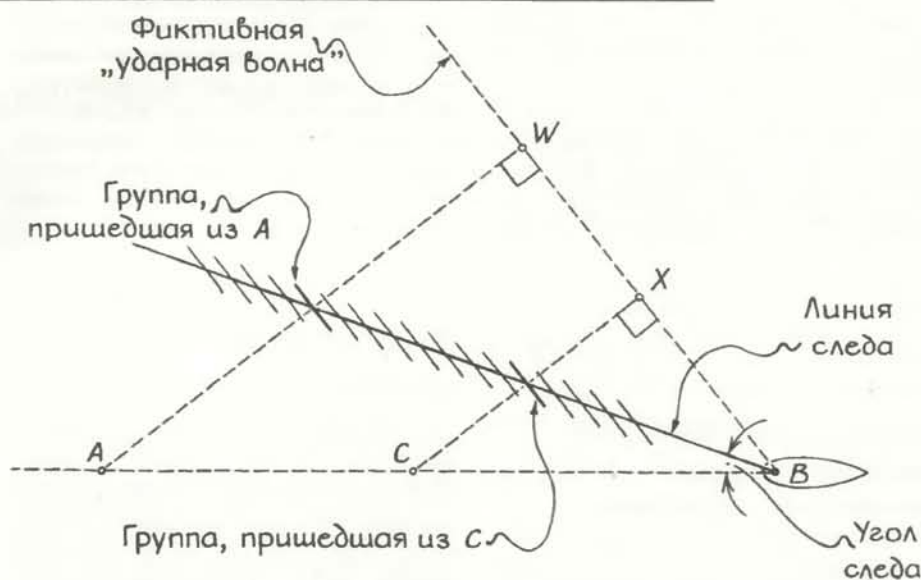
Создание фиктивной «ударной волны»

0,866 от скорости судна, точка W должна отстоять на расстоянии $0,866L$ от A , а половина расстояния между A и W должна равняться $0,433L$. Так как один острый угол прямоугольного треугольника AWB равен 60° , угол WAB должен быть равен 30° . Исходя из этого и используя тригонометрические соотношения для треугольника с вершинами в точках A , B и средней точке между A и W , можно найти угол следа.

Определив значения угла следа для других скоростей фазовых волн, можно найти его максимальное значение; оно равно $19,5^\circ$ и соответствует фазовым волнам, распространяющимся со скоростью $0,82$ от скорости лодки. Линия следа при этом максимальном угле отмечает границу следа. В общей картине она наиболее заметна, так как различные фазовые волны на этой линии или вблизи нее с внутренней стороны создают там высокие гребни и глубокие ложбины. Раствор V-образного следа, равный двойному углу следа, составляет таким образом 39° , что соответствует реально наблюдаемой форме следа.

Кроуфорд продолжил анализ, обратившись к поперечным волнам в следе. Они обязаны своим происхождением разбеганию групп волн в направлении к судну по круговым дугам. Поскольку картина волн остается как бы замороженной по отношению к судну, доминирующую роль в ней должен играть пакет фазовых волн, который движется со скоростью, близкой к скорости судна. Образованная ими группа, конечно, распространяется со скоростью, равной половине скорости судна. Пакет волн, созданный в точке A , образует группу, которая в тот момент, когда судно достигает точки B , находится на полпути между A и B . Другие группы, образующие поперечные волны, подобным же образом связаны с судном. Если группа в данный момент находится на расстоянии x позади судна, значит она была создана в месте, находящемся в данный момент на расстоянии $2x$ позади судна. Кроме того, поперечная волна, образованная этой группой, должна в этот момент иметь радиус x . Наблюдателю кажется, что волновая картина как бы буксируется судном, но на самом деле она в каждый момент создается новыми фазовыми волнами.

В 1957 г. Дж. Стокер из Нью-Йоркского университета и Г. Кейт из Бристольского университета независимо друг от друга опубликовали упрощенный вариант анализа Кельвина. В этом варианте группы, исходящие из точки A , интерферируют с волнами, исходящими из других точек. Когда судно достигает точки B , единствен-



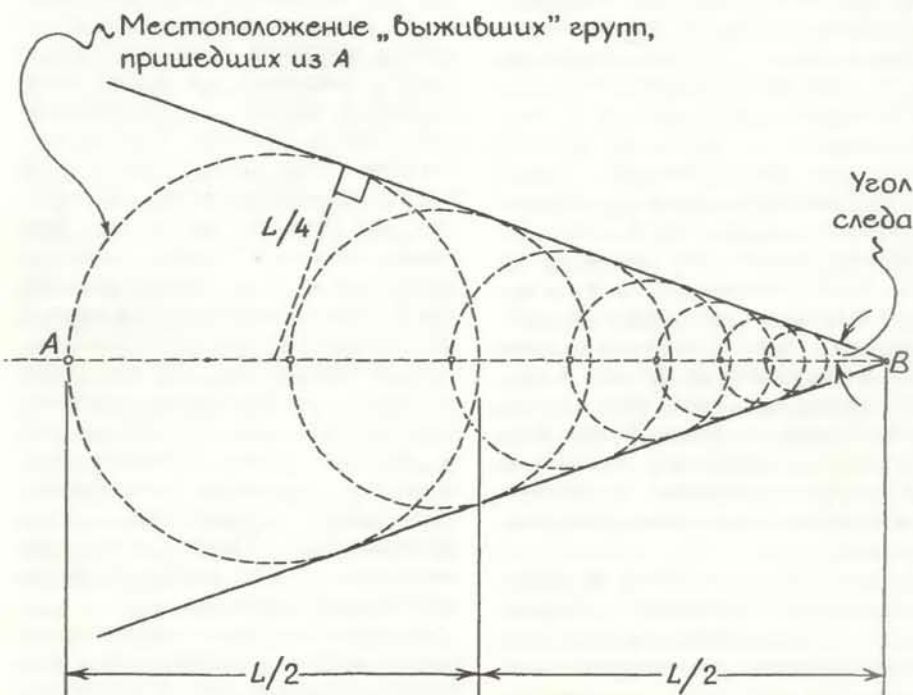
Группы, соответствующие определенному пакету фазовых волн

ные «выжившие» группы из тех, что образовались в A , лежат в круге, касающемся точки A в тыловой части. Группа у переднего края круга, образованная фазовыми волнами, скорость которых равна скорости судна, находится на полпути между A и B . В других частях круга доминируют группы, связанные с более медленными фазовыми волнами.

Круги не являются волнами, они лишь указывают на местоположение групп. Для того чтобы определить ориентацию группы в некоторой точке круга, проведите короткий отрезок прямой через эту точку таким образом, чтобы он был перпендикулярен линии, идущей от этой точки к месту генерации волн, связанному с этим кругом. Этот отрезок представляет

наблюдаемые волны в группе в данной точке круга.

На рисунке внизу изображены несколько кругов, каждый из которых соответствует точке генерации, расположенной в тыловой части круга. Касательные к этим кругам определяют положение границ следа. Один из кругов выбран для расчета угла между касательными, равного двойному значению угла следа. Точка генерации A , находящаяся на расстоянии L от судна, лежит на окружности радиусом $L/4$, центр которой располагается на расстоянии $3L/4$ от судна. Заметьте, что радиус и отрезок, соединяющий центр окружности и судно, являются сторонами прямоугольного треугольника. Синус угла следа должен быть в таком случае равен отно-



Построение, опирающееся на анализ лорда Кельвина

шению длин этих отрезков, т. е. $1/3$, откуда находим величину угла — $19^{\circ}28'$.

Мы рассмотрели волновой след судов, движущихся по прямой линии на глубокой воде. Как изменится картина, если дно мелкое или его глубина меняется? Что происходит, когда

судно движется по искривленному пути? Почему относительная видимость поперечных волн и «перистых» волн меняется от следа к следу? Я оставляю эти вопросы читателям. Вспомните о них, когда вам в следующий раз выдастся увидеть сверху плывущее судно.

Наука и общество

Высокотемпературные сверхпроводники: от теории к практике

ИССЛЕДОВАТЕЛИ промышленных корпораций и университетов, работающие над созданием высокотемпературных керамических сверхпроводников, начали состязаться в том, кто быстрее поставит свою продукцию на рынок; их марфон, похоже, не обойдется без попыток оттеснить друг друга на поворотах.

Ученый из Корнеллского университета Р. Бурман сказал, что ему удалось найти способ осаждения на плоскую подложку тонких сверхпроводящих пленок, которые могут заменить металлические проводники в микросхемах. Способ этот, называемый реактивным осаждением под высоким давлением, реализуется в камере с температурой 700°C , в которую помещается иттрий и барий. Металлы подвергаются бомбардировке электронными пучками в атмосфере кислорода под высоким давлением. В статье, опубликованной в журнале «Applied Physics Letters», Бурман и его коллеги сообщают, что получающиеся в результате пары металлов вместе с парами, образующимися при нагревании медной проволоки, конденсируются на подложке (обычно оксид циркония), создавая тонкую сверхпроводящую пленку из смешанного оксида иттрия, бария и меди.

Бурман считает, что новый метод существенно превосходит тот, о котором в мае прошлого года сообщила фирма IBM Corporation: в нем на один технологический этап меньше и процесс происходит при более низких температурах, что создает более благоприятные условия для сохранения целостности крошечных и хрупких полупроводниковых элементов микросхем.

Фирма IBM сейчас тоже не сидит сложа руки. Она занята разработкой технологии осаждения тонких пленок сверхпроводящих керамических материалов непосредственно на кремниевые кристаллы для создания контактов между компонентами микросхе-

мы. К сожалению, при контакте с кремнием свойство сверхпроводимости у пленок исчезает. Чтобы решить эту проблему, специалисты Исследовательского центра Томаса Уотсона фирмы IBM в Йорктаун-Хейтсе (шт. Нью-Йорк) исследуют различные способы создания диффузионных барьеров на поверхности кремния.

Другим аспектом соперничества является производство объемных сверхпроводников, пригодных для изготовления катушек, которые могли бы пропускать большие токи в сильных магнитных полях, с тем чтобы их можно было использовать в таких перспективных разработках, как магнитные устройства изображения, поезда на магнитных подушках и магниты для суперколлайдеров. Сотрудники фирмы AT&T Bell Laboratories разработали метод, позволяющий получать объемные сверхпроводники, способные пропускать ток в 100 раз больший по сравнению с током, пропускаемым сверхпроводниками, получаемыми обычным спеканием.

Как заявил Г. Чин, специалист в области металлургии в Bell Laboratories в Мюррей-Хилле (шт. Нью-Йорк), новый метод позволяет выращивать кристаллы с заданной структурой и заключается в расплавлении порошков оксида с последующим охлаждением расплава. В результате получают кристаллы с игольчатой структурой, которые лучше проводят ток, чем меньшие по размеру кристаллы сферической формы, получаемые путем спекания. Кроме того, при такой технологии образуется меньше границ между кристаллическими зернами, и, как полагает Чин, это может исключить «слабые связи», снижающие проводимость. Чин сказал, что он оптимистически оценивает возможность получения материалов, проводимость которых может быть увеличена в 10—100 раз, т. е. до такой величины, которая сейчас диктуется требованиями практики.

Тем временем ученые продолжают высказывать заманчивую идею (реальность которой пока не подтверждена) о возможности получения сверхпроводимости при комнатной

температуре. Самое последнее утверждение такого характера содержится в предварительном докладе А. Эрбила из Института технологических исследований шт. Джорджия, в котором говорится о некоем твердом веществе, которое обнаруживает свойства сверхпроводимости при температуре 500 K (227°C). Этот материал, как указывается, включает те же элементы — иттрий, барий, медь и кислород, которые входят в состав ранее открытых сверхпроводников, но в иных пропорциях.

Что же касается практического применения, то здесь пока нет никаких сенсационных сообщений. «Существует большая разница между получением таких материалов в лабораторных условиях и их промышленным производством, — говорит Дж. Холм, главный научный эксперт исследовательской лаборатории Westinghouse Research Laboratories. — Если вы хотите использовать высокотемпературные сверхпроводники в сверхпроводящем суперколлайдере, то придется подождать 10—15 лет, прежде чем приступить к созданию такого устройства».

Издательство МИР предлагает:

С. Уилсон ЭЛЕКТРОННЫЕ КОРРЕЛЯЦИИ В МОЛЕКУЛАХ

Перевод с английского

В книге излагаются современные методы теоретической химии, которые используются при уточненных расчетах энергии молекул. Вычисление корреляционных поправок («корреляционных эффектов») к энергии молекул имеет большое значение при теоретическом рассмотрении механизмов химических реакций, оптических свойств молекул и процессов рассеяния электронов молекулами.

Для физико-химиков — специалистов в области строения молекул и кинетики химических реакций.

1987, 17 л. Цена 2 руб. 90 к.



Занимательный компьютер

Моделирование эволюции в мире биоморфов



А. К. ДЬЮДНИ

ЕСЛИ живые существа уподобить часовым механизмам, то создавший их часовой мастер, по мнению Р. Докинза, биолога из Оксфорда, автора книги «Эгоистичный ген» (The Selfish Gene), должен быть слепым. В конце концов эволюцией управляют слепые физические силы. Докинз присоединился к полемике между креационистами и эволюционистами, поддерживая последних, о чем свидетельствует написанная им недавно другая книга — «Слепой часовой мастер» (The Blind Watchmaker). Чтобы проиллюстрировать одно из главных положений своей книги, Докинз написал компьютерную программу, которая позволяет пользователю моделировать эволюционный процесс, придумывая и графически изображая свои собственные формы жизни, абстрактные организмы, которые Докинз называет биоморфами.

Программа, которую мы так и назовем WATCHMAKER (часовой мастер), демонстрирует ошибочность довода, часто выдвигаемого критиками теории эволюции. Каким образом нечто такое сложное, как «машина жизни», может возникнуть просто в результате стечения случайных событий? На первый взгляд кажется, что это действительно невероятно. Интуитивно мы чувствуем, что здесь не обошлось без «часового мастера», как говорил У. Пэйли, английский теолог, живший в XVIII в. Доказывая, что у всех форм жизни должен быть Создатель, Пэйли рассуждал следующим образом. Если, идя по полю, мы наткнемся на камень, то можно, конечно, подумать, что он лежал там вечно. «Однако предположим, — писал Пэйли, — что я нашел на земле часы и захотел узнать, как они здесь оказались. Едва ли я удовлетворюсь тем же ответом, что и в предыдущем случае... Часы, должно быть, имели своего творца».

Пэйли умер еще до того, как родился Чарлз Дарвин, однако современные креационисты соглашались с аргументом Пэйли. При каком стечении случайных событий могли появиться часы на поле, о котором говорит Пэй-

ли? Ошибочность этого аргумента заключается в неявном предположении, что случайные события, которые привели к появлению часов (или их творца), происходили более или менее одновременно. Здесь не принимаются в расчет эффекты кумулятивных, т. е. накапливающихся изменений. Программа WATCHMAKER как раз и показывает на примере вычислительных процессов, сколь значительными могут быть кумулятивные изменения. Правда, творения этой программы — не живые организмы, а лишь биоморфы: статические формы, напоминающие живых существ.

Процесс начинается с очень простого образования в центре экрана, который делится на большие клетки (см. верхний рисунок на с. 83). Предположим, к примеру, что центральная клетка содержит маленькое дерево с несколькими ветвями. Программа WATCHMAKER порождает деревья — вариации исходного, которые заполняют соседние клетки на экране. У одних деревьев становится больше веток, у других меньше, одни становятся выше, другие ниже. Характер изменений, которым могут подвергаться деревья, определяется некоторым набором генов. Но об этом мы поговорим несколько позже. Все производные деревья рассматриваются как потомки центрального дерева. Они представляют собой те видоизменения, которые возможны в популяции на данный момент.

Программа WATCHMAKER выполняется на персональном компьютере «Макинтош». Поэтому эволюционный процесс управляется «мышью» — устройством ввода, которое пользователь перемещает рукой по контактной площадке. Движение мыши сопровождается таким же движением маленького темного квадрата — указателя на экране компьютера. В ходе работы программы WATCHMAKER пользователь выбирает, какое из изображенных на экране деревьев должно дать потомство в следующем поколении. Для этого нужно загнать указатель, управляемый мышью, в один из квадратов, в котором находится выбран-

ное дерево. У мыши есть кнопка, на которую нужно нажать, когда указатель уже находится в выбранной клетке; в этом случае все последующие деревья будут потомками выбранного. Оно перемещается в центральный квадрат. Теперь цикл отбора повторяется. Такая селекционная последовательность порождает филогенетическую линию деревьев, представители которой в каждом поколении несколько отличаются от родителя. Однако медленное накопление незначительных изменений может привести к удивительным результатам.

Докинз пишет, что, собираясь в первый раз запустить программу WATCHMAKER, он «надеялся увидеть плакучие ивы, ливанские кедры, ломбардийские тополя, водоросли, и может быть, олени рога. Но ни моя интуиция биолога, ни двадцатилетний опыт программирования компьютеров, ни самые необузданные полеты моей фантазии не подготовили меня к тому, что я увидел на экране в действительности. Я уже не помню, глядя на какой элемент последовательности, я начал впервые подозревать, что... может получиться нечто вроде насекомого... Все меньше веря своим глазам, я наблюдал, как сходство с насекомым становится все более отчетливым». И вот, наконец, под триумфальные звуки фанфар на экране появились насекомоподобные существа (см. нижний рисунок на с. 83). Докинз плохо спал в ту ночь, перед его глазами роились насекомые.

Так появилась первая из тех форм, для которых позже Докинз придумал общее название биоморфы. На самом деле все формы, порождаемые программой, представляли собой деревья. Причудливо изгибающиеся ветви могут придать этим деревьям формы, в которых мы узнаем не только тело, крылья и ножки насекомых, но и мириады других биоморфов, включая древовидных лягушек, летучих мышей и даже орхидеи. Могут появиться и такие технические формы, как лампочки и лабораторные весы (см. рисунок на с. 84).

Каким же образом программа «исполняет вариации на заданную тему»? Как я уже говорил, форма каждого дерева, порождаемого программой, определяется генами. Всего их 16. Роль некоторых генов объяснить просто. Эффект других заранее предсказать невозможно, потому что их роль зависит от взаимодействия с третьими. Несколько генов определяют количество ветвей и общие размеры дерева. Из генов второго типа три гена в определенных сочетаниях влияют на горизонтальную протяжен-

ность ветвей, в то время как пять других совместно определяют их вертикальную протяженность.

Мир Докинза представляет собой 16-мерное пространство, населенное всевозможными вариантами биоморфов. В конце концов каждое существо полностью определяется набором из 16 чисел, представляющих его генетическую наследственность. Эти числа можно считать значениями координат, и тогда каждый биоморф становится просто точкой в пространстве, которое Докинз называет миром биоморфов. Программа WATCHMAKER представляет собой отличное средство, при помощи которого можно исследовать этот мир.

Программа Докинза слишком длинна и сложна, и я не смогу ее здесь описать прежде всего потому, что в ней осуществляется выбор большого количества различных режимов и параметров, и каждую процедуру выбора можно считать отдельной программой. Например, в программе можно выбрать режим конструирования. Пользователь знакомится с комментарием, прилагаемым к программе, чтобы научиться непосредственно манипулировать генами, с целью получить те или иные конкретные биоморфы. Среди других режимов есть и так называемая «история ископаемых останков». В этом режиме эволюционные ветви хранятся в виде отложенных различных исторических эпох. Есть также режим «в поисках чудовища», в котором происходит случайный отбор потомства в каждом поколении. Этот процесс продолжается до тех пор, пока не появится какая-нибудь интересная форма, может быть даже чудовище.

Вот здесь креационист, наверное, воскликнет: «Обман!» — И не без оснований. Ведь это, по существу, искусственный отбор выживающих вариантов, совершаемый человеком. Другими словами, это не естественный отбор, а направленная селекция. Дарвин говорил об успешной деятельности селекционеров, чтобы подкрепить свой тезис о существовании изменчивости в популяциях. Конечно, эта деятельность не доказывает существования естественного отбора. Аргументы в пользу последнего Дарвин черпал из многих источников, в том числе он их находил и в истории ископаемых останков. Цель, преследуемая Докинзом, тем не менее была достигнута. Эффекты накапливающихся изменений могут быть весьма впечатляющими. Они были бы еще более впечатляющими, если на обвинение в обмане можно было ответить более непосредственным образом. Нельзя ли, скажем, сделать так, что-

бы процедура отбора в программе не направлялась человеком и даже не была случайным процессом, а определялась в той или иной форме требованиями окружающей среды? Могла бы эволюция быть результатом конкурентного взаимодействия между различными видами?

Докинз сформулировал следующую задачу для программистов: «Биоморфы должны взаимодействовать в компьютере, который моделировал бы враждебную среду. Какие-то детали формы организмов должны определять, выживут они или погибнут в данной среде». Он указывает, далее, что уязвимость организмов должна следовать из самой модели, а не быть заранее «встроенной» программистом. Число генов можно варьировать. Докинз считает, что если кто-нибудь и справится с задачей, то это будут программисты из «числа тех, кто сочиняет всем знакомые видеоигры». Должен сказать, что я в этом сомневаюсь.

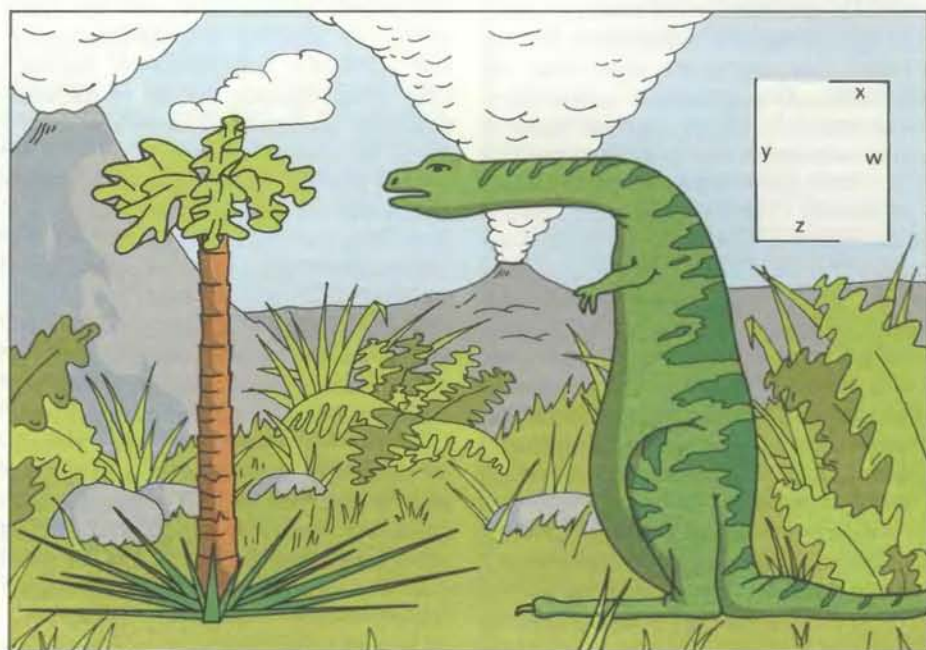
Хотя сам я, наверное, не справлюсь с задачей Докинза, я все же могу проиллюстрировать в общих чертах модель, которую он имел в виду. В конце концов можно придумать два каких-нибудь взаимодействующих вида, которые постепенно изменяются в результате взаимодействия. Однако уязвимость видов я как «часовой мастер-любитель» встроил в них заранее. Возможно, описанный ниже пример вдохновит кого-нибудь из читателей, и он превзойдет мою скромную попытку, создав настоящую эволюционную (если не сказать революционную) программу.

Рассмотрим организмы, изображенные на рисунке внизу. Назовем их шипофитом и гнутозавром. Гнутозавр не может жить без сочных листьев, растущих на верхушке шипофита. К сожалению, у основания шипофит окружен ошейником из колючих ядовитых шипов. Однако гнутозавр, как говорит само его имя, имеет в своем теле изгиб, позволяющий ему избегать смертельных укулов колючек шипофита, когда он пытается достать сочные листья последнего.

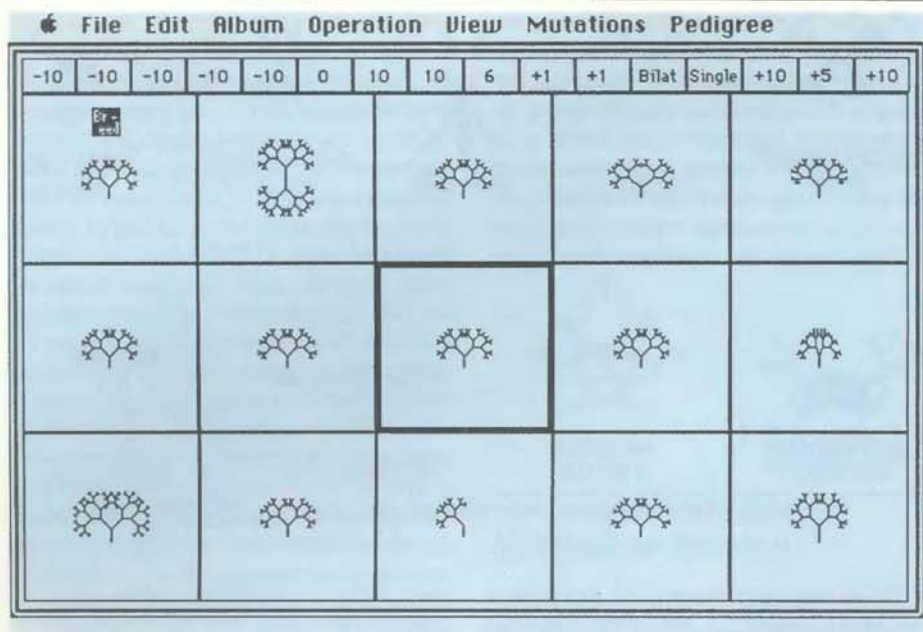
Это, как говорится, хорошо. Плохо же то, что гнутозавр ужасно негибкий. Его тело всегда изогнуто под углом 90°. Более того, ни шея, ни тело его не гнутся. Поэтому гнутозавр осужден на то, чтобы есть листья лишь на определенном уровне, конечно, при условии, что его шея окажется достаточно длинной, чтобы достать их.

Само собой разумеется, что обе популяции подвержены случайным вариациям в своем генетическом коде. Гнутозавры могут быть различной высоты (измеряемой по высоте плеч) и могут иметь шеи разной длины. Колючки шипофита все одинаковой длины у одного и того же растения, но их длина может быть неодинаковой у разных растений. Высота шипофита также подвержена небольшим случайным изменениям.

Чтобы управлять формой каждого из этих биоморфов, им достаточно иметь по два гена. У гнутозавра один ген ответствен за высоту, другой за длину шеи. У шипофита также два гена, один задает высоту и один длину шипов. При определенных условиях, указанных в программе, которую я



Взаимозависимая эволюция шипофита и гнутозавра



Генетические вариации центрального дерева

назвал ESCAPEMENT эволюция этих двух форм жизни может быть взаимозависимой. В эволюционной перспективе изменения своих генов шипофит «стремится» избавиться от гнutoзавра (отсюда название программы: *escapement*, что в переводе означает «избавление»), видоизменяясь так, чтобы последнему было все труднее добывать его листья.

Программа ESCAPEMENT поочередно предоставляет возможность обоим биоморфам изменять свою форму. Например, шипофит может стать несколько выше или ниже, а его шипы — длиннее или короче. Высота тела и длина шеи гнutoзавра также могут меняться в ту и другую сторону. Поскольку для обоих биоморфов существуют абсолютные верхние пределы размера, бесконечная «гонка вооружений» невозможна. Например, сумма длины шипов и высоты ствола шипофита не может превысить некоторого предельного значения, которое я назову *smax*. Аналогичным образом длина гнutoзавра, измеряемая от его головы до кончиков пальцев на ногах, не превышает предельного значения *bmax*. Чтобы сделать модель интереснее, я решил, что *bmax* будет больше *smax*.

Каким образом программа ESCA-

PEMENT решает, какой из потомков каждого биоморфа выживет? Критерий заключается в величине, называемой дистанцией кормления. Она измеряет расстояние между головой гнutoзавра и ароматными листьями шипофита. Предположим гнutoзавр имеет рост w , а длина его шеи равна x . Если высота ствола шипофита равна y , а длина его колючек z , то дистанция кормления выражается обычной формулой евклидова расстояния: квадратным корнем из величины $(z - x)^2 + (y - w)^2$. Если z оказывается меньше x , формула изменяется. В этом случае гнutoзавр может стоять сколь угодно близко к шипофиту, и рассматривается только второй член формулы.

Неудивительно, что шипофит стремится эволюционировать так, чтобы максимально увеличить дистанцию кормления. Задача гнutoзавра, наоборот, заключается в том, чтобы сделать это расстояние минимальным. Каждый биоморф, когда до него доходит очередь, порождает двух отпрысков. Например, если высота шипофита в данном поколении равна y , то в следующем она может стать равной $y - 1$ или $y + 1$. Длина шипов может либо увеличиться от z до $z + 1$, либо уменьшиться до $z - 1$. В

каждом случае выбор осуществляется случайным образом. Аналогично возникают два видоизмененных потомка у гнutoзавра. Вместе с двумя видоизмененными потомками родительский биоморф сохраняется для последующего оценивания перед лицом своего биологического противника. Критерием и в этом случае является дистанция кормления. Например, тот из трех шипофитов, которому удается держать «живущего» в данный момент гнutoзавра на наибольшей дистанции, отбирается, так сказать, в квазиестественном процессе и сохраняется для следующего раунда эволюции. Теперь наступает очередь гнutoзавра. Он сам и его два видоизмененных потомка проверяются на выживание в среде с новой моделью шипофита. Тот, у которого дистанция кормления окажется минимальной, будет родителем нового поколения.

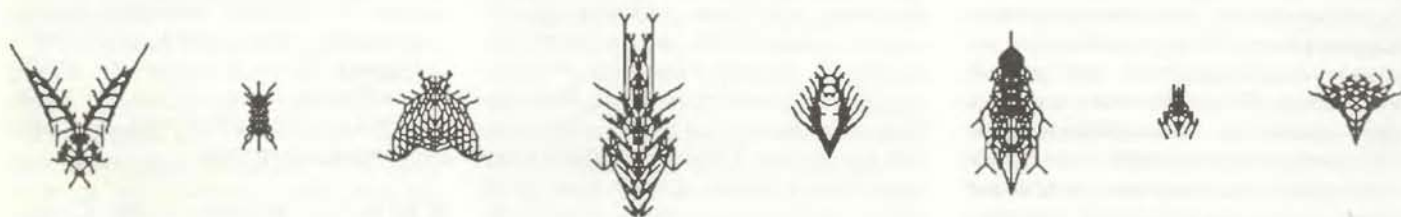
Было бы замечательно, если бы программа ESCAPEMENT имела графические возможности, позволяющие ей изображать шипофитов и гнutoзавров, представителей двух древних и знаменитых биоморфов, так, как это сумел сделать наш художник. Однако это выше моих возможностей. Я остановил свой выбор на простейших диаграммах, одна из которых приведена на самом рисунке на с. 82. Здесь нет практически ничего, кроме представления основных переменных в виде прямолинейных отрезков. Читатели, которые не пожелают возиться даже с такими простейшими изображениями, могут удовлетвориться тем, чтобы программа просто распечатывала значения четырех переменных в конце каждого раунда.

Программа ESCAPEMENT построена в виде единого цикла, в теле которого оба биоморфа изменяются, оцениваются и демонстрируются:

```
input bmax, smax
input w, x, y, z
input gen
for i = 1 to gen
```

```
    создать потомков шипофита
    оценить шипофитов
    создать потомство гнutoзавра
    оценить гнutoзавров
    показать победителей
```

Пользователь, конечно, должен вве-



Насекомоподобные биоморфы, порожденные программой WATCHMAKER

сти исходные значения шести основных переменных от руки, а также задать значение величины *gen*, число поколений, или витков эволюции. Затем выполняются итерации в двух внутренних подциклах размножения биоморфов, их оценивания и показа. Биоморф воспроизводится путем выбора двух случайных чисел, определяющих, увеличится или уменьшится значение каждого гена. Например, алгоритм, с помощью которого порождаются два видоизмененных гнutoзавра, получает мутации *a* и *b* соответственно для генов *w* и *x* следующим образом:

```
r — random
if r < 0,5 then a — w — 1
  else a — w + 1
s — random
if s < 0,5 then b — x — 1
  else b — x + 1
```

Теперь программа располагает тремя гнutoзаврами. Их генетические наборы могут быть представлены в виде трех пар чисел: [*w*, *x*], [*a*, *x*], [*w*, *b*]. Который из них является наилучшим? Программа ESCAPEMENT оценивает эти три модели, подсчитывая для них соответствующие дистанции, на которых гнutoзавры могут добыть себе корм с каждой текущей модели шипофита. Обозначив дистанции *d1*, *d2* и *d3*, их можно вычислить по существу с помощью одной и той же формулы. Вот, например, как программа вычисляет второе расстояние, *d2*, между гнutoзавром [*a*, *x*] и шипофитом [*y*, *z*]:

```
if x < z then d2 —
  — (z — x)2 + (y — a)2
else d2 — (y — a)2
```

В каждом случае применяется формула евклидова расстояния, в которую подставляются соответствующие координаты головы животного и листа растения. Когда все три расстояния вычислены, наименьшее из них определяется путем последовательных сравнений:

```
if d2 ≤ d1 and d2 ≤ d3
  then w — a
if d3 ≤ d1 and d3 ≤ d2
  then x — b
```

Если ни одно из двух пар неравенств не удовлетворяется, то родитель сохраняет превосходство над своими потомками. Поэтому гены *x* и *w* остаются прежними. Аналогичным образом программа оценивает шипофитов с той лишь разницей, что по отношению к растениям в качестве критерия способности выжить берется не минимум, а максимум расстояния.



Биоморфы и другие формы, порожденные программой WATCHMAKER

Пока мы еще ничего не сказали о пределах роста, о чем упоминалось выше. Каким образом программа ESCAPEMENT препятствует неумеренному росту каждого из биоморфов? Простейший способ заключается в том, чтобы наказывать биоморфа-переростка при вычислении расстояния. Например, если видоизмененный гнutoзавр [*a*, *x*] окажется слишком большим, то сумма *a* + *x* превзойдет значение *bmax*. В этом случае к подсчитанному расстоянию можно прибавить, скажем, 1000, чтобы этот мутант не оказался победителем. Шипофиты-переростки могут наказываться, наоборот, путем вычитания 1000 из вычисленного для них расстояния. Аналогичным образом оба биоморфа должны наказываться в том случае, если любая из четырех переменных окажется отрицательной.

Победители по результатам оценки демонстрируются на экране дисплея с помощью простых графических команд, обычно имеющихся в большинстве языков программирования. Эту часть программы мы оставляем воображению читателей.

Что же происходит с биоморфами при выполнении программы ESCAPEMENT? В какой-то степени это зависит от исходных значений четырех генов и двух предельных размеров, вводимых перед началом выполнения программы. Значения переменных могут также зависеть от размеров экрана. Пусть, например, *smax* будет равно 100, а *bmax* 110. Тогда мы будем наблюдать интересное явление. Выберем исходные значения для четырех генов произвольно в диапазоне от 0 до 50. Можно, например, начать с хорошо сбалансированных биоморфов, либо высоких и худых, либо низких и толстых. По мере того как одно поколение сменяет другое, мы станем свидетелями драки. Гнutoзавр может «преследовать» шипофита, производя все более высоких и худых

потомков, и, в конце концов, обогнав в росте растение, преградить ему путь вверх. Тогда шипофит может попытаться «убежать» вниз, все более широко расставляя свои ядовитые колючки. Гнutoзавр в свою очередь тоже будет становиться более приземистым, а его шея начнет удлиняться. Таким образом, при выполнении простого требования, чтобы значение *bmax* превосходило *smax*, будет всегда возникать кажущаяся бесконечной последовательность из побегов и погони. Читатели, обладающие хорошим воображением, возможно, смогут представить себе, какими будут результаты в противном случае.

Разумеется, когда мы говорим о побеге и погоне, мы имеем в виду не отдельных биоморфов, а «историю ископаемых останков». Наверное, палеонтолог, исследующий всю последовательность слоев отложений с ископаемыми шипофитами и гнutoзаврами, будет немало удивлен, как оба вида меняли свои размеры со временем подобно раскачивающемуся маятнику.

Докинз предлагает читателям его книги самим заняться разработкой экспериментальных программ, которые позволяют исследовать эволюционные процессы. Эти программы могут быть либо усовершенствованными версиями ESCAPEMENT, либо представлять собой значительно более глубокие разработки.

Споры между креационистами и эволюционистами не утихают, но, может быть, и те и другие одинаково далеки от истины? Забавная мысль: представим себе Творца, способного создавать путем эволюции и с улыбкой наблюдающего за тем, как ломают копыта сторонники двух противоположных концепций.

ИГРА под названием ГВУ (Гарантированное взаимное уничтожение) была темой нашей статьи в де-

кабрьском номере журнала за прошлый год. Придуманная в 1985 г. Т. Хомер-Диксоном и К. Оливо из Массачусетского технологического института, игра моделирует стратегию двух сверхдержав, балансирующих на грани между войной и миром. Были проведены эксперименты, в которых студенты МТИ, сидя за клавиатурами компьютеров, играли роль руководителей государств. Какой стратегии придерживаться? Воздерживаться от нападения и получать таким образом относительно скромную прибавку к очковому балансу или начать военные действия в надежде значительно изменить этот баланс в свою пользу? По мере того как развиваются события, потенциальный выигрыш стороны, принявшей решение атаковать первой, резко возрастает.

Несмотря на тот факт, что перед частью студентов была поставлена цель достичь наибольшего количества очков, чему лучше всего способствует мирная политика, многие из них не стали ее придерживаться. В их числе оказался и Д. Фармер из Миссисога (Канада, провинция Онтарио), попытавшийся проанализировать сходную игру, применив принципы теории игр. В теории рассматриваются лишь так называемые матрицы игры в отрыве от последующих ходов. Теория также требует максимально увеличивать счет, сводя к минимуму потери на каждом этапе игры. Чтобы воспользоваться теорией, Фармер нашел способ генерировать новые игровые матрицы, отражающие последующий ход игры. В своем письме Фармер рассмотрел пример с пятью центральными матрицами игры ГВУ. По мнению Фармера, наиболее благоприятный момент для нападения возникает на втором этапе. Однако он заключает: «Перед лицом все возрастающей угрозы опустошительного первого удара, чтобы следовать мирной стратегии, нужно руководствоваться соображениями, выходящими за пределы теории игр. С другой стороны, если негативные последствия будущих военных сценариев сделать менее негативными, то даже теория отдаст предпочтение мирной стратегии. Переговоры о разоружении способствуют уменьшению угрозы войны в будущем, модифицируя таким образом баланс очков в положительном направлении».

В последних стадиях игры ГВУ возникает ситуация, известная под названием «Дилеммы арестованного»: вознаграждение за признание (соответствующее за нападение в ГВУ) становится настолько большим, что возникает соблазн «нажать кнопку». И все же турнир по игре «Дилемма арестованного», проведенный несколько лет назад в Мичиганском университете, показал, что наилучшей стратегией в игре была стратегия «око за око», т. е. пока ваш оппонент воздерживается, вам тоже лучше воздерживаться. Теперь студенты (и вообще все желающие) могут проводить свои собственные турниры по игре «Дилем-

ма арестованного». Уже существует программное обеспечение игры для компьютера Макинтош, а вскоре будут готовы и программы для персонального компьютера фирмы IBM и совместимых с ним компьютеров. Авторы этих программ — Л. Беркхолдер и К. Уолтон из Университета Карнеги — Меллона.

Наука и общество

Натрий не при чем

МНОГО ЛЕТ здравоохранительные органы, медицинские учреждения и врачи убеждали население, что всем следует ограничивать потребление натрия в любой форме. По мнению Р. Морриса из Центра общих клинических исследований Калифорнийского университета, такие рекомендации, возможно, неправильны. «Никогда не было показано, — говорит он, — что какая-либо другая форма натрия помимо хлорида (поваренной соли) может вызывать увеличение кровяного давления». Значит натрий, поступивший в организм в виде, скажем, бикарбоната — в составе печеных изделий или антацидных средств, — не будет влиять на давление крови. И не следует указывать на этикетке продукта общее содержание натрия, включающее не только поваренную соль, но и другие соединения натрия.

Моррис отмечает, что даже относительно самого хлористого натрия не доказано, что он всегда и у всех вызывает повышение кровяного давления. Из 40 млн. американцев, страдающих гипертонией, т. е. стойко повышенным давлением, к поваренной соли чувствительны только около половины. Свое несогласие с общепринятым мнением Моррис основывает на результатах исследования, проведенного им совместно с Т. Курцем и Г. Аль-Бандером; эти данные опубликованы в «New England Journal of Medicine». Сравнивался эффект поваренной соли и цитрата натрия у пяти чувствительных к соли больных с наиболее обычной формой гипертонии — гипертонией. Этим больных госпитализировали на 6 недель и вначале посадили на малосолевую диету. За неделю кровяное давление снизилось почти до нормального. Затем испытуемые принимали капсулы, со-

державшие цитрат натрия, либо хлористый натрий, либо плацебо; курс каждого препарата продолжался неделю, и каждый испытуемый чередовал эти три курса в случайном порядке. У всех пациентов кровяное давление повышалось в период приема хлористого натрия, а после перехода на цитрат натрия или плацебо оно падало. Другими исследователями было показано, что такие соединения натрия, как однозамещенный глутамат и трехзамещенный фосфат (обычный ингредиент прохладительных напитков), тоже, по-видимому, не влияют на кровяное давление. Моррис, правда, оговаривается, что из-за высокой стоимости содержания больных в клинике группа испытуемых была немногочисленной и поэтому полученные данные следует рассматривать как предварительные. Тем не менее кое-какие выводы о питании можно сделать. Так, возможно, что для тех, кто потребляет много печеных изделий и продуктов, прошедших термическую обработку, ограничения, основанные на данных об общем содержании натрия в продукте, будут излишне строгими.

Но как быть с самим хлористым натрием? Нужно ли каждому ограничивать потребление поваренной соли? И Курц, и Моррис отвечают на этот вопрос отрицательно. Курц отмечает, что множество факторов помимо потребления соли может участвовать в развитии гипертонии. Кроме того, малое потребление соли у одного человека может коррелировать с высоким кровяным давлением, а у другого — с низким. Моррис подчеркивает, что не проводилось крупномасштабных исследований, которые доказали бы вредные долгосрочные последствия высокого потребления поваренной соли. Несмотря на такие соображения, негативное отношение к соли, вероятно, сохранится. «Трудно следовать евангельскому пониманию умеренности», — заметил Моррис.

Муссоны; мир молекул; руническое письмо; достижения Японии



ФИЛИП MORRISON

Муссоны. Под редакцией *Джея С. Фейна и Памелы Л. Стивенс*

MONSOONS, edited by Jay S. Fein and Pamela L. Stephens. John Wiley & Sons, Inc. (\$ 74.95)

СЛОВО «муссон» происходит от арабского «маусим» — сезон. В регионах с муссонным климатом погода не отличается разнообразием: в течение первой половины года стоят безоблачные дни, но с каждым месяцем становится все жарче. Сначала распускаются и увядают цветы, затем наступает черед деревьев покрыться алым и оранжевым цветом, однако и они вскоре поблекнут. В конце концов, когда жара становится просто невыносимой, в южной части горизонта, суля облегчение, показывается черная туча. Но увы — надежды обмануты; это всего лишь пыльная буря. От душного воздуха нет спасения даже ночью. Но вот однажды утром в воздухе чувствуется влага, слышится отдаленный грохот грозы. Вновь приближается и закрывает небо черная стена. На сей раз это действительно грозовая туча, и сверкания молний предвещают дождь. И вот на вас обрушивается ливень. Он барабанит крупными каплями, льется звонкими струями, накатывает валами, хлещет как из ведра. «Вся работа прекращается. Мужчины, женщины и дети, обезумев от радости, бегают по улицам, выкрикивая осанну чуду — муссону... Сколько же радости он один несет с собой — весенние надежды, сочные краски лета, всю щедрость осени!» Но бывает и так, что приход живительных ливней надолго задерживается, или же они прерываются засушливыми периодами, а то и вовсе преждевременно прекращаются. От безжалостных засух до разрушительных наводнений (когда за сутки выпадает более 500 мм осадков, что случается весьма часто) — такова амплитуда непредсказуемых колебаний муссона.

Муссонные воздушные течения характеризуются резкими изменениями направления от зимы к лету и от лета к зиме. Обычный признак смены сезо-

нов, например на полуострове Индостан, — влажный летний ветер, дующий с юго-запада. Он появляется где-то в июне и держится около 100 дней, принося с собой обильные дожди. Ближе к концу года с северо-востока начинает дуть зимний муссон. Юго-Восточная Азия, Индонезия, Австралия и Западная Африка также расположены в зоне выраженных муссонов.

Редакторы этой книги (из Национального научного фонда в Вашингтоне) собрали в ней статьи, написанные исследователями и учеными из разных стран, для того чтобы дать читателю наиболее полное представление о муссонах. Основное внимание уделяется азиатским муссонам, в частности индийскому летнему муссону. В одной из первых глав на основе упрощенной модели доступно раскрывается физика этого периодического явления. Затем следует его теоретический анализ.

Ряд глав книги посвящен отображению муссонов в живописи и литературе: здесь мы встретим и фотографии картин, и шумерские записи, и цитаты на санскрите, и поговорки. Исторические документы помогают составить представление об отдельных муссонах прошлого. Например, подробное их описание оставили арабские мореплаватели и ученые, овладевшие искусством навигации в районах с муссонным климатом. В одной из глав рассказывается о том, как современная наука подошла к раскрытию сути этого явления. Читатель найдет в книге разделы, посвященные более подробному и глубокому рассмотрению метеорологических и океанологических особенностей, определяющих различия в интенсивности штормов. И наконец, последние главы, отличающиеся обилием статистической информации, — это сообщения о достижениях в области краткосрочного и долгосрочного предсказаний погоды в районах с муссонным климатом.

Муссон оказался явлением куда более сложным, чем это представлялось

в начале XVIII в. Эдмунду Галлею, который первый попытался дать ему теоретическое объяснение. Как полагал Галлей, муссон — это одна из форм морского бриза — прохладного ветра, днем дующего с моря, а ночью меняющего направление на противоположное. Такая аналогия была лишь первым шагом к пониманию этого крупномасштабного явления. Немаловажную роль в образовании муссонов играет океан, вернее его гигантские вихри, вызванные вращением Земли. Вода, испаряющаяся с поверхности океана в тропических широтах, попадает в атмосферу. При этом скрытая теплота и определяет интенсивность муссона. Грозу же вызывает воздух, натекающий над нагретой континентальной сушей. По мере выпадения дождей поверхность суши увлажняется, а ливневый фронт продвигается в глубь материка, так что оставшаяся позади орошенная часть суши успевает заново высохнуть. Как видим, «передышка» между ливнями является особенностью муссона.

Сегодня мы имеем возможность построить трехмерную математическую модель муссона с учетом топографических особенностей. Компьютерные расчеты, как и следовало ожидать, показывают, что горы Тибета способствуют нагреву атмосферных слоев над Индией в летнее время. Но самым поразительным является неожиданный эффект, который дает возможность значительно повысить надежность прогнозирования муссонов. Он был открыт в начале века Джилбертом Уокером, директором Метеорологической службы в Индии. Собрав достаточно данных, Джилберт сделал в 1923 г. сообщение о «крупномасштабных колебаниях атмосферного давления» вблизи экватора, своеобразных барометрических качелях между Индийским океаном и берегами Южной Америки. Сегодня существование южного колебания не вызывает сомнений. Время от времени самая холодная часть тропической зоны океана вблизи перуанского побережья нагревается, и тогда океанические течения поворачивают вспять, в большом количестве умирает рыба, безводная пустыня Атакама орошается рождественскими дождями, а в далеком облачном Сизтле вдруг выглядывает солнце. Имя этого явления — Эль-Ниньо, по-испански младенец Христос. В такие годы индийский муссон обычно имеет аномально низкую интенсивность.

Хотя до сих пор механизм Эль-Ниньо до конца не ясен, с помощью моделей удалось близко подойти к его пониманию. Первые шаги в этом направлении были сделаны 20 лет назад

Якобом Бьеркнесом. Он заметил, что на основе динамической взаимосвязи океан—ветер можно объяснить статистическую глобальную «дальнюю связь» Уокера. Длинные волны давления взаимодействуют с поверхностью океана, при этом возможно существование сильной обратной связи между движениями воды и воздушных масс. Аномальные западные океанические течения движутся вдоль экватора (только здесь вращение Земли не оказывает на их движение отклоняющего действия), в результате холодные перуанские воды оказываются под теплыми течениями из западной части Тихого океана. В то же время далеко к западу над Аравийским морем образуется ветровой барьер, препятствующий переносу через экватор влажного воздуха из теплой южной части Индийского океана, ежегодно питающего летний муссон. Такого было понимание механизма южного колебания в 1984 г. В будущем появятся новые модели, новые наблюдения с судов и спутников, а вместе с ними — новая надежда на своевременный прогноз этой метеорологической синкопы.

За последнее десятилетие Эль-Ниньо два раза достигало необычайной интенсивности. Так, крайне слабым был летний муссон 1987 г. Последовавший в Индии неурожай был восполнен 20 с лишним миллионами тонн зерна, предусмотрительно запасенного индийским правительством в предшествующие годы. Тем не менее многие бедные семьи оказались в очень трудном положении. Путем орошения из колодцев зимних посевов пшеницы удается несколько сгладить непостоянство погоды, однако что касается риса, то ущерб в резуль-

тате слабого муссона достигает одной трети урожая. Вот тут-то и должны прийти на помощь суперкомпьютеры и математические модели — ведь такие меры, как дополнительное финансирование с целью повышения урожая в благоприятные годы и продовольственная помощь нуждающимся в годы бедствий, станут гораздо эффективнее благодаря надежному прогнозированию.

Придет день, и изменчивый, безразличный к людским нуждам муссон наконец действительно заслужит той похвалы, которую в XVI столетии воздавал ему поэт Субханду: «На вечерней заре танцевали петухи... Молния, словно драгоценный ковчег любви, сверкала в радостном озере небес... Дождь, казалось, играл в шахматы, а фигурами ему служили желтые и зеленые лягушки, прыгавшие в... полях... Вскоре дождливый сезон сменился осенним — временем ясных рассветов; временем спящих меж рисовых стеблей попугаев; временем странствующих облаков».

П. У. Эткинс. Молекулы
MOLECULES, by P. W. Atkins. Scientific American Library, distributed by H. Freeman and Company (\$ 32,95)

ДЕСЯТКИ иллюстрированных изданий, описывающих различные виды птиц, цветов и минералов, пользуются заслуженной популярностью и читателей. Перед нами книга, затрагивающая область гораздо более абстрактную, представители которой несравнимо многочисленнее, чем даже воробьи и одуванчики. Тем не менее написана она в блестящей, свободной манере, знакомой почитателям

Роджера Тори Петерсона*, и прекрасно иллюстрированной.

«В сущности, вы состоите из молекул». Цель книги — раскрыть смысл этого утверждения, подкрепить и проиллюстрировать его разнообразными примерами с тем, чтобы приведенные в ней молекулярные модели запомнились читателю. Несмотря на повсеместное присутствие молекул, мы их не ощущаем как таковые, поодиночке, а видим лишь их огромные, неразделимые скопления.

Автор книги — П. У. Эткинс, физикохимик из Оксфорда, обладающий тонкостью восприятия, чувством юмора и вкусом, — построил повествование вокруг 160 различных молекул, изобразив их в виде пространственных моделей из групп разноцветных атомов определенных размеров. Это достаточно упрощенный подход, и, хотя в определенном смысле он соответствует действительности, такие модели так же отличаются от реальной молекулы, как географическая карта от изображенной на ней территории. Описание приобретает достаточно четкие, почти скульптурные очертания в сознании читателя благодаря сочетанию проверенных выводов, обширного опыта современной науки, имеющей трехвековую историю, и явлений, которые каждый может понять сам. В предисловии автор пишет: «Можно постигнуть мир, который я показываю, мгновенно, без подготовки, без труда, с наслаждением, которое сродни созерцанию произведения искусства».

* Американский натуралист (род. в 1908 г.), автор многочисленных популярных книг, главным образом в области орнитологии. — *Прим. перев.*



С. Боттичелли. Венера и Марс (Национальная галерея, Лондон)

И это действительно так. На страницах книги описание каждой из рассматриваемых молекул так же полно и точно, как в соответствующем издании для любителей птиц рассказ, например, о мексиканском чечевичнике (распространение, повадки, значение и родственные связи). Все эти кольца, группировки, колонки и повторяющиеся сплетения построены по одним и тем же структурным принципам и состоят из восьми наиболее распространенных атомов. Царство минералов в книге фактически не описано — ведь оно олицетворяет собой традиционное химическое представление о том, что вещество состоит из строго определенных молекул. Прелесть предлагаемого автором подхода как раз в его нетрадиционности: «Если повеет, туман слегка рассеется, и вы проникните в образ мыслей химика».

Октан — молекула с хорошо знакомым названием. На схеме цепочка: восемь углеродных атомов в окружении атомов водорода образуют простую линейную структуру. На самом деле атомы в молекуле октана расположены не по прямой линии, а скорее зигзагообразно, свободно вращаясь в местах сочленения. Октан и его изомеры, состоящие из того же числа атомов, но имеющие разветвленную структуру из-за боковых углеводородных групп, входят в состав бензина. Маленькая капелька этой жидкости содержит больше молекул, чем наша Галактика звезд. Некоторые молекулы свернуты в тугую клубок, другие вытянуты в длину, большинство же находится в промежуточных состояниях. И ни одна молекула не существует в стационарном состоянии, изображенном на рисунке. «Молекулы октана корчатся и извиваются, скручиваются и раскручиваются, так что галлон бензина больше похож на вместиле молекулярных личинок, чем на коробку с короткими палочками».

Такие же образные детали приводятся и для многих других молекул. Книга открывается наиболее простыми примерами, такими, как одиночные несвязанные атомы инертного газа аргона, не поддающиеся химическим превращениям, — они присутствуют в воздухе, которым мы дышим. Далее следует описание соединений, даже сокращенные названия которых знакомы многим; одно из них — аденозинтрифосфат (АТФ), клеточное «топливо». Вы сможете познакомиться также со структурными полимерами природного происхождения и искусственно синтезированными; со специфическими веществами, активизирующими тончайшие химические механизмы восприятия запаха и вку-

са; с молекулами, ответственными за зрение, и теми, благодаря которым мир выглядит красочным; и наконец, с соединениями, воздействующими на глубинные процессы жизнедеятельности человека — гормонами и лекарствами.

Вот старый как мир опьяняющий этиловый спирт и описание его пагубного разрушающего воздействия на белки синапсов (областей контакта нервных клеток) головного мозга. А дальше — симметричная молекула тринитротолуола (ТНТ) с шестью атомами кислорода, готовыми к окислению: легкий толчок — и начинается атомная реакция, мгновенное внутреннее высвобождение энергии, субмолекулярный взрыв, столь разительно отличающийся от медленного горения, происходящего при взаимодействии кислорода воздуха с углем, газом или нефтью.

Большое внимание автор уделяет водородной связи. Целый раздел посвящен углеводам, начиная с моносахарида глюкозы и заканчивая высокомолекулярными полисахаридами крахмалом и целлюлозой. Разница в химическом строении молекул крахмала (источника энергии) и целлюлозы (строительного материала клеток растений), определяющая такое значительное отличие их свойств, заключается лишь в небольшом изменении конфигурации водородной связи между мономерными звеньями в цепи: «проявление слепой природы во всем ее великолепии».

На одной из фотографий — россыпь синих васильков, на другой — лента алых маков. Пигменты, придающие окраску лепесткам этих цветов, отличаются одним-единственным атомом из тридцати; по существу это две различные формы одного химического соединения. В обоих растениях присутствует фиолетовый краситель цианидин, которым изобилует ежевика. Кислый сок васильков богат ионами водорода, способными в определенном месте присоединиться к молекуле цианидина. Насыщенная водородом молекула активно поглощает красные лучи, а отражает синие. Напротив, щелочная среда у мака практически не содержит свободных катионов водорода, поэтому краситель остается в ненасыщенном состоянии. В результате он поглощает синие лучи и отражает красные.

Завершает книгу один из наиболее впечатляющих примеров того, к каким глубоким последствиям может привести незначительное изменение строения молекул в живых системах. Сравниваются две молекулы, принадлежащие к классу так называемых стероидов. Тестостерон, мужской по-

ловой гормон, представляет собой производное холестерина: это сложная структура из десятков атомов, образующих несколько соединенных друг с другом колец. Если заменить атом кислорода в этой молекуле гидроксильной группой (ОН) и убрать метильную группу (CH₃) в одном из колец, можно получить эстрадиол, один из женских половых гормонов. Существенные различия, которые влечет за собой наличие или отсутствие метильной группы, разделяют с нами, смертными, сами боги. Свидетельством тому служит репродукция прекрасной картины Боттичелли, на которой утомленный Марс спит рядом с задумчивой Венерой. Вокруг херувимы (еще не вырабатывающие стероидов) играют с шлемом и пикой, которые отложил в сторону бог войны.

Книгу открывает картина Мирó, подобранная так же удачно, как и шедевр знаменитого флорентийского мастера, завершающий ее. Не перегруженная техническими деталями, интересная по содержанию, эта работа прокладывает путь, следуя по которому внимательный читатель сможет приобщиться к мировоззрению и эстетическому восприятию, свойственному мыслящему химику.

Р.И. Пэйдж. Руны
RUNES, by R.I. Page. University of California Press/British Museum
(\$ 6.95)

ДРЕВНЕГЕРМАНСКИЙ рунический алфавит обычно называют футарком. Вообще говоря, он не является алфавитом в полном смысле слова. Название «футарк» (futhark) образовано из его первых 6 рун (звук th, произносимый как в английском слове think, обозначается одной руной). Число рун в «алфавите» (всего их 24), сходство начертания примерно четверти из них с латинскими (или греческими) буквами, места находки и датировка наиболее ранних надписей оставляют мало сомнений в том, что это письмо было создано германскими народами, жившими у границ Римской Империи. Не позднее 200 г. н. э. были высечены древнейшие известные нам рунические надписи, обнаруженные на юге Дании. Однако кроме общего утверждения о том, что руны являются адаптацией латинского письма для нужд варваров, мы мало что можем сказать об их происхождении. Руны могли быть изобретены в Дании, в швейцарских Альпах или намного южнее — на берегах Дуная. Но, каково бы ни было происхождение рунического письма, оно использовалось в различных формах, в

течение 1500 лет для записи текстов по меньшей мере на десяти германских языках, включая готский, фризский, англо-саксонский и скандинавские языки.

Руны должны были казаться почти что чудом в тогдашнем темном варварском мире, где не было книг. Считалось, что позолоченная брошь может принести счастье, если на ней начертан рунический алфавит. К девятому столетию уже появились манускрипты (написанные латинским письмом), называющие имя каждого рунического знака и пытающиеся объяснить, для передачи какого звука он использовался. Имена рун (к сожалению, некоторые из них еще не реконструированы с полной достоверностью) достаточно ярки: чудовище, солнце, град, березовая ветвь, конь и т. д. На одной из страниц этой замечательной книги читатель увидит фотографию 23 небольших дощечек, обнаруженных при раскопках в Бергене, на западе Норвегии, и датированных XII столетием. Это — бирки с именами купцов, когда-то прикрепленные к принадлежавшим им тюкам с товарами.

Руны — линейные знаки, изобретенные так, чтобы их было легко вырезать на дереве. Основу большинства рун составляли одна или две вертикальные линии, вырезавшиеся перпендикулярно направлению волокна, а также наклонные черточки. Горизонтальные линии употреблялись избежали. В те времена каждый человек имел при себе нож, и ему нетрудно было в любую минуту выстругать на любой палке плоскую поверхность.

Но, разумеется, палки или дощечки — далеко не лучший материал для книг, и вскоре рунические надписи появляются на самых различных поверхностях. Мы видим их нацарапанными или вытесненными на пластинках из золота, на монетах и медальонах, на знаменитой шкатулке из китового уса, на глиняных горшках, на каменных плитах и валунах. В книге приводится транскрипция многочисленных текстов и обсуждается их возможная интерпретация. Читатель узнает о рунических надписях, сделанных викингами в соборе Св. Софии в Константинополе, и на мраморном льве из Пирея. Такие краткие тексты, подчас состоящие из единственного слова, с трудом поддаются интерпретации. Например, надпись (всего в одно слово), обнаруженная на древнем наконечнике копья, рассматривается всеми исследователями как имя человека, однако одни из них читают ее слева направо, а другие — справа налево: в рунических текстах не было фиксированного направления письма.

Насколько полным, спрашивает профессор Пэйдж, может быть доверие читателей к лингвистам, которые умудряются найти какой-то смысл в слове, прочитанном в произвольном направлении?

Автор книги использует богатый фактический материал и добросовестно обосновывает свои выводы и утверждения. Интересно, что многие исследователи рунического письма — настоящие романтики. Возможно, это объясняется тем, что руны иногда рассматриваются как культовое письмо, чаще всего использовавшееся в текстах, связанных с магией. И в самом деле, такие надписи и амулеты нам известны. На некоторых камнях мы даже встречаем явные заклинания и колдовские рецепты. В то же время каким еще алфавитом могли записываться магические тексты, если единственным письмом, известным хотя бы некоторым деревенским жителям, было руническое?

В Северной Америке сделано около сорока находок камней с якобы руническими надписями. На многих из них видны какие-то линейные знаки, которые, возможно, являются рунами. На других камнях викингами, побывавшими в Новом Свете, высечены краткие, но достаточно подробные рунические тексты на древноревском языке, а на каменной плите, обнаруженной в 1971 г. в шт. Мэн, мы видим даже карту Винланда. «Если вы ищете что-либо достаточно целестремленно, то вы, скорее всего, найдете то, что ищете, или по крайней мере что-то похожее на то, что вы ищете, или, в самом крайнем случае, что-то сделанное похожим на то, что вы ищете». Ни одна находка, сделанная в Америке, не является — с полной достоверностью — одновременно подлинной и рунической.

В настоящее время науке известно около 5000 рунических текстов, в основном из Швеции, где в средние века устанавливалось немало камней, чаще всего памятников, с руническими надписями. Более ранние тексты позволяют нам узнать кое-что о жизни суровых викингов от них самих, а не из враждебных к ним хроник, составленных в странах, куда они совершали набеги. Многие надписи увековечивают боевую славу викингов, а некоторые из них являются отменными образчиками самовосхваления. Некоторые, но не все. Взглянем, к примеру, на изящную стелу, некогда украшавшую погребальный холм на одной из ферм в Норвегии. На ней высечено изображение волхвов под рождественской звездой. Надпись на стеле раскрывает перед нами неожиданный аспект жизни народа, мужчи-

ны которого часто умирали далеко от родных мест, так что забота о доме полностью лежала на женщинах: «Гуннвор, дочь Триорика, построила мост в память своей дочери Астриор. Она была самой искусной мастерицей среди девушек Гаделанда».

Эта книга — одно из изданий недавно начатой серии «Изучая прошлое», отличающейся необычайно высоким качеством, хорошим стилем и доступной ценой.

ВЫСШИЕ ДОСТИЖЕНИЯ ЯПОНИИ
THE BEST OF JAPAN. Kodansha Ltd., distributed in the U.S. by Harper & Row, Publishers, Inc. (\$ 24.95)

ОКОЛО 20 лет назад вышел в свет альбом великолепных фотографий, позаимствовавший свое название у необычного способа, которым крестьяне северной Японии упаковывают пяток яиц с помощью нескольких кусочков шпагата, искусно сплетенного из рисовой соломы. Этот же альбом знакомил читателя еще с двумя сотнями примеров традиционного японского искусства упаковки товаров, наглядно демонстрируя, как приверженность древней японской культуры к изяществу проявляется даже в отношении к самым будничным аспектам жизни. Возможно, японцы и сегодня приносят домой яйца все в той же упаковке, но в наши дни Япония стала для всего мира неиссякающим источником идей, воплощенных в новейшей продукции любого вида. Эта продукция вызывает восхищение уже не горстки соседей крестьянина-умельца, никогда не отступающего от существовавшего столетиями образца, а у миллионов покупателей во всем мире.

В этой книге представлены фотографии около 250 видов японской коммерческой продукции, появившейся на рынке за последние 5 лет. Каждая фотография сопровождается кратким описанием запечатленного на ней изделия, включая историю его создания и дальнейшие перспективы. Они отбирались каждый год специальной комиссией как образцы совершенства среди новых товаров и услуг. Девять технических и коммерческих экспертов, входящих в эту комиссию, выносят свои суждения от имени экономической газеты «Никкей». Около половины книги посвящено образцам 1986 г. Среди товаров, удостоившихся награды, мы увидим самые различные вещи: от приводимой в движение вручную игрушечной кошачьей лапки, великолепно имитирующей знакомые всем движения живой кошки, до ра-

кетного двигателя на жидком кислороде и водороде, способного развить тягу в 10 т.

В этой книге мы не встретим упаковки для пяти яиц, но в тех изделиях, которые представлены в ней, трудно не заметить того же духа мастерства, внимания к деталям и способности находить неожиданные решения. Это — современная смесь новейшей техники, эксцентричной моды, внимания к повседневному быту и умения торговать. Эстетическая сила древней традиции не всегда проявляется непосредственно, но, по-видимому, в этом отношении прошлое не слишком отличалось от настоящего. Самое лучшее остается, а все остальное неотвратимо исчезает под пылью прошедших лет.

Вот несколько различных изделий. Первое из них — миниатюрная деталь, которой наверняка обеспечен успех. Она разработана совместно двумя крупнейшими электронными фирмами: Sony и Sharp. Полупроводниковый лазер, небольшое устройство цилиндрической формы, является источником и детектором инфракрасно-

го излучения, сканирующим компакт-диски в современных проигрывателях. Это — самая важная деталь такого проигрывателя; чем меньше используемый в нем лазерный диод, тем меньше размер проигрывателя. Именно появление миниатюрных диодов сделало возможным создание переносных проигрывателей. Первые инфракрасные полупроводниковые лазеры, работающие при комнатной температуре, были созданы в 1970 г. фирмой AT&T Bell Laboratories. Японским фирмам потребовалось несколько лет для того, чтобы увеличить срок службы таких диодов, и в настоящее время он составляет не менее 20 000 часов. Сейчас японцам принадлежит 99% мирового рынка полупроводниковых лазеров для проигрывателей, а в середине 1986 г. они начали производство новой модели, впятеро меньшей по размеру, чем предыдущая, и полностью изготавливаемой автоматами. К началу 1987 г. каждый месяц производилось около 0,5 млн. диодов. «По-видимому... полупроводниковые лазеры Sharp и Sony станут мировым стандартом».

Мороженое и подобные ему сладкие блюда давно полюбились людям во всех странах. Однако приготовить их дома нелегко. Для этого даже недостаточно иметь холодильник — ведь для того чтобы приготовить мороженое отличного качества, необходимо помешивать его, пока оно замерзает. Для этого с успехом используется настольная мороженица, но для нее требуется запас льда. Специальный холодильник для приготовления мороженого слишком громоздок и к тому же недешев. Простые миксеры с моторчиками, помещаемые в морозильную камеру обычного холодильника, появились уже давно, но не имели особого успеха. Решение, столь же элегантное, как упаковка для пяти яиц (хотя, быть может, и не столь эстетичное), было найдено в 1983 г. компанией Nippon Light Metal, выпустившей большую чашу, между двойными стенками которой помещено охлаждающее вещество, застывающее за семь часов в любой морозильной камере. При низкой температуре теплоемкость затвердевшего охладителя оказывается достаточной для того, чтобы охладить мороженое, положенное в чашу, за 15 мин, в то время как хозяйка помешивает его вручную прямо на кухонном столе. Вот уже поистине блестящее и невероятно простое решение, наиболее удобное для потребителя!

В книге вы увидите еще множество диковинок: пьезоэлектрический громкоговоритель не толще листа бумаги; трехмерную ткань, прочную во всех направлениях, сотканную из волокон из графита и карбида кремния (сейчас как раз начинается массовое производство такой ткани); новый гибрид — «овощ тысячи самоцветов», — полученный путем скрещивания обыкновенной капусты с японским растением, напоминающим шпинат (прежде чем были получены семена нового растения, его выращивали с помощью новейших биологических методов); «подставки» метровой высоты для зданий, состоящие из множества слоев стали и резины, способные выдерживать нагрузку в 200 т и защищать установленное на них сооружение от землетрясений (срок их службы — 60 лет); кредитные карточки, которые невозможно подделать...

Конечно, называть эти коммерческие изделия, как бы хороши они ни были, высшими достижениями Японии будет неточным. В то же время эта книга позволяет читателям получить представление о многих направлениях экономического и научно-технического прогресса последних лет и важном месте, которое в нем занимает Япония.

Книги издательства „Мир“

Магазин № 5

ТЕХНИЧЕСКАЯ КНИГА

Ленкинготорга предлагает

Т. Гудвин, Э. Мерсер
ВВЕДЕНИЕ В БИОХИМИЮ РАСТЕНИЙ

В 2-х т.
1986 г. Цена за комплект 9 р. 50 к.

ФОТОСИНТЕЗ

Под редакцией Говинджи

В 2-х т.
1987 г. Цена за комплект 11 р. 20 к.

Г. Шеперд **НЕЙРОБИОЛОГИЯ**

В 2-х т.
1987. Цена за комплект 4 р. 70 к.

Книги высылаются наложенным платежом.

Адрес магазина:

191040 Ленинград, Пушкинская ул., 2



Издательство МИР предлагает:

Э. Рис, М. Стернберг ОТ КЛЕТОК К АТОМАМ ИЛЛЮСТРИРОВАННОЕ ВВЕДЕНИЕ В МОЛЕКУЛЯРНУЮ БИОЛОГИЮ

Перевод с английского

В книге американских авторов изложены основы молекулярной биологии. Материал разделен на 44 темы, каждая из которых представлена в виде схем и рисунков, сопровождаемых энциклопедическим по стилю текстом. Обилие иллюстраций и сжатая форма изложения делают книгу удобной для быстрого усвоения.

Для студентов биологических и медицинских вузов, учащихся старших классов, а также биологов, медиков, физиков и химиков, интересующихся проблемами молекулярной биологии.

1988, 14 л. Цена 1 р. 30 к.

ИММУНОФЕРМЕНТНЫЙ АНАЛИЗ

Под ред. Т. Нго, Х. Ленхоффа
Перевод с английского

Книга представляет собой фундаментальное руководство по иммуноферментному анализу, сочетающее изложение принципов метода с подробным обсуждением практического использования его различных вариантов. Авторы отдельных разделов — исследователи с большим личным опытом в разработке и применении метода; книга написана на высоком профессиональном уровне и содержит много новых данных.

Для специалистов по молекулярной биологии, биохимиков, микробиологов, биотехнологов.

1988, 28 л. Цена 4 р. 50 к.



КАРТИРОВАНИЕ ХРОМОСОМ ПРИ ПОМОЩИ ДНК-МАРКЕРОВ

MULTILOCUS LINKAGE ANALYSIS IN HUMANS: DETECTION OF LINKAGE AND ESTIMATION OF RECOMBINATION. G.M. Lathrop, J.-M. Lalouel, C. Julier and J. Ott in *The American Journal of Human Genetics*, Vol. 37, No. 3, pages 482-498; May, 1985.

CONSTRUCTION OF HUMAN GENETIC LINKAGE MAPS, I: PROGRESS AND PERSPECTIVES. R. White, M. Leppert, P. O'Connell, Y. Nakamura, C. Julier, S. Woodward, A. Silva, R. Wolff, M. Lathrop and J.-M. Lalouel in *Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology*, Vol. 51, pages 29-38; 1986.

INVESTIGATION OF GENETIC LINKAGE IN HUMAN FAMILIES. Ray White and Jean-Marc Lalouel in *Advances in Human Genetics*, Vol. 16, pages 121-228; 1987.

VARIABLE NUMBER OF TANDEM REPEAT (VNTR) MARKERS FOR HUMAN GENE MAPPING. Yusuke Nakamura, Mark Leppert, Peter O'Connell, Roger Wolff, Tom Holm, Melanie Culver, Cindy Martin, Esther Fujimoto, Mark Hoff, Erika Kumlin and Ray White in *Science*, Vol. 235, No. 4796, pages 1616-1622; May 27, 1987.

ДЕФЕКТ ВСЕЛЕНСКОГО ЗЕРКАЛА

EFFECTIVE HAMILTONIAN FOR $\Delta S = 1$ WEAK NONLEPTONIC DECAYS IN THE SIX-QUARK MODEL. Frederick J. Gilman and Mark B. Wise in *Physical Review D*, Vol. 20, pages 2392-2410; November 1, 1979.

MEASUREMENT OF THE CP-NONCONSERVATION PARAMETER ϵ'/ϵ . J. K. Black, S. R. Blatt, M. K. Campbell, H. Kasha, M. Mannelli, M. P. Schmidt, C. B. Schwarz, R. K. Adair, R. C. Larsen, L. B. Leipuner and W. M. Morse in *Physical Review Letters*, Vol. 54, No. 15, pages 1628-1630; April 15, 1985.

THE GREAT DESIGN: PARTICLES, FIELDS, AND CREATION. Robert Adair. Oxford University Press, 1987.

ГАМК-ЭРГИЧЕСКИЕ НЕЙРОНЫ

EFFECTS OF PICROTOXIN AND STRYCHNINE ON RABBIT RETINAL GANGLION CELLS: LATERAL INTERACTIONS FOR CELLS WITH MORE COMPLEX RECEPTIVE FIELDS. J. H. Caldwell, N. W. Daw and H. J. Wyatt in *The Journal of Physiology*, Vol. 276, pages 277-298; 1978.

MONOCLONAL ANTIBODIES TO GLUTAMIC ACID DECARBOXYLASE. David I. Gottlieb, Yen-Chung Chang and James E. Schwob in *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Vol. 83, No. 22, pages 8808-8812; November, 1986.

SEQUENCE AND FUNCTIONAL EXPRESSION OF THE GABA_A RECEPTOR SHOWS A LIGAND-GATED RECEPTOR SUPERFAMILY. Peter R. Schofield, Mark G. Darlison, Norihisa Fujita, David R. Burt, F. Anne Stephenson, Henry Rodriguez, Lucy M. Rhee, J. Ramachandran, Vincenzina Reale, Thora A. Glen-corse, Peter H. Seeburg and Eric A. Barnard in *Nature*, Vol. 328, No. 6127, pages 221-227; July 16, 1987.

КАК РАЗВИВАЛСЯ КЛИМАТ НА ПЛАНЕТАХ ЗЕМНОЙ ГРУППЫ

ATMOSPHERES. Richard M. Goody and James C. G. Walker. Prentice-Hall, Inc., 1972.

CLIMATIC CHANGE ON THE TERRESTRIAL PLANETS. James B. Pollack in *Icarus*, Vol. 37, No. 3, pages 479-553; March, 1979.

A NEGATIVE FEEDBACK MECHANISM FOR THE LONG-TERM STABILIZATION OF EARTH'S SURFACE TEMPERATURE. James C. G. Walker, P. B. Hays and J. F. Kasting in *Journal of Geophysical Research*, Vol. 86, No. C10, pages 9776-9782; October 20, 1981.

THEORETICAL CONSTRAINTS ON OXYGEN AND CARBON DIOXIDE CONCENTRATIONS IN THE PRECAMBRIAN ATMOSPHERE. James F. Kasting in *Precambrian Research*, Vol. 34, Nos. 3-4, pages 205-229; January, 1987.

Будыко М. И., Ронов А. Б., Яншин А. Л. ИСТОРИЯ АТМОСФЕРЫ. — Л.: Гидрометеоздат, 1985.

Заварзин Г. А. БАКТЕРИИ И СОСТАВ АТМОСФЕРЫ. — М.: Наука, 1984.

Мухин Л. М. ПЛАНЕТЫ И ЖИЗНЬ. — М.: Молодая гвардия, 1980.

ПРИСПОСАБЛИВАЮЩИЕСЯ ОПОССУМЫ

THE BIOLOGY OF SENESCENCE. A. Comfort. Elsevier North-Holland Publishing Co., 1979.

VIRGINIA OPOSSUM. Alfred L. Gardner in *Wild Mammals of North America: Biology, Management, and Economics*, edited by Joseph A. Chapman and George A. Feldhamer. The Johns Hopkins University Press, 1982.

SEX RATIO VARIATION IN MAMMALS. T. H. Clutton-Brock and G. R. Iason in *Quarterly Review of Biology*, Vol. 61, No. 3, pages 339-374; September, 1986.

Издательство
МИР
предлагает:

ИММОБИЛИЗОВАННЫЕ КЛЕТКИ И ФЕРМЕНТЫ

Под редакцией Дж. Вудворда
Перевод с английского

Книга международного коллектива авторов (главным образом английских) представляет собой сборник современных методов, рекомендуемых для получения стабилизированных препаратов клеток и ферментов и их использования в практических целях. Подробно описаны приемы адсорбционной и ковалентной иммобилизации ферментов, иммобилизация включением в гель, комплексообразованием с металлами, микрокапсулированием, а также применение стабилизированных биологических препаратов для создания электродов и датчиков, проведения электрохимических процессов, модификации стероидов, анализа гормонов и других целей.

Для специалистов в области биотехнологии, биохимиков, химиков.

1988, 14 л. Цена 2 р. 30 к.

ИММУНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Под редакцией И. Лефковитса,
Б. Перниса

Перевод с английского

Книга представляет собой перевод третьего тома серии «Иммунологические методы». Переводы двух первых томов выпущены издательством «Мир» в 1981 и 1983 гг. В данных том вошли последние, наиболее актуальные методические разработки в области молекулярной и клеточной иммунологии.

Для иммунологов, специалистов по молекулярной биологии, цитологов, врачей, лаборантов научно-исследовательских институтов, аспирантов и студентов биологических специальностей.

1988, 38 л. Цена 3 р. 70 к.



ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИЕ ПОЛИМЕРЫ

POLYACETYLENE: CHEMISTRY, PHYSICS, AND MATERIAL SCIENCE. James C. W. Chien. Academic Press, 1984.

HANDBOOK OF CONDUCTING POLYMERS. Terje A. Skotheim. Marcel Dekker, Inc., 1986.

PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON SCIENCE AND TECHNOLOGY OF SYNTHETIC METALS. In *Synthetic Metals*, Vol. 17-19; January-March, 1987.

РАМАНУДЖАН И ЧИСЛО π

MODULAR EQUATIONS AND APPROXIMATIONS TO π . S. Ramanujan in *The Quarterly Journal of Pure and Applied Mathematics*, Vol. 45, pages 350-372; 1914.

COMPUTATION OF π USING ARITHMETIC-GEOMETRIC MEAN. Eugene Salamin in *Mathematics of Computation*, Vol. 30, No. 135, pages 565-570; July, 1976.

A HISTORY OF π . Petr Beckmann. The Golem Press, 1977.

PI AND THE AGM: A STUDY IN ANALYTIC NUMBER THEORY AND COMPUTATIONAL COMPLEXITY. Jonathan M. Borwein and Peter B. Borwein. John Wiley & Sons, Inc., 1986.

Гиндикин С. Г. ЗАГАДКА РАМАНУДЖАНА. — Квант, 1987, № 10, с. 14.

БУБОННАЯ ЧУМА

THE BLACK DEATH. Philip Zeigler. Harper & Row, Inc., 1970.

LES HOMMES ET LA PESTE EN FRANCE ET DANS LES PAYS EUROPEENS ET MEDITERRANÉENS. Jean-Noël Biraben. Mouton et Cie., 1975.

THE BLACK DEATH IN THE MIDDLE EAST. Michael W. Dols. Princeton University Press, 1977.

НАУКА ВОКРУГ НАС

ELEMENTARY DERIVATION OF THE WAKE PATTERN OF A BOAT. Frank S. Crawford in *American Journal of Physics*, Vol. 52, No. 9, pages 782-785; September, 1984.

Стокер Дж. Волны на воде. — М.: Издательство иностранной литературы, 1959.

ЗАНИМАТЕЛЬНЫЙ КОМПЬЮТЕР

THE BLIND WATCHMAKER. Richard Dawkins. W. W. Norton & Company, 1987.

Издательство
МИР
предлагает:

**Х.-К. Рот, Ф. Келлер,
Х. Шнайдер
РАДИОСПЕКТРОСКОПИЯ
ПОЛИМЕРОВ**

Перевод с немецкого

Книга посвящена применению современных методов высокочастотной спектроскопии (ЯМР и ЭПР) в физике, химии и технологии полимеров. Авторам удалось объединить в этом издании учебник для студентов старших курсов и монографию с изложением последних достижений в данной области знания.

Для студентов и аспирантов химических и химико-технологических вузов, работников заводских лабораторий, молодых специалистов, повышающих свою квалификацию.

1987, 22 л. Цена 3 р. 60 к.



**В МИРЕ
НАУКИ**

Подписано в печать 21.03.88.
По оригинал-макету. Формат 60 x 90 1/4.

Гарнитуры таймс, гелиос.

Офсетная печать.

Объем 5,75 бум. л.

Усл.-печ. л. 11,50.

Уч.-изд. л. 14,35.

Усл. кр.-отт. 42,36.

Изд. № 25/6062. Заказ 171.

Тираж 24660 экз. Цена 2 р.

Издательство «Мир»

Набрано в Межиздательском фотонаборном центре издательства «Мир»

Типография В/О «Внешторгиздат»

Государственного комитета СССР

по делам издательств,

полиграфии и книжной торговли.

127576, Москва, Илимская, 7



Вниманию читателей!

ИМЕЮТСЯ В ПРОДАЖЕ И ВЫСЫЛАЮТСЯ НАЛОЖЕННЫМ ПЛАТЕЖОМ
СЛЕДУЮЩИЕ ТЕМАТИЧЕСКИЕ ВЫПУСКИ ЖУРНАЛА «ТИИЭР»
(«Труды Института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике» —
перевод журнала *Proceedings of the IEEE*, США)

ТИИЭР, т. 73, № 12 (декабрь 1985)

Малый тематический выпуск

ИНЖЕНЕРНЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ ПЕРСОНАЛЬНЫХ КОМПЬЮТЕРОВ

СОДЕРЖАНИЕ

Нововведения в программном обеспечении
ЭВМ Explorer фирмы Texas Instruments
Языки ограничений и декларативные языки
для инженерных приложений
Автоматизированное проектирование и изготов-
ление чертежей на персональных ЭВМ
Автоматизированная система разработки на
основе пакета программ MATRIX/PC: Модели-
рование и оптимизация на персональных ЭВМ
Обработка сигналов и решение инженерных за-
дач на персональных ЭВМ
Обзор программного обеспечения персональ-
ных ЭВМ в Японии

Кроме того, вне рамок малого тематического выпус-
ка в номере опубликованы следующие обзорные
статьи:

Прямые методы анализа динамической устой-
чивости энергосистем: Новые результаты
Применение ультразвука в неразрушающем
контроле
Оценка перспективности технологий
Оценки, энтропия, правдоподобие

ТИИЭР, т. 74, № 11 (ноябрь 1986)

Малый тематический выпуск

МАГНИТНАЯ ЗАПИСЬ

СОДЕРЖАНИЕ

Основные принципы магнитной записи
Порошковые магнитные материалы для носите-
лей магнитной записи
Тонкопленочные носители магнитной записи
Магнитные головки для информации с высо-
кой плотностью
Устройства магнитной записи
Магнитооптическая запись
Достижения в области ЗУ на цилиндрических
магнитных доменах

Кроме того, вне рамок малого тематического выпус-
ка в номере помещена обзорная статья
Спектральный анализ и различение сигналов
по пересечениям нуля

Цена номера 3 р. 30 к. Журнал можно приобрести в Москве в следующих магазинах:

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

У иногородних читателей заказы на отправку отдельных номеров
наложенным платежом принимает редакция журнала.

Заказы следует присылать

на открытках отдельно на каждый номер

(с указанием требуемого количества экземпляров) по адресу:

129820, ГСП, Москва, И-110, 1-й Рижский пер., 2, редакция ТИИЭР.



В следующем номере:



ПОЛНОТА И ПЛОДОВИТОСТЬ У ЧЕЛОВЕКА

ГРАВИТАЦИЯ И АНТИВЕЩЕСТВО

АНТИТЕЛА-КАТАЛИЗАТОРЫ

СОВРЕМЕННЫЕ СТРОИТЕЛЬНЫЕ КРАНЫ

ПОЧЕМУ У ЛЕОПАРДА НА ШКУРЕ ПЯТНА?

НА ПОРОГЕ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ ТРАНЗИСТОРОВ

ДРЕВНЕРИМСКИЙ ПОРТ КОССА

КАК ИГРАТЬ В КЕГЛИ, ЧТОБЫ ВЫИГРЫВАТЬ

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕКОТОРЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ
НА ДОМАШНИХ КОМПЬЮТЕРАХ С ВИДЕОТЕРМИНАЛОМ