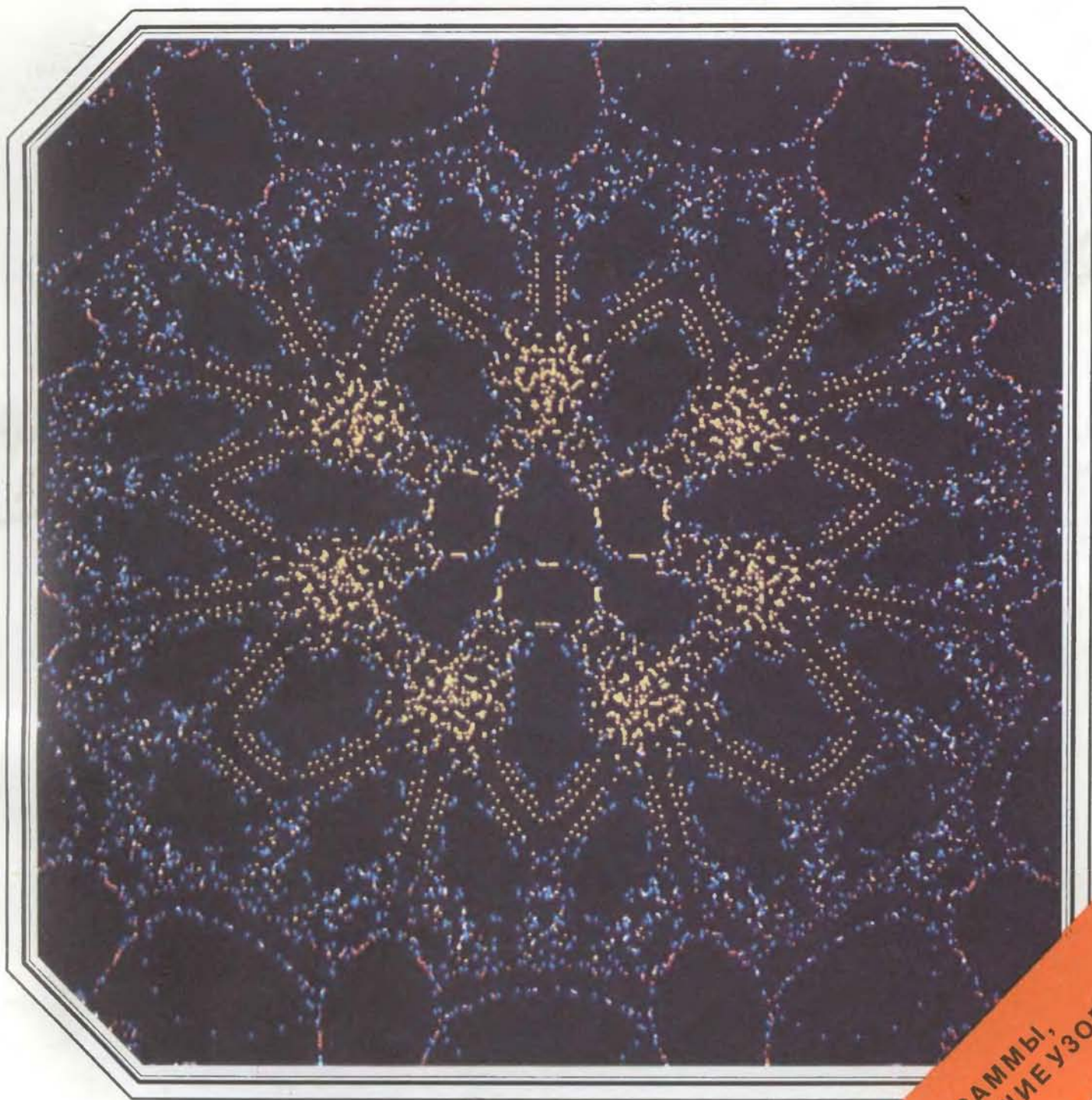


В МИРЕ НАУКИ

SCIENTIFIC
AMERICAN

Издание на русском языке



Ноябрь **11** 1986

ПРОГРАММЫ,
ГЕНЕРИРУЮЩИЕ УЗОРЫ

Издательство МИР предлагает:

Сибеста Р.

**СТРУКТУРНОЕ
ПРОГРАММИРОВАНИЕ
НА ЯЗЫКЕ АССЕМБЛЕРА
ДЛЯ ЭВМ VAX-11**

Перевод с английского

Р.Сибеста

**Структурное
программирование
на языке
ассемблера**

VAX-11

Издательство «МИР»

Излагаются основы программирования на языке ассемблера для ЭВМ ВАКС-11, которая отличается от ПДП-11 более развитой архитектурой, возможностью обработки 32- и 64-разрядных слов, виртуальной памятью до 4 Гбайт и большим быстродействием. Пользуясь данной книгой, можно достаточно быстро освоить

процедуры составления программ для создаваемых в нашей стране перспективных машин серии СМ ЭВМ.

Для специалистов, работающих в области разработки программного и информационного обеспечения, а также студентов, изучающих вычислительную технику.

1988, 25 л., 2 р. 10 к.

Предварительные заказы на книгу принимаются магазинами научно-технической литературы



Scientific American · Издание на русском языке

ИЛЛЮСТРИРОВАННЫЙ ЖУРНАЛ

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

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР» МОСКВА

№ 11 · НОЯБРЬ 1986**В номере:**

- СТАТЬИ**
- 4 **Биологическое влияние МКВ-излучения** *Кеннет Р. Фостер, Артур У. Гай*
Представляет ли микроволновое излучение низкой интенсивности опасность для живого организма? В какой мере следует ограничить его воздействие? На эти вопросы пока нет однозначных ответов, так как экспериментальные данные не поддаются определенной интерпретации (Scientific American, September 1986, Vol. 255, No. 3)
- 14 **Химию прогнозирует топология** *Деннис Г. Рувэрэ*
Методы, основанные на анализе топологии молекул — преобразовании их пространственных форм в плоские геометрические узоры, образованные связанными между собой атомами, — позволяют предсказывать многие свойства химических соединений (Scientific American, September 1986, Vol. 255, No. 3)
- 24 **Суперструны** *Майкл Б. Грин*
Трактовка элементарных частиц как струн открывает путь к созданию самосогласованной квантовой теории для объяснения всех четырех фундаментальных взаимодействий, существующих в природе. Эта теория может изменить наши представления о пространстве и времени (Scientific American, September 1986, Vol. 255, No. 3)
- 40 **Гематоэнцефалический барьер** *Гари У. Голдстейн, А. Лоррис Бец*
Капилляры мозга отличаются от капилляров других органов. Их особые свойства создают между кровью и мозгом надежную преграду, обладающую строго избирательной проницаемостью (Scientific American, September 1986, Vol. 255, No. 3)
- 50 **Цвета предметов** *Филипп Бру, Томас Р. Шаша, Лайнетт Линден, Джером Леттвин*
Цветовые «иллюзии», порождаемые с помощью изображений на дисплее компьютера, свидетельствуют о том, что восприятие цвета предмета обусловлено не только ощущением света, идущего от поверхности предмета (Scientific American, September 1986, Vol. 255, No. 3)
- 60 **Взаимодействие Солнца с межзвездным веществом** *Франческо Парези, Стюарт Бойер*
В настоящее время через Солнечную систему проходит облако межзвездного газа. Возможно, в прошлом встречи с более плотными облаками оказывали заметное влияние на климат Земли (Scientific American, September 1986, Vol. 255, No. 3)
- 68 **Плеченогие** *Джойс Р. Ричардсон*
Среди этих своеобразных животных одни обладают неизменной биологической организацией, но обитают лишь в подходящих условиях, другие же способны изменять свою структуру или поведение применительно к имеющимся условиям (Scientific American, September 1986, Vol. 255, No. 3)
- 76 **Вклад Леонардо да Винчи в теоретическую механику** *Вернард Фоли, Вернер Содэл*
Тщательное изучение рисунков Леонардо да Винчи, в частности тех, на которых изображен арбалет, показывает, что его идеи имели отношение к эволюции четырех представлений в механике (Scientific American, September 1986, Vol. 255, No. 3)
- РУБРИКИ**
- 3 Об авторах
- 23 50 и 100 лет назад
- 38, 59, 82, 90, 105 Наука и общество
- 84 Наука вокруг нас
- 92 Занимательный компьютер
- 100 Книги
- 107 Библиография

SCIENTIFIC AMERICAN

Jonathan Piel
PRESIDENT AND EDITOR
BOARD OF EDITORS

Philip Morrison
BOOK EDITOR

Armand Schwab, Jr.
Timothy Appenzeller
John M. Benditt
Peter G. Brown
David L. Cooke, Jr.
Ari W. Epstein
Michael Feirtag
Gregory R. Greenwell
Robert Kunzig
James T. Rogers
Ricki L. Rusting

Samuel L. Howard
ART DIRECTOR

Richard Sasso
PRODUCTION MANAGER

George S. Conn
GENERAL MANAGER

Gerard Piel
CHAIRMAN

© 1986 by Scientific American, Inc.
Товарный знак *Scientific American*,
его текст и шрифтовое оформление
являются исключительной собственностью
Scientific American, Inc.
и использованы здесь в соответствии
с лицензионным договором

В МИРЕ НАУКИ

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР
С. П. Капица

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА
Л. В. Шепелева

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

ЛИТЕРАТУРНЫЕ РЕДАКТОРЫ
М. М. Полова
М. В. Суrowова

ХУДОЖЕСТВЕННЫЙ РЕДАКТОР
С. А. Стулов

ЗАВЕДУЮЩАЯ РЕДАКЦИЕЙ
Т. Д. Франк-Каменецкая

РУКОВОДИТЕЛЬ ГРУППЫ ФОТОНАБОРА
Г. С. Азимов

ТЕХНИЧЕСКИЙ РЕДАКТОР
Л. П. Чуркина

КОРРЕКТОР
Р. Л. Вибке

ОФОРМЛЕНИЕ ОБЛОЖКИ РУССКОГО ИЗДАНИЯ
М. Г. Жуков

ШРИФТОВЫЕ РАБОТЫ
В. В. Ефимов

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

ТЕЛЕФОН РЕДАКЦИИ
286.2588

© перевод на русский язык
и оформление. «Мир», 1986

На обложке



УЗОРЫ ДЛЯ ОБОЕВ

Построенный компьютером узор, изображенный на обложке, представляет собой график последовательных значений, принимаемых элементарной математической функцией, которая повторно применяется к собственному результату (см. статью А. К. Дьюдни в рубрике «Занимательный компьютер» на с. 92). Рисунок хорошо иллюстрирует потенциальные возможности несложной компьютерной программы в создании абстрактных неповторяющихся образов. Первая точка (в данном случае совпадает с началом координат) — это исходное значение функции, которое определяет местоположение второй точки, а она в свою очередь определяет местоположение следующей, и т. д. в соответствии с процедурой, описанной в статье. Каждая точка имеет свой цвет, который зависит от ее значения в числовом интервале, соответствующем цветовой гамме. Существуют и многие другие приемы создания изображений с помощью компьютеров. Данное изображение получено Б. Мартином из Астонского университета (Великобритания) на терминале Tektronix Type 4113, связанном с компьютером модели VAX 11/750. Фотография сделана Б. Бруксом из того же университета.

Иллюстрации

ОБЛОЖКА: Barry Martin, Aston University

СТР.	АВТОР/ИСТОЧНИК	СТР.	АВТОР/ИСТОЧНИК	СТР.	АВТОР/ИСТОЧНИК
5	James Kilkelly		Michigan Medical Center	79-81	Pat Canganelli
6	Edward Bell			84-89	Michael Goodman
7	Alan D. Iselin	48	Edward A. Neuwelt	93	David Wiseman, University of Western Ontario
8	Haralambos N. Kriticos, University of Pennsylvania	51	Bradford Howland, Denise D. Denton, Massachusetts Institute of Technology	94-96	Barry Martin, Aston University
9-12	Alan D. Iselin			97	Johnny Johnson (вверху); Tony D. Smith, PICA Pty. Ltd., Essendon, Australia (внизу)
15-21	George Retseck	52	Andrew Christie		
25-36	Hank Iken, Walken Graphics	53-56	Bradford Howland, Denise D. Denton	98	Tony D. Smith, PICA Pty. Ltd., Essendon, Australia
41	P. A. Cancilla				
42-43	Patricia J. Wynne	60-66	Ian Worpole		
44	Thomas S. Reese, Morris J. Karnovsky (слева); Thomas S. Reese, Milton W. Brightman (справа); Patricia J. Wynne (внизу)	69	Doug Allan, Animals Animals (вверху); R. J. Hill, New Zealand Oceanographic Institute (внизу)		
45-46	Patricia J. Wynne	70-74	Tom Prentiss		
47	Gary W. Goldstein, A. Lorris Betz, University of	77	Pat Canganelli		
		78	Bayerische Staatsbibliothek, Munich		

Об авторах

Kenneth R. Foster, Arthur W. Guy (КЕННЕТ Р. ФОСТЕР, АРТУР У. ГАЙ «Биологическое влияние МКВ-излучения») — оба проявляют интерес к проблеме воздействия электромагнитных полей на живые ткани. Фостер получил степень доктора философии в области физики в Университете шт. Индиана в 1971 г. Изучением биологического влияния микроволн он начал заниматься еще во время службы в военно-морских силах США, а с 1976 г. продолжил исследования в этой области в Пенсильванском университете, где он занимает должность доцента по биоинженерии. Гай работает в Вашингтонском университете, профессор в области биоинженерии и директор лаборатории по проблемам биоэлектромагнетизма. С 1970 по 1982 г. Гай возглавлял комиссию при Американском национальном институте стандартов, ответственную за подготовку стандарта по облучению микроволнами.

Dennis H. Rouvray (ДЕННИС Г. РУВРЭ «Химию прогнозирует топология») — доцент химического факультета Университета шт. Джорджия. Химию изучал в Имперском колледже науки и техники в Лондоне. Проблемы применения топологии и теории графов в химии заинтересовался в 1970 г. в Математическом институте Оксфордского университета. В то время математической химии как отдельной дисциплины не существовало. Сейчас в год публикуется около 500 научных работ, и недавно Руврэ основал новый журнал, посвященный этим проблемам. До приезда в Джорджию в 1984 г. он работал в ряде стран Африки, Азии и Европы.

Michael V. Green (МАЙКЛ Б. ГРИН «Суперструны») — профессор физики в колледже королевы Марии Лондонского университета. Теорией струны начал заниматься в Институте высших исследований в Принстоне, где он работал два года после получения в 1970 г. степени доктора философии в Кембриджском университете. В 1972 г. Грин вернулся в Кембриджский университет и работал в Кавендишской лаборатории. В 1977 г. перешел в Оксфордский университет, а затем в 1978 г. — в Лондонский. Он часто посещает Калифорнийский технологический институт, где сотрудничает с Дж. Шварцем, автором ранних работ по теории струны.

Gary W. Goldstein, A. Lorris Betz (ГАРИ У. ГОЛДСТЕЙН, А. ЛОРРИС БЕЦ «Гематоэнцефалический барьер»)

работают вместе с 1977 г., когда Бец после получения докторской степени проходил стажировку в лаборатории Голдстейна в Медицинском центре Калифорнийского университета в Сан-Франциско. В 1979 г. они оба перешли в Медицинский центр Мичиганского университета, где в настоящее время Голдстейн профессор, а Бец доцент кафедры педиатрии и неврологии. Голдстейн получил степени бакалавра и доктора медицины в Чикагском университете; совершенствовался в области педиатрии и неврологии в ряде университетских клиник, затем стал сотрудником Медицинского центра Калифорнийского университета в Сан-Франциско. Бец имеет степени доктора медицины и доктора философии в области физиологии и биохимии, присвоенные Висконсинским университетом в Мадисоне.

Philippe Brou, Thomas R. Sciascia, Lynette Linden, Jerome Y. Lettvin (ФИЛИПП БРУ, ТОМАС Р. ШАША, ЛАЙНЕТТ ЛИНДЕН, ДЖЕРОМ ЛЕТТВИН «Цвета предметов») работают под руководством Леттвина в Массачусетском технологическом институте. Бру защитил докторскую диссертацию по машинному зрению в МТИ и работает в Лаборатории искусственного интеллекта, занимаясь проблемами графики, финансового анализа, фабричного производства и нефтяного бурения. Шаша работает невропатологом в Клинике Коурт-Стрит Управления ветеранов в Бостоне и преподает неврологию в Медицинской школе Бостонского университета. Диплом бакалавра по биологии получил в МТИ, диплом магистра — в Колледже терапии и хирургии Колумбийского университета. Линден — доцент на кафедре промышленной технологии в Бостонском университете. Она также преподавала в МТИ и в обоих учреждениях получила награды за блестящую работу. Сам Леттвин олицетворяет разнообразие этой группы. Он получил диплом магистра в Иллинойском университете, затем был практикующим психиатром. Однако в течение последних 35 лет он сотрудничает с Лабораторией электроники МТИ, и в течение 20 лет состоит профессором биологического факультета и факультета электротехники и вычислительной техники. Леттвин провел много исследований по передаче нервных возбуждений в мозге.

Francesco Paresce, Stuart Bowyer (ФРАНЧЕСКО ПАРЕШ, СТЬЮАРТ БОЙЕР «Взаимодействие Солнца с

межзвездным веществом») ведут совместные исследования в области ультрафиолетовой астрономии. Пареш — главный астроном Института космического телескопа в Балтиморе. В 1968 г. уехал из Италии в США и поступил в Калифорнийский университет в Беркли. После получения степени доктора философии он работал в этом университете астрономом-исследователем, затем в 1983 г. переехал в Балтимор. В Беркли он работал в содружестве с Бойером — профессором астрономии. Бойер получил степень доктора философии в области рентгеновской астрономии в Католическом университете. В конце 60-х годов он начал разрабатывать приборы для наблюдений в дальней ультрафиолетовой области спектра. В настоящее время Бойер — ведущий исследователь по программе НАСА, предусматривающей запуск космического аппарата для наблюдений в дальней ультрафиолетовой области.

Joyce R. Richardson (ДЖОЙС Р. РИЧАРДСОН «Плеченогие») получила степень магистра по зоологии в Университете Новой Зеландии, степень доктора философии в области геологии — в Мельбурнском университете. Работая в Океанографическом институте Новой Зеландии, заинтересовалась плеченогими, которых считает необыкновенно ценным объектом для научных исследований: «В этих животных заключена летопись жизни на Земле». В настоящее время Ричардсон — сотрудница Музея королевы Виктории в Мельбурне, но продолжает свои исследования в фьордах Новой Зеландии. Она намеревается построить в заливе Милфорд подводную наблюдательную станцию, которая работала бы и как научное учреждение и для туристов.

Vernard Foley, Werner Soedel (ВЕРНАРД ФОЛИ, ВЕРНЕР СОДЭЛ «Вклад Леонардо да Винчи в теоретическую механику») — сотрудники Университета Пардю. Фоли — доцент истории, Содэл — профессор механики. Для журнала «Scientific American» ими были написаны следующие статьи: «Ancient Catapults» (March 1979), «Ancient Oared Warships» (April 1981), «The Crossbow» (January 1985) (см. «В мире науки», 1985, № 3). Диссертация Фоли, за которую ему была присуждена ученая степень доктора философии в Калифорнийском университете в Беркли, посвящена истории развития науки и техники в Европе. Содэл окончил Университет Пардю, где получил степени магистра и доктора философии в области механики; последняя была присуждена ему в 1967 г.

Биологическое влияние МКВ-излучения

Представляет ли микроволновое излучение низкой интенсивности опасность для живого организма?

В какой мере следует ограничить его воздействие?

На эти вопросы пока нет однозначных ответов, так как экспериментальные данные не поддаются определенной интерпретации

КЕННЕТ Р. ФОСТЕР, АРТУР У. ГАЙ

СИСТЕМЫ управления воздушным транспортом, радиолокационные установки, используемые полицейской службой и в вооруженных силах, спутниковые телевизионные системы связи, устройства, обеспечивающие телефонную связь на дальние расстояния, аппараты для диатермии и микроволновые печи — все это источники микроволн (МКВ)*. За исключением тех случаев, когда МКВ используются для непосредственного воздействия на организм человека в лечебных целях, лишь крайне малая часть этой невидимой энергии достигает населения. Опасно ли для здоровья человека воздействие столь низких уровней МКВ-излучений?

Это один из тех вопросов, которые легко задать, но на которые нелегко ответить. Влияние МКВ-излучений на живой организм изучалось более всесторонне, чем действие многих других факторов окружающей среды, потенциально опасных для человека. Тем не менее как среди ученых, так и среди общественности отсутствует единая точка зрения по вопросу их вредности.

Средства связи представляют собой широко распространенный источник МКВ-излучения, постоянно

действующего на население. Когда какая-либо компания обращается в органы местного самоуправления связи за разрешением на установку станции, работающей в диапазоне МКВ, то, как правило, возникают споры и представители компании доказывают, что создаваемые радиопередатчиком уровни мощности или ее пиковые значения не будут превышать тысячных или миллионных долей от уровней, установленных как предельно допустимые. Допустимые же пределы значительно ниже тех, при которых МКВ-излучение представляет опасность для организма.

Другая сторона заявляет, что слабые МКВ-излучения могут привести к развитию еще не выявленных неблагоприятных эффектов и что безопасность новой установки нужно доказать. При этом делаются ссылки на результаты исследований, полученные в опытах на животных и доказывающие наличие неблагоприятных эффектов при действии МКВ-излучений низкой интенсивности, в частности таких, как нарушение состояния иммунной системы, изменение поведения, нарушение проницаемости гематоэнцефалического барьера, повреждение хромосом и развитие раковых опухолей.

Разногласие в определенной мере обусловлено противоречивостью и неоднозначностью результатов исследований, проведенных в течение последних 40 лет и полученных примерно в 6 тыс. работ. С тех пор как МКВ-техника получила широкое распространение, стало известно, что излучаемые ею волны большой мощности могут вызвать у человека развитие ожога или тепловой удар. Неблагоприятное действие на человеческий организм МКВ-излучений низкой интенсивности достаточно определено

не доказано. В то же время отсутствуют данные, которые позволили бы утверждать, что низкие интенсивности МКВ-излучений абсолютно безвредны. Отсутствие однозначности — это не только результат небезупречных исследований. Причина кроется глубже: используемые в настоящее время методы позволяют интерпретировать полученные данные по-разному, что порождает неоднозначность выводов, в силу чего на их основании нельзя сделать определенного заключения о вредности низкоинтенсивных МКВ-излучений.

Учитывая неубедительность имеющихся доказательств, мы не намерены бесспорно утверждать, что воздействие слабого МКВ-излучения является опасным или безопасным. Мы просто рассмотрим, как производится количественная оценка степени риска в тех случаях, когда опасность очевидна. Мы также рассмотрим, как в США разрабатывался первый стандарт, устанавливающий предельно допустимые уровни МКВ-излучения, и на каких данных основывались содержащиеся в стандарте ограничения. Затем мы приведем описание нескольких случаев неблагоприятного действия МКВ-излучений, указывающих на важность проблемы и необходимость оценки возможной опасности МКВ, так же как и других факторов окружающей среды, не обладающих выраженным биологическим действием.

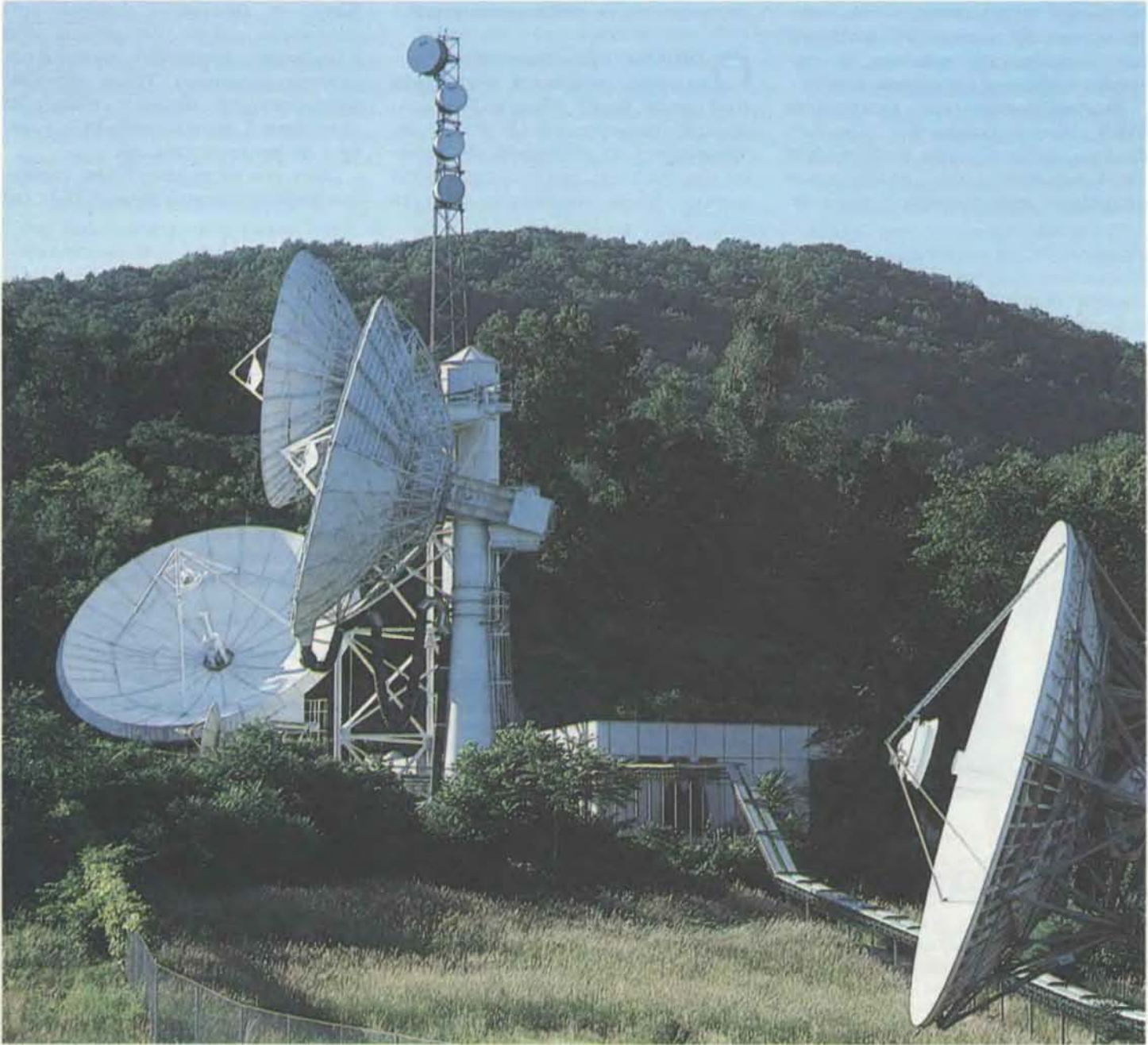
ПРОБЛЕМУ биологического влияния МКВ-излучения следует рассматривать с учетом опыта, накопленного в процессе работы с низкокачественными электрическими полями, использовавшимися в практической деятельности до того, как появилась МКВ-техника. Микроволновые излучения составляют часть спектра элек-

* Термином микроволны (МКВ) в США обозначают диапазон частот от 300 МГц до 3000 ГГц. Согласно классификации электромагнитных излучений (ЭМИ) по диапазонам частот, предусмотренной номенклатурой международного регламента радиосвязи (МККР, Женева, 1979) указанный диапазон дополнительно подразделяется на 4 поддиапазона: ультравысокие — УВЧ (300 МГц — 3 ГГц), сверхвысокие — СВЧ (3 — 30 ГГц), крайне высокие — КВЧ (30 — 300 ГГц) и гипервысокие частоты — ГВЧ (300 — 3000 ГГц). — Прим. перев.

ромагнитных колебаний и лежат в диапазоне от 300 МГц до 300 ГГц, т. е. являются волнами с частотой от 300 млн. герц до 300 млрд. герц. Эти частоты выше и соответствующие им длины волн короче, чем частоты стандартных радио- и телевизионных сигналов. За диапазоном МКВ (в сторону увеличения частоты) лежат инфракрасное излучение, видимая область оптического излучения и «ионизирующее» излучение, к которому относятся ультрафиолетовое, рентгеновское и гамма-излучение.

Необходимо отметить, что по своему биологическому действию ионизирующее излучение качественно отличается от МКВ-излучения. Когда фотон (квант электромагнитного излучения) проходит через вещество, он разрывает химические связи (даже в отсутствие какого-либо заметного нагрева) и в результате нейтральные молекулы становятся заряженными. Такая ионизация приводит к повреждению тканей организма. В то же время энергия фотона излучения, соответствующая частоте 1 ГГц, состав-

ляет лишь 1/6000 от той кинетической энергии, которую имеют молекулы в тканях живого организма при обычном тепловом движении, т. е. она значительно меньше, чем энергия, необходимая для разрушения самых слабых химических связей. Это, конечно, не исключает возможности того, что МКВ-излучение низкой интенсивности непосредственно изменяет молекулы живой ткани. Однако механизм развития такого рода эффектов продолжает оставаться до настоящего времени нераскрытым.



ПАРАБОЛИЧЕСКИЕ АНТЕННЫ на станции связи в Верноне (шт. Нью-Йорк) используются для передачи сигналов на спутники (*большие рефлекторы*) и для ретрансляции к наземным приемникам (*малые рефлекторы*). Сигналы передаются с различными целями, в том числе для спутникового телевидения. Передачи в МКВ-диапазоне с помощью этих и многих других антенн из центра спутниковой связи

в Верноне приводят к облучению людей. Уровень облучения значительно ниже допустимых норм, установленных в данном штате. Вернон — одно из населенных мест в США, где жители выражали протест против размещения генераторов МКВ-энергии, ссылаясь на то, что облучение даже низкими уровнями МКВ может представлять опасность для здоровья.

Еще до того, как во время второй мировой войны радиолокационная техника получила широкое распространение и оказала существенное влияние на ход военных действий, электромагнитные излучения более низких частот на протяжении многих лет применялись в лечебной практике. Несмотря на то что эффективность такого вида терапии была вполне очевидной, все же существовала потенциальная опасность развития ожога и некоторых других неблагоприятных эффектов в случае воздействия на ткань чрезвычайно высоких интенсивностей. Среди ученых велись активные споры относительно того, оказывает ли высокочастотная электромагнитная энергия неблагоприятное биологическое действие, не связанное с обычным нагревом тканей.

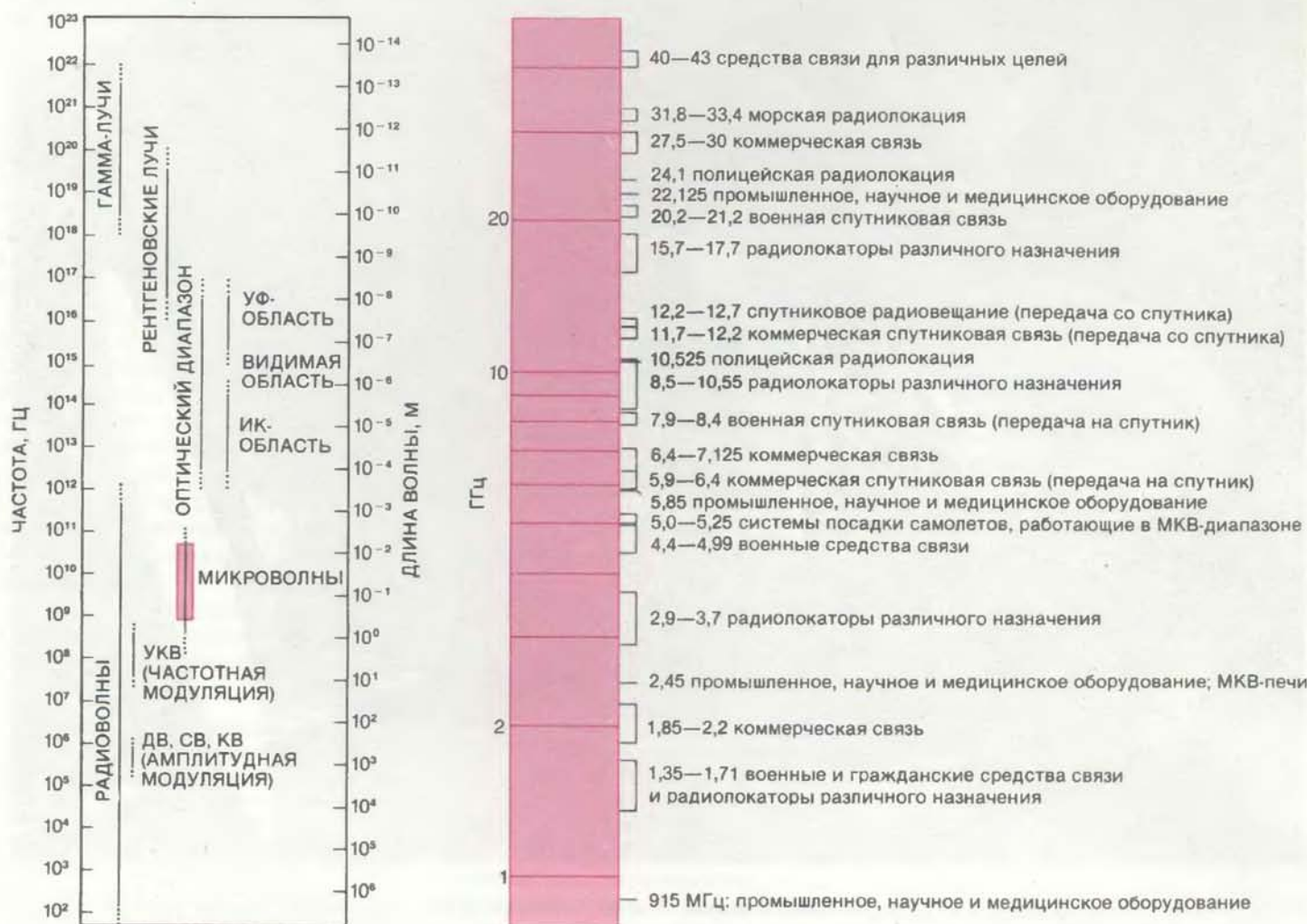
В первое послевоенное десятилетие МКВ-техника развивалась довольно быстро, в связи с чем значительная часть населения стала подвергаться облучению этой специфической энер-

гией. Хотя к тому времени было сообщено лишь о нескольких случаях поражения МКВ-излучением, возможность увеличения таких случаев стала внушать опасение. Из-за расширения масштабов использования радиолокационных станций относительно высокой мощности военные ведомства США с начала 50-х годов приступили к изучению МКВ-полей в рамках специальных целевых программ, которые действуют и поныне, но уже с более широкой постановкой задач, чем это было вначале. Тогда же, в 50-е годы многие исследователи и правительственные органы начали разрабатывать правила техники безопасности при работе с МКВ-аппаратурой.

Одним из представителей ученого мира, взявшихся за решение этой задачи, был Г. Шван из Пенсильванского университета. В 1953 г. он, основываясь на теоретических оценках нагрева ткани при поглощении ею энергии МКВ, предложил считать

предельно допустимой для человека плотность потока мощности МКВ-излучения, равной 100 Вт/м^2 . Расчеты Швана показали, что облучение тела человека МКВ такой интенсивности должно привести к повышению температуры облучаемого участка на 1° или меньше и вызвать тем самым нагрев тела, сопоставимый с тем, который может иметь место при протекании в организме естественных физиологических процессов. Указанный предельно допустимый уровень облучения МКВ примерно соответствует $1/10$ уровня радиации яркого солнечного света и $1/50$ уровня радиации диатермических устройств. По оценке Швана, в некоторых условиях при плотности потока мощности 1000 Вт/м^2 может произойти тепловое поражение организма. Таким образом, предложенный Шваном предельно допустимый уровень выбран примерно с 10-кратным запасом.

Свои рекомендации Шван адресовал военно-морским силам США, где



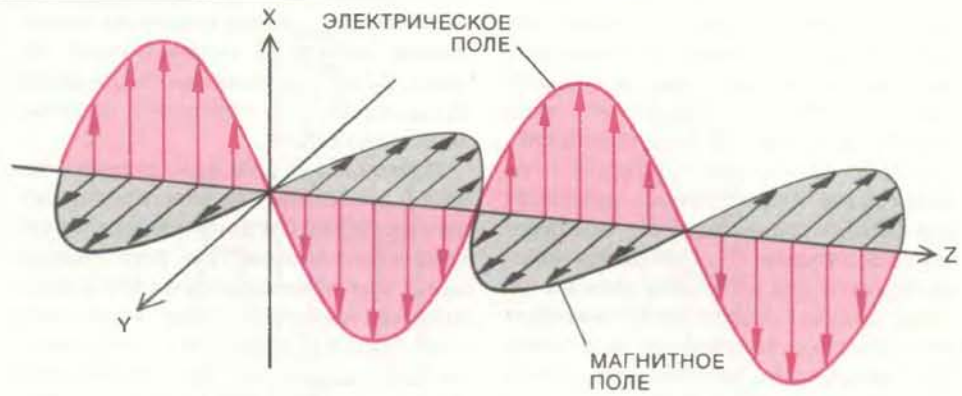
МИКРОВОЛНЫ в спектре электромагнитного излучения (слева) охватывают диапазон частот от 300 млн. до 300 млрд. герц. МКВ используются для многих целей; в правой части рисунка перечислены лишь некоторые из них. Радиолокаторы военного и гражданского назначения и средства

связи работают на частотах от 0,1 до 40 ГГц (миллиардов герц). Промышленное, научное и медицинское оборудование работает на различных частотах, но чаще всего на частоте 0,915 ГГц (915 МГц) и 2,45 ГГц.

проблема безопасности при работе с МКВ-оборудованием очень важна. Институт стандартов США, ныне называемый Американским национальным институтом стандартов (АНИС), включил предложенные Шваном нормы в официальные стандарты. АНИС — организация, занимающаяся разработкой рекомендаций по охране труда при работе с различными видами техники во всех отраслях промышленности. В АНИС были проанализированы научные публикации и, так как в них не нашлось убедительных свидетельств поражения животных, подвергшихся облучению МКВ при плотности потока мощности до 100 Вт/м^2 , в 1966 г. эту величину приняли в качестве стандарта США. Вскоре многие западные страны ввели у себя примерно такие же стандартные нормы, и разработанное в АНИС «Руководство по технике безопасности» («ANSI Standard C95.1») стало наиболее распространенным в США стандартом по профессиональному облучению МКВ и облучению населения.

Первоначальный стандарт АНИС, распространявшийся на частоты от 10 МГц до 100 ГГц, многие годы оставался в основном неизменным. Но в 1982 г., когда подошел срок его очередного пересмотра, было предложено внести в него некоторые изменения. К тому времени вопрос о безопасности МКВ-излучения низкой интенсивности (недостаточной для того, чтобы вызвать заметное повышение температуры тела) стал предметом обсуждения у населения, а также в политических и научных кругах.

Усиление внимания к данной проблеме со стороны общественности объяснялось рядом причин. В период с 40-х по 70-е годы было выполнено большое число исследований по изучению биологического действия МКВ. Большинство опубликованных данных, свидетельствующих о заметном биологическом влиянии МКВ, относились к случаям, когда плотность потока мощности превышала 100 Вт/м^2 . Но наряду с этим появилось небольшое число сообщений, в которых обращалось внимание на возможность развития неблагоприятных эффектов при уровнях воздействия значительно меньших, чем были предусмотрены в стандарте АНИС. Например, в 1968 г. появилось сообщение о том, что импульсное МКВ-излучение с плотностью мощности менее $1/10\,000$ предельно допустимого уровня, предусмотренного стандартом АНИС, может вызвать изменение частоты сокращений изолированного сердца лягушки, а иногда приводить и к полной остановке серд-



ВЗАИМООТНОШЕНИЕ электрической и магнитной составляющих электромагнитных волн. Векторы электрического и магнитного полей взаимно перпендикулярны. Они перпендикулярны также направлению распространения волны. Когда излучение распространяется по оси z, электрическое поле (цветное) параллельно оси x, а магнитное поле параллельно оси y.

ца. Другими исследователями эти данные подтверждены не были. Ходили слухи, что в Советском Союзе уже много лет облучают МКВ низкого уровня здание американского посольства в Москве. Эти сообщения носили спекулятивный характер и необоснованно сопровождалась рассуждениями о неблагоприятном влиянии этого вида излучения на здоровье людей. Кстати, в Советском Союзе и

странах Варшавского Договора предельно допустимый уровень МКВ-излучения для населения в 100-1000 раз меньше, чем уровень, принятый в любом американском стандарте.

Основная причина, побудившая АНИС пересмотреть стандарт C95.1, заключалась в том, что благодаря более совершенным методам дозиметрии, позволяющим точнее измерять количества поглощенной электромаг-



РАЗБОРНЫЙ ФАНТОМ — метод оценки пространственного распределения поглощенной мощности, впервые был предложен в 1968 г. Гаем (одним из авторов статьи). Идея способа заключается в измерении повышения температуры в фантомах (моделях) человека или животных, вызванного поглощением МКВ-энергии. Изменение температуры позволяет установить характер распределения, глубину проникновения и количество энергии, которая при данных условиях была бы поглощена живым организмом. Модель человека или животного отливается в форме, образованной из двух кусков пенополистирола. Внутри формы вырезаются полости по форме тела моделируемого животного или человека. Затем форма заполняется гелем, электрические свойства которого близки к электрическим свойствам живой ткани. Модель быстро облучают (слева), после чего ее быстро вынимают из формы и фотографируют с помощью инфракрасной камеры. Справа — фотография, на которой зафиксирована картина поглощения энергии одной из таких моделей. Из практических соображений размер модели обычно делается меньше естественных размеров моделируемого объекта. Картина сопоставима с той, которая наблюдалась реально при облучении человека весом 70 кг и ростом 1,74 м волнами частотой 70 МГц (частота, на которой поглощение максимально). Светлые участки соответствуют относительно высокой степени поглощения.

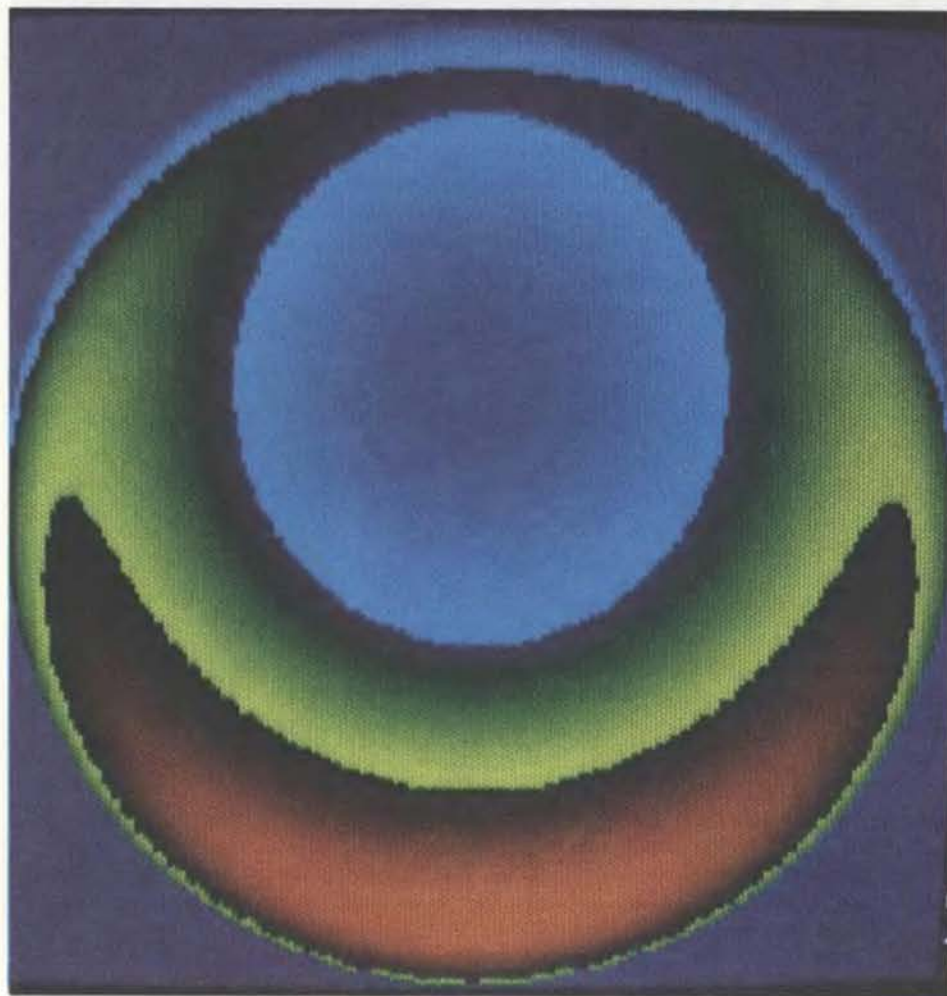
нитной энергии, были получены новые данные. Величина поглощенной энергии животным или человеком сложным образом зависит от таких показателей, как частота колебаний, размеры облучаемого объекта, его ориентация относительно направления распространения волн, тип передающей антенны. Будучи облученными одним и тем же полем, крыса и человек получают далеко не одинаковые дозы энергии на единицу веса тела. Эта зависимость уже давно получила всеобщее признание, однако до конца 60-х годов лишь немногим исследователям удавалось произвести соответствующие замеры количества энергии, поглощаемой подопытными объектами. В 60-х годах инженеры предприняли работы, которые позво-

лили глубже понять механизм поглощения энергии и одновременно создать более совершенные технические средства для измерения доз, получаемых животными.

В нескольких методах, разработанных в последние два десятилетия, дозы облучения рассчитываются по повышению температуры, регистрируемому при облучении моделей животных или человека. Один из авторов этой статьи (Гай) в 1968 г. предложил метод, названный им «разборный фантом». Оболочка, воспроизводящая тело животного, заполняется застываемой пластической массой, которая затем пропитывается гелем, имеющим примерно такие же электрические свойства, как и живая ткань. В течение короткого времени модель

облучают. Затем ее разбирают и составные части фотографируют с помощью тепловизора. Величину поглощенной энергии можно рассчитать также путем моделирования на ЭВМ. Например, животное или облучаемый человек представляется в виде эллипсоида или цилиндра. Изучались также более точные математические модели, использующие дробление фигур исследуемых объектов на блоки.

Данные, накопленные к 1982 г. в результате применения всех этих новых методов, свидетельствовали, что количество поглощенной энергии существенно зависит от частоты излучения и размеров тела. В неблагоприятных обстоятельствах поглощение человеком электромагнитной энергии на частотах от 70 до 100 МГц может быть в 10 раз больше, чем на более высоких частотах, если он определенным образом ориентирован по отношению к направлению распространения волн. Электромагнитные волны — это колебания электрического и магнитного полей, векторы которых перпендикулярны друг к другу и к направлению распространения волн (см. рисунок сверху на с. 7). Поглощение электромагнитной энергии максимально в том случае, когда тело человека ориентировано так, что его продольная (вертикальная) ось параллельна вектору электрического поля, а фронтальная плоскость перпендикулярна вектору магнитного поля. Тело человека может рассматриваться как хорошая антенна для электромагнитных колебаний с частотой 70 — 100 МГц; принято говорить, что на этих частотах оно «резонирует» с полем.



МОДЕЛЬ В ВИДЕ СФЕРЫ, построенная с помощью ЭВМ и используемая для изучения поглощения энергии тканями. Такая модель особенно полезна для определения характера изменения поглощения при изменении частоты облучающего поля. Принимается, что сфера, которая может быть моделью человека или части его тела, имеет такую же электро- и теплопроводность, что и ткань человека. На ЭВМ подсчитывается количество поглощенной энергии; различные цвета соответствуют различным степеням повышения температуры. Когда сфера радиусом 10 см облучается волнами частотой 100 МГц, фронтальная плоскость поглощает наибольшую дозу (красный цвет); область, расположенная за этой поверхностью, поглощает умеренное количество (зеленый), а в центре сферы поглощение очень малое (синий). При мощности излучения 10 Вт/м^2 максимальное повышение температуры в сфере ничтожно мало — $0,003^\circ\text{C}$. Изображение получено Х. Критикосом из Пенсильванского университета.

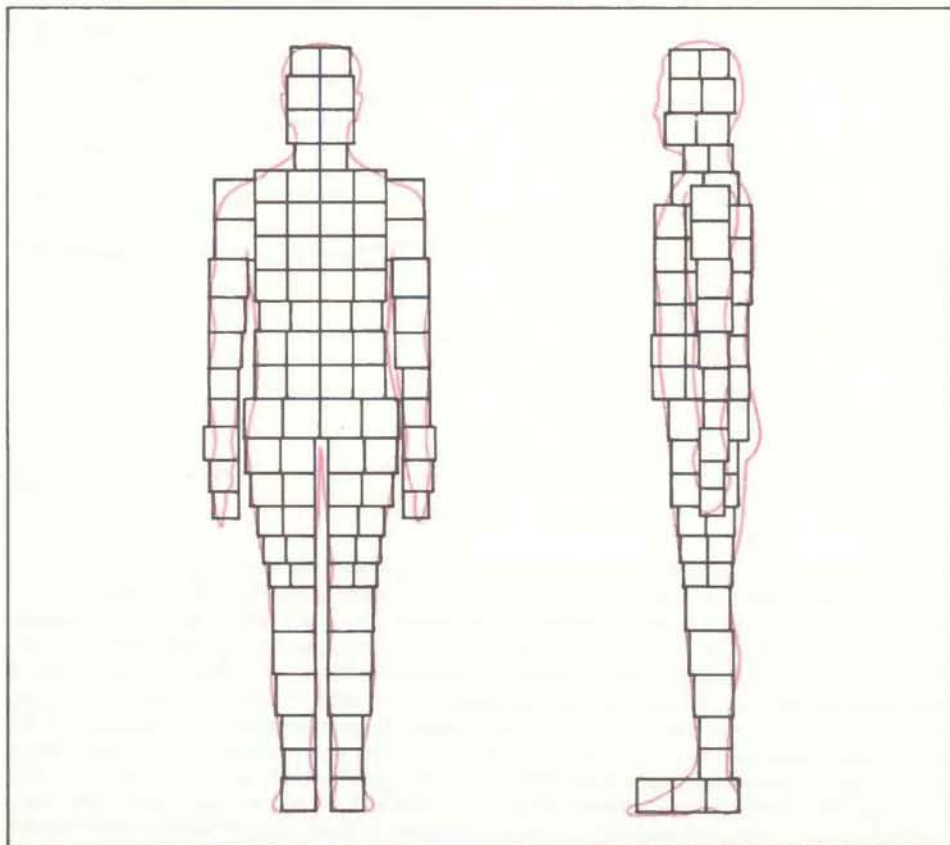
ЧТОБЫ учесть эффект резонанса, комитет АНИС, пересматривая в 1982 г. стандарт, принял решение установить предельную величину плотности потока энергии в зависимости от частоты. При этом целью было ограничить количество поглощенной телом энергии определенной величиной. В то время как старый вариант стандарта учитывал только интенсивность энергии, падающей на тело, в новой его редакции ограничивался уровень среднего значения поглощенной мощности для всего тела до $0,4 \text{ Вт на } 1 \text{ кг веса}$. (При облучении отдельных частей тела допустимой может считаться несколько большая величина.) В состоянии покоя организм человека обычно выделяет вдвое большее количество тепла, а при умеренной физической нагрузке — гораздо больше. По сравнению с предыдущим вариантом стандарта в его редакции 1982 г. были предусмотрены значительно меньшие значения плотности энергии и более широкий диапа-

зон частот — от 300 кГц до 100 ГГц (см. нижний рисунок на с. 10). Уровень падающей энергии был рассчитан путем усреднения ее величины за 6-минутные интервалы; таким образом, стандарт допускал кратковременное облучение при более высоких уровнях энергии.

АНИС одобрил стандарт 1982 г. только после тщательного изучения данных, имеющихся в научной литературе; они подтверждали, что при облучении МКВ никакой серьезной опасности для здоровья животных нет, если интенсивность поглощенной энергии не превышает 0,4 Вт/кг. Комитет пришел к заключению, что опасность появляется начиная примерно с 4 Вт/кг; другими словами, в стандарт была заложена интенсивность, которая в 10 раз меньше уровня вероятной опасности. По мнению комитета, предусмотренная стандартом допустимая доза исключает возможность тепловых ударов и ожогов. При этой дозе, как предполагалось, исключались также другие известные из литературы нежелательные последствия, о которых имелись надежные данные (речь идет, в частности, о серьезных отклонениях в поведении животных при поглощении энергии в дозах от 4 до 8 Вт/кг).

При разработке стандарта не делалось попытки избежать всех известных последствий облучения, поскольку многие из приведенных в литературе данных были и остаются сомнительными. Результаты ряда исследований однозначно показывают, что облучение большими дозами МКВ-энергии опасно для здоровья. У животных оно вызывает тепловой удар. В других исследованиях, в которых величина поглощенной мощности сопоставима с теплопродукцией самого организма, наблюдались изменения, которые отчасти можно считать нормальной физиологической реакцией организма на нагревание, хотя данные, на основании которых делается такой вывод, во многих случаях представляются менее надежными. В литературе имеются сообщения и о воздействии совсем малых доз, но в них убедительных объяснений сделанных авторами выводов не дается.

Следует отметить, что достоверность всех проанализированных результатов далеко не одинакова. Одни работы по изучению влияния МКВ-энергии на животных не вызывают сомнений в строгости научного подхода, тогда как в других обнаруживаются явные технические просчеты (в частности, в ряде экспериментов точность измерений была невысока), а некоторые были изложены настолько кратко, что не позволяли судить об их



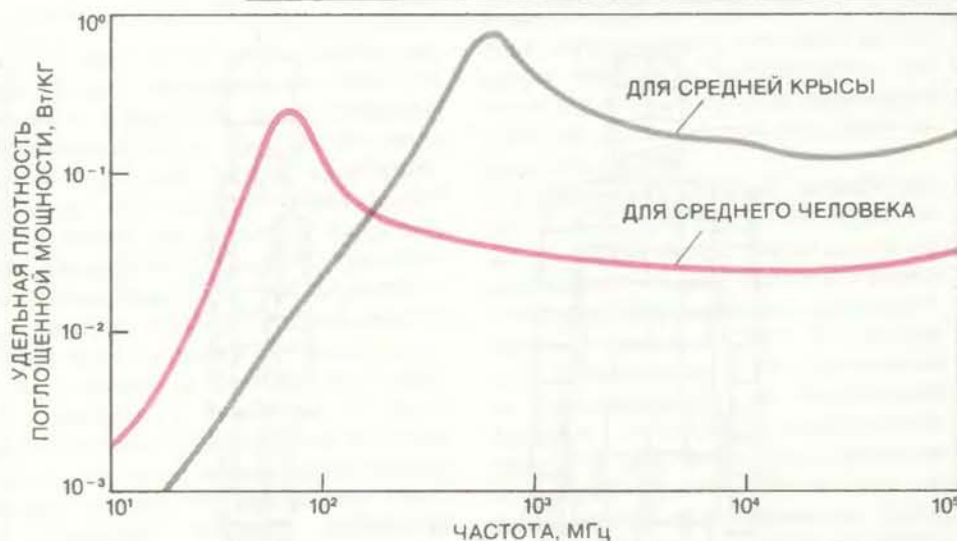
ДРОБЛЕНИЕ НА БЛОКИ — наиболее сложный вид из всех математических моделей, используемых для расчета количества поглощенной энергии. Координаты каждого блока закладываются в ЭВМ. Затем на основе заранее известных электрических свойств тканей, частоты излучения и других параметров ЭВМ производит расчет величины поглощения, выражаемой в Вт/кг, когда субъект облучается полем, плотность потока мощности которого составляет 10 Вт/м². Другие теоретические модели (не показанные здесь) включают эллипсоиды, которые, согласно заданным условиям, заполняются однородным материалом, представляющим собой имитацию тканей человеческого тела и эллипсоиды сложного строения, содержащие отдельные слои, которые имитируют жировую и мышечную ткани. Результаты таких теоретических подходов хорошо согласуются между собой и с экспериментальными данными, полученными на моделях.

уровне. В литературе описаны сотни биологических эффектов МКВ-излучения, но многие явления, подобно улылке «чеширского кота», наблюдались лишь однажды и в последующих работах не упоминаются.

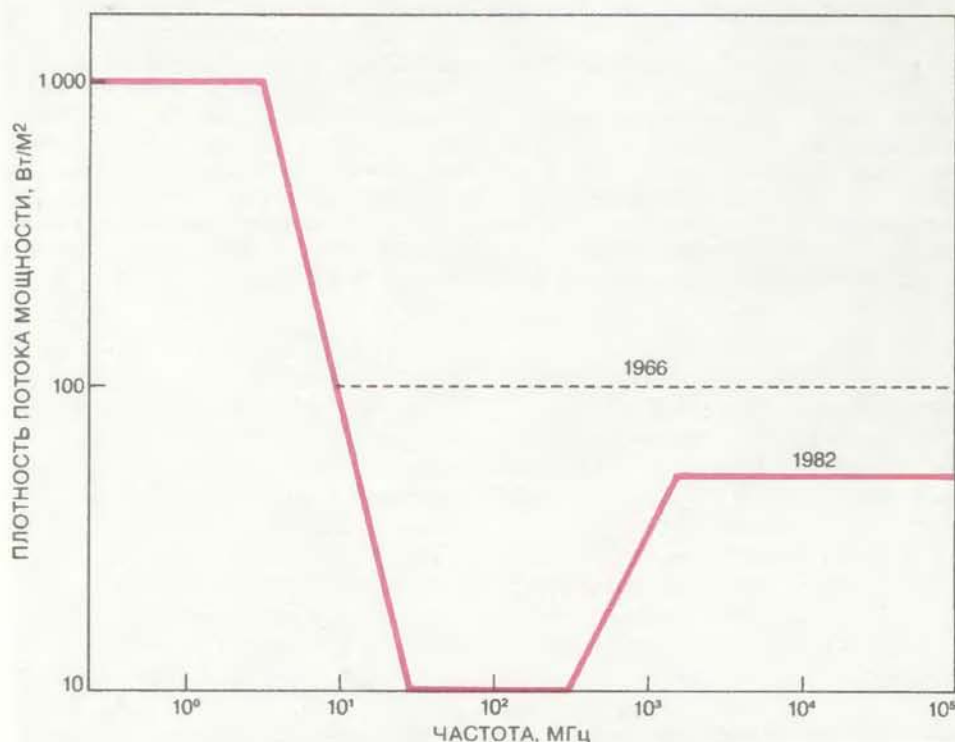
Частично такое разнообразие объясняется самой природой научных исследований. Вывод о наличии того или иного «эффекта» делается на основании обнаруженного различия между контрольной группой людей или животных и группой, подвергнутой воздействию МКВ. Вполне возможно, что наблюдаемое явление могло явиться результатом некоего особого биологического воздействия МКВ-излучения. Но оно могло быть и следствием обычной физиологической реакции на повышение температуры тела. Не исключаются и такие причины, как разброс статистических данных, или даже недостаточно строгий контроль за каким-либо параметром во время эксперимента.

ЧТОБЫ продемонстрировать, с какой легкостью можно по-разному интерпретировать экспериментальные данные, и сделать соответственно разные выводы, мы выбрали три примера из числа опубликованных работ. Во всех трех исследованиях результаты получены в экспериментах при воздействии МКВ в пределах допустимых уровней, предусмотренных стандартом АНИС и действовавших до 1982 г. И все они сыграли некоторую роль в формировании общественного мнения относительно возможной опасности облучения МКВ низких интенсивностей.

В одной из работ изучалось влияние МКВ-излучения низкой интенсивности на функции головного мозга. В 1975 г. две исследовательские группы в США сообщили, что облучение МКВ мощностью от 1/3 до 1/5 предусмотренной стандартом нормы может ускорить переход определенных веществ из крови в мозг. Хотя значе-



РАЗЛИЧИЕ В ПОГЛОЩЕНИИ ЭНЕРГИИ МКВ человеком и крысой на разных частотах. Сравнение производится на эллипсоидных моделях. Максимальное поглощение у человека наблюдается на частотах около 70 МГц, у крыс — примерно на частоте 1000 МГц. Различие в величинах удельной поглощенной мощности (УПН; в западной литературе принят показатель SAR. — Перев.) объясняется неодинаковой способностью тела животного и человека резонировать как антенна. Это различие вместе с особенностями физиологической реакции на повышение температуры тела являются основным источником неопределенности, с которой сталкиваются исследователи при установлении порога вредного действия МКВ для человека, когда они пытаются перенести результаты экспериментов с животными на человека. Кривые показывают изменение поглощения при облучении волнами, направленными на тело под углом, при котором имеет место максимальное поглощение МКВ-энергии.



СТАНДАРТ, получивший наибольшее распространение. Он предусматривает максимально допустимые уровни облучения микроволнами населения и профессиональных работников. Стандарт был введен в действие в 1966 г. Американским национальным институтом стандартов (АНИС). В 1982 г. стандарт был пересмотрен. Первый вариант стандарта допускал максимальное значение плотности потока мощности 100 Вт/м^2 для частот от 10 МГц до 100 ГГц. Этот предельно допустимый уровень был изменен в 1982 г., после того как было установлено, что поглощение телом человека МКВ-энергии на различных частотах неодинаково. В новой редакции стандарта допустимые значения плотности мощности установлены в зависимости от частоты. Максимально допустимые значения снижаются для частот, близких к 100 МГц. Цель стандарта — ограничить величину поглощенной мощности до $0,4 \text{ Вт/кг}$ (с учетом усреднения). Если облучается только часть тела, то допустимой считается и более высокая норма.

ние такого явления для человеческого организма оценить трудно, любой подобный эффект можно истолковать как нарушение связи кровотока с деятельностью мозга, а значит, он потенциально опасен. Как и следовало ожидать, это сообщение обострило дебаты по поводу обеспечения безопасности от МКВ-излучения. В течение следующих 10 лет не меньше десятка исследовательских лабораторий занимались изучением воздействия МКВ на мозг. Исследования становились все более глубокими и строгими, и в конце концов вывод «первооткрывателей» был опровергнут. (Большинство исследователей, однако, согласны в том, что облучение МКВ такой мощности, при которой значительно повышается температура мозга, вызывает существенные изменения в гематоэнцефалическом барьере.)

Другой случай связан с изучением так называемого «радиоволнового слуха» — явления, известного с 1947 г. Очень часто, когда МКВ-импульсы действуют на голову, человек слышит «щелчки» в такт с импульсами; причем у него создается впечатление, что щелчки раздаются внутри головы. Это явление имеет место, если плотность потока мощности импульсного излучения достаточно высока (порядка $10 - 500 \text{ кВт/м}^2$); длительность импульсов может быть даже небольшой (несколько микросекунд), так что суммарное поглощение энергии, усредненное по времени, получается гораздо ниже максимально допустимого уровня.

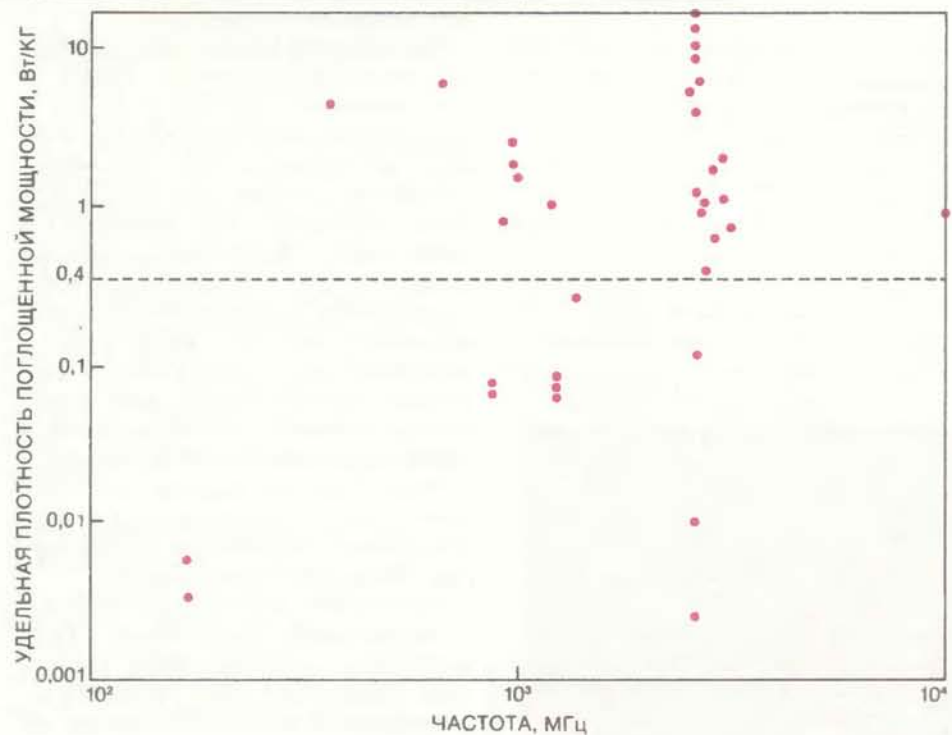
Результаты одного из ранних исследований этого эффекта дали основание предполагать, что самой чувствительной областью, с которой связано возникновение ощущения щелчков, является центральная часть мозга. Вызывала тревогу возможность того, что импульсное МКВ-излучение оказывает прямое воздействие на мозг. В 1974 г. один из авторов статьи (Фостер) высказал предположение, что щелчки — следствие неопасного для здоровья физического явления, которое возникает при облучении головы. Гипотетический механизм довольно прост: под действием малых, но резко поступающих доз тепловой энергии происходит тепловое расширение тканей (несколько миллионных долей градуса на каждый импульс), оно и порождает звуковые волны, которые человек воспринимает как щелчки. Несложные расчеты и эксперименты на моделях (сосудах, наполненных водой) показали, что звуковые волны, возбуждаемые МКВ-импульсами, должны быть слышны. Опыты с животными подтвердили это. Слуховой

эффект МКВ-излучения в настоящее время не считается указанием на опасность.

ТРЕТИЙ пример — исследования, проводимые одним из авторов (Гаем) совместно с его коллегами в Университете шт. Вашингтон в Сиэтле. Результаты этой работы показывают, как при интерпретации экспериментальных данных могут возникать типичные неоднозначности, которые присущи многим научным публикациям, посвященным биологическому влиянию МКВ-энергии. В течение трех лет изучалось воздействие продолжительного, но низкой интенсивности МКВ-энергии (эта работа финансировалась Школой аэрокосмической медицины ВВС США). Сравнивались 100 подопытных крыс, которых облучали на протяжении почти всей их жизни, с другими 100 крысами, которые не подвергались облучению, но содержались в таких же условиях, как и первые. Излучение, которым воздействовали на экспериментальную группу животных, имело плотность потока мощности в среднем 5 Вт/м^2 и частоту 2,45 ГГц. Крыс облучали ежедневно по 21 ч в течение 25 месяцев. В среднем в зависимости от возраста они получили дозу от 0,2 до 0,4 Вт/кг, что соответствовало допустимому пределу для человека по действовавшему тогда стандарту.

Исследователи регистрировали 155 параметров, характеризующих состояние здоровья и поведение животных, в том числе: химический состав крови, вес тела, ежедневное потребление воды и пищи, количество потребляемого кислорода и выделяемого углекислого газа, а также уровень активности. Результаты свидетельствовали о незначительной разнице в состоянии облучаемых и контрольных крыс, выявленные различия в большинстве случаев либо не имели статистической значимости, либо носили неупорядоченный характер и, по-видимому, были просто случайными. Например, уровень кортизона в плазме крови (который характеризует уровень реакции активации) на первой стадии эксперимента был выше у облученных животных, а на третьей — у контрольных крыс.

Результаты ранее проведенных исследований указывали на то, что воздействие МКВ-энергии может ослаблять иммунную систему организма. Поэтому Гай с коллегами произвели оценку функциональной активности лимфоцитов — основных клеток иммунной системы у облученных и контрольных животных. Через 13 месяцев после начала эксперимента между двумя группами животных обнаружился различия в некоторых (но далеко



ДААННЫЕ О БИОЛОГИЧЕСКОМ ДЕЙСТВИИ МКВ представлены в виде точек в соответствии со значениями УПМ. Они были проанализированы АНИС при пересмотре стандарта в 1982 г. Эффекты, зарегистрированные при УПМ выше 5 Вт/кг , проверялись по результатам нескольких исследований и потому они могут считаться надежными. Для случаев развития эффектов при более низких значениях УПМ достаточной согласованности результатов не наблюдалось. Многие из отмеченных эффектов при более низких уровнях воздействия не считались неблагоприятными. АНИС признал, что данные о вредном влиянии МКВ-излучения можно считать достоверными только в тех случаях, когда УПМ была равно 4 Вт/кг и выше. Поэтому стандартом 1982 г. предельно допустимая доза была принята равной $0,4 \text{ Вт/кг}$ (пунктирная линия), т. е. с коэффициентом запаса, равным 10.

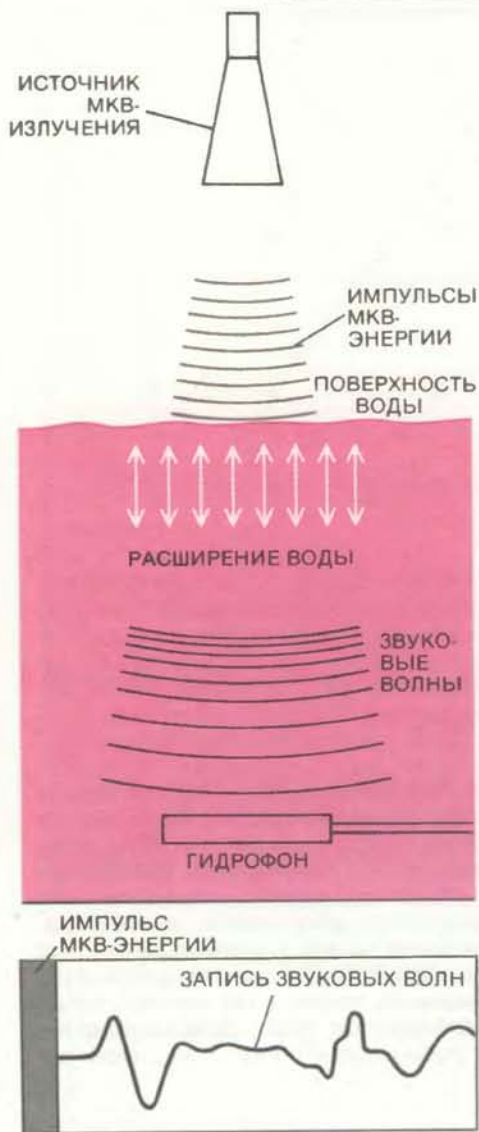
не во всех) иммунологических показателях. По истечению 25 месяцев эти различия не стали более заметными. Средняя продолжительность жизни у облученных животных оказалась несколько большей, чем у животных контрольной группы: соответственно 688 и 663 дня — но эту разницу вполне можно отнести на счет случайности.

Одно различие все же было ярко выражено: среди облученных крыс у 18 развились первичные злокачественные опухоли, а в контрольной группе лишь у 5 животных. Вероятность такой разницы для двух групп по 100 животных с идентичными условиями жизни составляет примерно 0,005, и поэтому данный результат эксперимента является статистически значимым.

Сами по себе результаты эксперимента дают основание полагать, что МКВ-излучение низкой интенсивности может вызывать рак у мышей (предположительно и у людей). В 1984 г. этот факт получил широкую огласку и часто упоминался в публичных выступлениях, когда речь шла об установке нового МКВ-оборудования. Тем не менее были и мнения, предостерегавшие от поспешных вы-

водов. Так, подчеркивалось, что общее число злокачественных опухолей у животных контрольной группы оказалось ниже, чем среднестатистическое для данной линии крыс, а в группе облученных животных число опухолей было близко к ожидаемому. Отсюда следует, что у облученных крыс частота возникновения злокачественных новообразований повышена только по сравнению с контрольной группой; на фоне данных о частоте заболевания раком у крыс данной породы полученные результаты не выделяются.

Приводились и другие доводы, базировавшиеся на соображениях статистического анализа. В целом в группе облученных животных было зарегистрировано так мало злокачественных новообразований, что в статистику пришлось включить все виды опухолей. Никакой тип опухоли не доминировал и ни один не был неожиданным: все типы опухолей, наблюдавшиеся в этом эксперименте, встречались ранее и в других исследованиях. Если бы какой-то специфический вид рака преобладал, то были бы более серьезные основания делать вывод о канцерогенном влиянии МКВ-излуче-



РАДИОАКУСТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ (радиоизвук) наблюдается при облучении головы микроволнами в виде отдельных импульсов. Он проявляется в том, что человек слышит щелчки. Объяснение этого эффекта было дано в 1974 г. Фостером (одним из авторов статьи). По его предположению, при облучении головы эффект импульсного МКВ-воздействия может быть уподоблен явлению, наблюдаемому в сосуде, наполненном водой. Когда вода поглощает энергию импульса МКВ, ее температура хотя и незначительна, но очень быстро поднимается. Происходящее при этом расширение жидкости порождает звуковую волну, которая распространяется и ее можно услышать как щелчки. Этот звук можно зарегистрировать гидрофоном. Тот же эффект, по мнению Фостера, происходит в тканях головы при облучении ее импульсами микроволн. Слышание щелчков — один из не вызывающих сомнения эффектов, которые могут иметь место при облучении МКВ мощностью меньше предельно допустимого стандартом АНИС уровня. Впервые об этом эффекте было сообщено в 1947 г. В настоящее время считается, что он не представляет опасности для здоровья человека.

нии низкой интенсивности.

Частота образования злокачественных опухолей была лишь одним из 155 различных признаков, по которым велось сопоставление в обсуждаемом исследовании. При таком большом числе сравниваемых параметров очень вероятно, что обнаружатся какие-нибудь значительные расхождения, которые на самом деле всего лишь случайны. Различие в количестве раковых опухолей как раз и могло оказаться такой статистической аномалией. Короче говоря, факт повышенной частоты заболевания раком в одной группе животных провоцирует соответствующие выводы, но отражает ли он истинный результат биологического воздействия МКВ-энергии, остается неопределенным.

Чтобы получить надежные данные о связи между облучением МКВ-энергией и возникновением какого-либо одного вида рака, требуется исследование в сотни раз большее по масштабам и затратам, чем эксперимент ученых из Сизтла; а такое исследование крайне трудно осуществить. По нашему мнению, приведенные примеры и анализ других сведений, содержащихся в обширной научной литературе по вопросам биологического влияния МКВ-излучения, позволяют сделать вывод, что, хотя поражающее действие МКВ-излучения возможно и это будет доказано, в настоящее время фактических указаний на такую опасность мало.

ЕСЛИ признать, что проблема биологического действия МКВ-излучения остается неопределенной, то в каком направлении следует развивать исследование и на что нужно опираться при разработке новых стандартов? Начиная с 1980 г. американское правительство финансирует исследования по изучению возможного биологического действия электромагнитных полей, включая те, которые создаются высоковольтными линиями электропередачи и системами, использующими энергию в диапазоне радиочастот; на эти работы отпускается около 10 млн. долл. в год. Полученные к настоящему времени данные в совокупности с результатами предыдущих исследований привели большинство ученых к согласованному мнению о том, что факты относительной опасности МКВ-излучения твердо установлены только в отношении высоких уровней воздействия. Все другие не укладывающиеся в рамки этой концепции выводы весьма противоречивы. В частности, далеко не одинаково оцениваются эффекты, наблюдаемые при облучении животных МКВ-энергией несколько меньшей интенсивности, чем предусмотрено стан-

дартом АНИС. Эти расхождения во взглядах вряд ли приведут к существенным изменениям стандарта допустимых уровней облучения. В то же время споры в кругах общественности часто заостряются на возможной опасности облучения МКВ даже на много меньшей интенсивности и на необходимости введения в стандарты более строгих ограничений.

Улучшение координации будущих исследований должно способствовать более правильной интерпретации научных результатов как учеными, так и общественностью. Многие правительственные и военные организации выделяют средства на изучение биологического влияния МКВ-излучений. Однако эта их деятельность плохо координируется, что привело к раздробленности и разобщенности работ, и многие начавшиеся исследования так и не получили продолжения.

Прежде чем будут предприняты новые исследования, правительство должно признать необходимым финансировать независимое дублирование тех или иных работ, а также продолжение проделанных исследований с целью проверки и оценки новых открытий. Некоторые организации уже идут по этому пути. Так, некоторые военные ведомства сухопутных, воздушных и морских сил выделяют сейчас средства на работы, имеющие целью уточнить некоторые неоднозначно интерпретируемые новые результаты. В то же время нужны какие-то критерии, которые позволяли бы определять, в каких случаях следует прекращать исследование, несмотря на то, что не все вопросы решены до конца.

НО ДАЖЕ при улучшенной координации исследований нельзя будет доказать, что МКВ-энергия не оказывает вредного действия. Это значит, что невозможно гарантировать полную безопасность, какие бы стандарты не принимались. Стандарты — это один из способов компромисса между преимуществами, которые получает человечество от новой техники, и потенциальным риском, связанным с ее использованием. Например, пределы скорости для транспортных средств установлены на таком уровне, что достигается компромисс между опасностью их превышения и желанием людей передвигаться как можно быстрее. Эти ограничения полностью не исключают риск на меньших скоростях, они лишь определяют как допустимые те значения, при которых опасности известны и можно без труда их избежать. Точно так же предельно допустимые уровни облучения МКВ (как и воздействие других факторов окружающей среды)

могут быть установлены только на основе известных поражений, исходя из которых рассчитывается «запас прочности», гарантирующий относительную безопасность. Пример такого подхода — изменение стандарта АНИС в 1982 г. Когда благодаря применению более точных средств дозиметрии было установлено, что на определенных частотах тело человека может поглощать больше энергии, АНИС предусмотрел в стандарте другую, более широкую зону вокруг источника электромагнитного излучения, в пределах которой облучение на этих частотах считается опасным.

В США не существует какого-либо общепринятого порядка разработки стандартов. Отдельные правительственные организации устанавливают свои допустимые нормы, равно как и штаты, округа и неправительственные организации. В различных ситуациях применяются разные нормативные документы, законная сила которых неодинакова. Стандарты бывают обязательными, а могут и допускать отклонения; одни относятся к отдельной группе людей определенной профессии, другие — к населению в целом. В черте города могут действовать нормативы, отличные от принятых в данном округе, в котором в свою очередь имеют силу нормативы, отличающиеся от введенных соответствующим федеральным управлением. Такая неупорядоченность может вынудить пользователей техникой, работающей в диапазоне электромагнитных волн, придерживаться одновременно нескольких стандартов, что затрудняет деятельность различных правительственных органов.

Управление по охране окружающей среды США начало работу, которая, возможно, в конце концов позволит унифицировать стандарт для всей страны. В начале нынешнего года оно опубликовало для обсуждения три варианта проекта нового стандарта: в одном из них предусматриваются примерно такие же допустимые нормы облучения, как и в стандарте АНИС, в другом эти нормативы в 5 раз ниже, а в третьем — в 10 раз ниже рекомендуемых АНИС. Окончательный вариант стандарта, вероятно, будет опубликован примерно через год, но если будет принят какой-нибудь из этих вариантов, то, по видимому, придется принять дополнительные меры, чтобы стандартные нормы для населения вошли в силу.

Интересно отметить, что в Советском Союзе и в других социалистических странах предельно допустимые уровни МКВ-излучений недавно были изменены в сторону их меньшей жесткости. По словам одного из советских

комментаторов, допустимый уровень облучения составляет 0,4 Вт/кг в течение 1 ч, в то время как в действующем стандарте АНИС предусмотрено 0,4 Вт/кг в течение 6 мин. В СССР применительно к условиям профессиональной деятельности допустимой считается плотность потока мощности 2 Вт/м² при работе на стационарных установках и 20 Вт/м² при работе на передвижных (оба показателя берутся как среднее за 1 ч). Для населения этот показатель ниже — 0,1 Вт/м². Таким образом, советский и американский стандарты сближаются*.

ВВЕДЕНИЕ стандартов — дело исключительно трудное. Некоторые опасные эффекты МКВ-излучения, в том числе ожоги и тепловые удары, хорошо известны и изучены; для предупреждения таких последствий легко можно ввести действенные

* В СССР гигиенические нормативы, регламентирующие предельно допустимые уровни (ПДУ) МКВ-воздействий, дифференцированы для различных континентов лиц: для лиц, профессионально связанных с обслуживанием источников электромагнитных излучений (профессиональное воздействие), для лиц, профессионально не связанных с обслуживанием источников электромагнитных излучений (непрофессиональное облучение) и для населения в целом. Согласно Государственному стандарту СССР «Электромагнитные поля радиочастот» (ГОСТ 12.1.006-84), для лиц, профессионально связанных с обслуживанием источников ЭМИ, в диапазоне частот 300 МГц — 300 ГГц допустимые уровни воздействия регламентируются показателем поверхностной плотности потока энергии (ППЭ) излучения и создаваемой им энергетической нагрузкой (ЭН). Последняя представляет собой суммарный поток энергии, проходящей через единицу облучаемой поверхности за время действия (Т), и выражается произведением ППЭ · Т. Предельно допустимые уровни ППЭ на рабочих местах персонала определяются исходя из допустимой ЭН с учетом времени воздействия. Допустимая величина ЭН за рабочий день для всех случаев облучения, исключая облучение от вращающихся и сканирующих антенн, установлена равной 2 Вт · ч/м² (200 мкВт · ч/см²). Для случаев облучения от вращающихся и сканирующих антенн с частотой вращения или сканирования не более 1 Гц и скважностью не менее 50 оно в 10 раз выше. Во всех случаях максимальное значение ППЭ не должно превышать 10 Вт/м² (1000 мкВт/см²). Для лиц, профессионально не связанных с обслуживанием источников МКВ-излучений, предельно допустимое значение ЭН и ПДУ_{ППЭ} в течение рабочего дня для условий прерывистого облучения соответственно в 2 раза ниже вышеуказанных. Для населения в диапазоне частот 300 МГц — 30 ГГц в качестве ПДУ воздействия установлена ППЭ, равная 0,1 Вт/м² (10 мкВт/см²) без ограничения времени. — *Прим. перев.*

стандарты. Представляет ли облучение МКВ низкой интенсивности какую-либо опасность, можно только строить предположения, которые зависят от того, как интерпретировать многочисленные и часто малодостоверные сообщения. Как быть с этой неопределенностью, когда нужно сопоставить выгоды от технического прогресса и издержки, связанные с предупреждением возможного вредного влияния, — вот одна из ключевых проблем современности. Она возникает в отношении не только МКВ-энергии, но и многих других факторов внешней среды, опасное действие которых только еще начинают изучать.

Издательство МИР предлагает:

И. Чадек

ПОЛЗУЧЕСТЬ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Перевод с чешского

Монография посвящена как феноменологическому описанию явления ползучести, так и обсуждению физических механизмов пластической деформации, особенно при высоких температурах. Разделы, содержащие описание формирования дислокационной структуры при ползучести, предшествуют разделам, посвященным обсуждению теорий высокотемпературной ползучести.

Автор книги — член корреспондент АН ЧССР, известный специалист в области изучения ползучести и ее физической природы. Материал, представленный в книге, имеет большое значение для практического материаловедения, в частности, для высокотемпературного материаловедения, особенно интенсивно развиваемого в последнее время.

Для специалистов в области физики прочности и пластичности, а также для инженеров-материаловедов, студентов вузов и аспирантов.

1987, 16 л. Цена 1 р. 30 к.



Химию прогнозирует ТОПОЛОГИЯ

*Методы, основанные на анализе
топологии молекул — преобразовании их пространственных форм
в плоские геометрические узоры, образованные связанными
между собой атомами, — позволяют предсказывать
многие свойства химических соединений*

ДЕННИС Г. РУВРЭ

К НАСТОЯЩЕМУ времени химики синтезировали и в той или иной мере описали свойства более семи миллионов соединений. Наука накопила поистине огромный объем фактических данных, из которых современный исследователь может узнать все о любом полученном соединении. Как можно повысить эффективность этого гигантского массива информации? Не пойти ли, например, по пути поиска таких теоретических подходов, которые позволили бы мобилизовать весь арсенал имеющихся сведений об уже известных химических соединениях для предсказания свойств новых, еще не синтезированных веществ.

Уже несколько поколений исследователей размышляли над этим вопросом. В настоящее время появилась реальная возможность такого предсказания на основе нового метода, который пока только делает свои первые, но успешные шаги. В центре этого нового подхода лежит рассмотрение топологии отдельных молекул — тех индивидуальных в каждом конкретном случае узоров, которые создаются системой химических связей между ее атомами и определяют ее первичную молекулярную «архитектуру».

Для анализа на топологическом уровне такие общеизвестные характеристики молекулы, как ее реальная трехмерная форма, природа и длина химических связей, углы между связями и даже вид атомов, не имеют какого-либо значения. На первый план выступают соображения совершенно иного рода, а именно — сколько всего атомов имеется в данной молекуле и как они группируются между собой (сколько из них связано с каждым конкретным из ее атомов), а также каков характер этого связывания — образуют ли они цепи (прямые или с каким-то числом разветвлений), одно или несколько колец (циклов) либо со-

ставляют комбинации из циклов, цепей и разветвлений.

Важнейшим инструментом рассматриваемого подхода к проблеме химического прогнозирования служат так называемые топологические индексы. Их можно вычислить на основе специальных алгоритмов, которые позволяют перевести топологический «образ» данной молекулы на унифицированный цифровой язык. Например, определение индекса может включать суммирование числа колец в молекуле или числа атомов, которые связаны с тремя или большим числом других атомов.

Первым шагом на пути любого основанного на топологии химического прогноза является оценка своего рода избирательности данного индекса для сравнительно небольшого набора хорошо известных молекул. В общем величина данного индекса (вычисленного тем или иным из возможных математических способов) изменяется при переходе от одной молекулы к другой. Второй этап — построение графических диаграмм, когда на одной оси откладываются численные значения подходящих топологических индексов для исследуемых молекул, а на другой — количественные характеристики какого-нибудь химического или физического свойства, например температуры кипения. На таком графике каждая молекула будет представлена одной точкой. Если ряд подобных точек составит определенную зависимость, выраженную той или иной графической линией, то полученный график может служить основой для последующих предсказаний, поскольку он будет отражать найденную закономерность между данными топологическими индексами и химическим свойством. В рассмотренном случае график укажет (путем интерполяции или экстраполяции), какую температуру кипения следует ожи-

дать для какого-то пока не известного вещества, имеющего данный топологический индекс. Таким образом, свойства хорошо известных молекул служат своего рода ориентиром для прогнозирования свойств других, еще не полученных соединений. Успешное применение этого метода зависит от выбора таких топологических индексов, которые наилучшим образом коррелировали бы с изучаемыми химическими свойствами.

Топологические методы находят применение для предсказания не только простых химических свойств. В принципе они позволяют моделировать и контролировать процессы коррозии, разрабатывать новые лекарства (например, анестезирующие и психотропные препараты), прогнозировать степень распространения и потенциальной опасности различного рода загрязнителей в окружающей среде, оценивать канцерогенную активность некоторых химических веществ и даже регулировать вкусовые качества многих пищевых продуктов (в частности, пива). То, что топологические методы уже применяются во всех этих областях, сейчас хорошо известно. Вопрос только в том, когда будут реализованы все их потенциальные возможности.

РАНЕЕ для прогнозирования свойств новых, еще не синтезированных соединений общепринятыми были два основных подхода. Первый из них заключается в конструировании точной молекулярной структуры ожидаемого соединения (для этого необходимо строго задать пространственные координаты всех его атомов) и применении к ней известных правил квантовой механики для вычисления параметров, характеризующих энергию и форму ее электронных облаков, из которых затем можно вывести многие ее свойства.

Однако вся эта процедура чрезвычайно трудоемка и, как правило, требует нескольких часов работы больших ЭВМ. Полученные этим путем результаты сохраняют свою значимость только для одной рассмотренной молекулы и не дают никаких оснований для распространения их на родственные молекулярные системы.

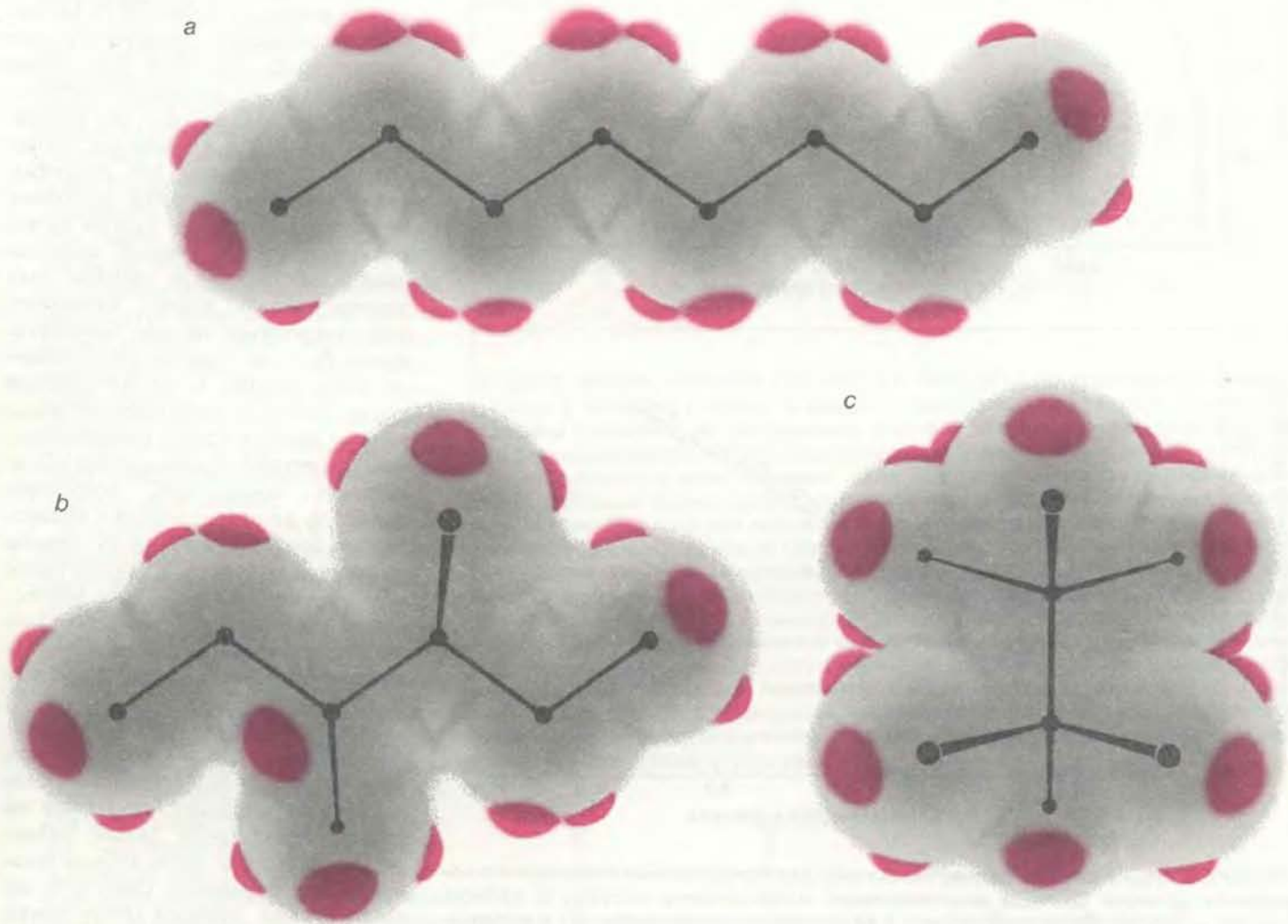
Второй из этих подходов более доступен и основан на определении свойств структурных фрагментов, одинаковых для многих молекул, и их суммировании для каждой конкретной молекулы. Обычно для этого анализируют ряд молекул, родственных исследуемой молекуле.

Цель обоих подходов по сути дела одинакова и сводится к попытке установления взаимосвязи (корреляции) между хорошо определенными свойствами молекул и их структурой, известной менее точно. Новый, топо-

логический метод основан на предположении, что структура молекул может быть точно охарактеризована математически и что математически определенные параметры могут быть скоррелированы с экспериментально найденными свойствами молекул. При этом в предсказаниях химических свойств уже можно не обращаться к сложным физическим моделям (как это делалось ранее); вместо этого теперь открывается возможность, выбрав подходящий математический путь, просто сопоставлять молекулам определенные численные параметры и затем проводить их корреляции с обширным массивом экспериментальных данных по их известным свойствам. Совершенные корреляции такого рода недостижимы, поскольку если выбранный математический параметр может быть точно вычислен, то получение экспериментальных ре-

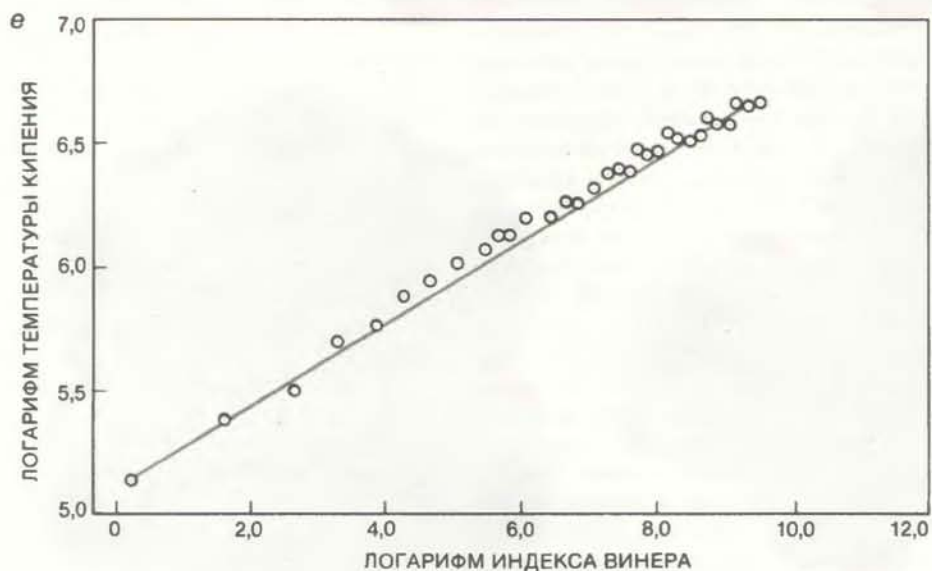
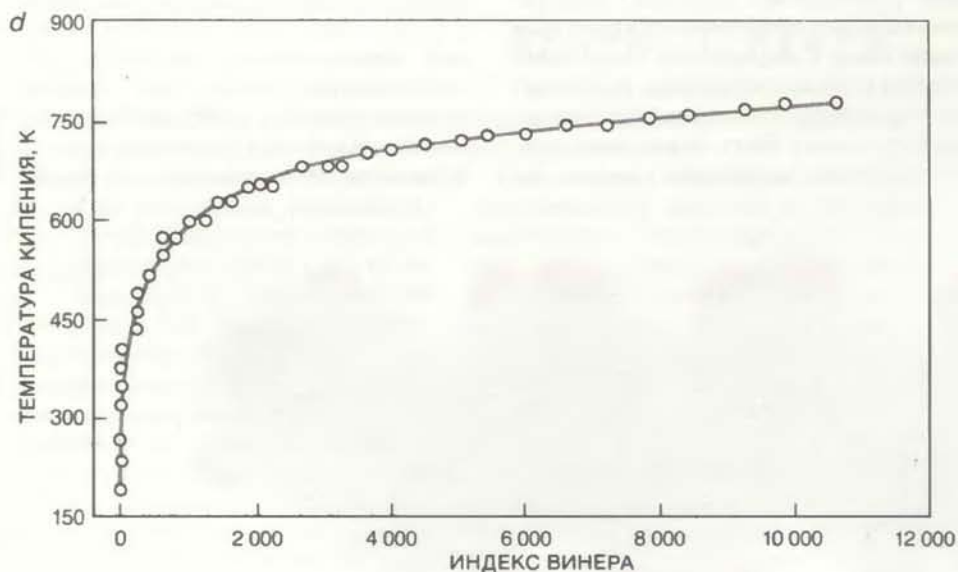
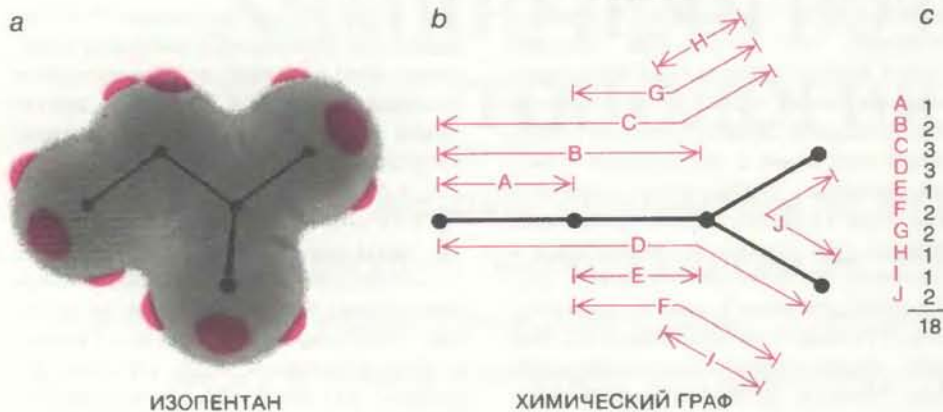
зультатов всегда сопряжено с большими или меньшими ошибками измерения. Тем не менее, если имеющиеся экспериментальные данные достаточно надежны, на их основе можно получить хорошие корреляции.

ТОПОЛОГИЧЕСКИЙ анализ молекулы начинают с построения ее схематического изображения, в котором атомы представлены в виде точек, а соединяющие их связи — в виде отрезков прямых линий. (Атомы водорода, которые обычно не играют большой роли при формировании молекулярной структуры, как правило, принято опускать.) Длина этих линий и углы между ними не имеют значения: первостепенным является само существование связей между теми или иными атомами, а не природа этих связей. (Хотя при этом теряется информация об относительной длине



МОЛЕКУЛЫ УГЛЕВОДОРОДОВ, даже когда они имеют примерно одинаковый объем, могут очень сильно различаться по форме. Топологические методы прогнозирования химического поведения молекул основаны на особой характеристике их структуры — связности атомов. При топологическом анализе не учитываются трехмерная форма молекул и величины углов между химическими связями; значение имеет только то, со сколькими другими атомами связан каждый атом данной молекулы и образуют ли они

между собой линейные цепи, разветвленные структуры или кольца (циклы). Тем не менее топологический анализ позволяет сделать точные предсказания различных свойств и явлений: от температур кипения веществ до прогнозирования вероятности распространения некоторых загрязнителей в окружающей среде. На рисунке изображены молекулы *n*-октана (а), 3,4-диметилгексана (b) и 2,2,3,3-тетраметилбутана (c); все они состоят только из атомов углерода (серые) и водорода (цветные).



ИНДЕКС ВИНЕРА служит в качестве основы для предсказания химического поведения молекул. Сначала анализируемую молекулярную систему (в данном случае — изопентан) (а) изображают в виде «химического графа» (b), в котором атомы углерода обозначают точками (называемыми вершинами), а химические связи между ними — в виде прямолинейных отрезков (называемых ребрами). Индекс Винера для этой молекулы рассчитывают (с) путем суммирования числа тех ребер (связей), вдоль которых надо «пройти», попарно соединяя кратчайшим путем все их вершины (атомы). Индексы Винера коррелируют со многими физическими свойствами. Например, если построить график зависимости температур кипения некоторых известных соединений от их индексов Винера (d), то он будет представлять собой плавную кривую. В логарифмической шкале эта зависимость становится линейной (e). Температуру кипения какого-то соединения, свойства которого еще не известны, можно предсказать, вычислив для его молекулы индекс Винера и найдя соответствующую точку на графике.

связей и их пространственной ориентации в молекуле, на практике это не так важно, как может показаться на первый взгляд.)

Такие схематические изображения называют химическими графами. Графы как форма представления взаимосвязанной системы точек (или в более широком смысле — внутренней структуры объекта) впервые были использованы математиком А. Кейли более 100 лет назад, и сейчас их изучение является предметом специальной математической дисциплины, известной под названием теории графов. В теории графов точки принято называть вершинами, а соединяющие их отрезки — ребрами. Химические графы служат основным инструментом при использовании методов математической теории графов для решения химических проблем.

Когда химический граф данной молекулы построен, для него сравнительно просто вычислить топологический индекс, т. е. получить численное выражение, характеризующее данный граф. Это число для данной молекулы будет величиной постоянной, независимо от того, как изображен ее граф или в какой последовательности помечены его вершины. Такие числа математики называют инвариантами графов. Одним из таких инвариантов, первым привлечшим к себе внимание химиков, был топологический индекс, названный ими углеродным числом; математикам он был уже известен под названием числа вершин. С математической точки зрения он характеризует число вершин данного графа; применительно к молекулам углеводородов (органических соединений, состоящих только из атомов углерода и водорода) он соответствует числу атомов углерода в молекуле. В течение более 100 лет химики основывали некоторые соотношения на углеродном числе, не подозревая, что оно является простейшим топологическим индексом.

Углеродное число служит подходящим индексом для анализа линейных молекул, но для разветвленных молекул оно не подходит, поскольку их форма может очень сильно различаться, даже если число атомов углерода в них одинаково. Одно и то же число атомов углерода могут иметь разные молекулы, поэтому углеродное число считается индексом с низкой избирательностью. Чтобы эффективно отличать разветвленные молекулы от неразветвленных, не говоря уже о том, чтобы сделать выбор между структурами с разной степенью разветвленности, следует искать другие топологические индексы, чувствительные к достаточно тонким

структурным особенностям анализируемых молекул.

ХОТЯ ПЕРВЫЙ топологический индекс, позволяющий характеризовать степень разветвленности молекул, был предложен Г. Винером из Бруклинского колледжа еще в 1947 г., только в последние годы химии сумели по достоинству оценить его большую предсказательную силу. В основе индекса Винера лежит принятое в теории графов понятие расстояния: топологическим расстоянием между любыми двумя вершинами графа называют число его ребер, связывающих эти вершины кратчайшим путем, т. е. число тех ребер, вдоль которых надо «пройти», двигаясь по графу кратчайшим из возможных путей от одной вершины к другой. Для молекулы индекс Винера равен сумме топологических расстояний между всеми парами атомов ее углеродного скелета (см. рисунок на с. 16).

Подобно углеродному числу, индекс Винера данной молекулы обычно увеличивается с ростом числа имеющихся в ней атомов, но он может служить и в качестве критерия для оценки степени разветвленности ее структуры. Например, для молекул, занимающих больший объем, индекс Винера имеет большую величину, чем для более компактных молекул. После введения Винером этого индекса в химическую практику рядом других исследователей было установлено, что для некоторых углеводородов индексы Винера удивительно хорошо коррелируют с такими их свойствами, как температура кипения, вязкость, поверхностное натяжение и показатель преломления.

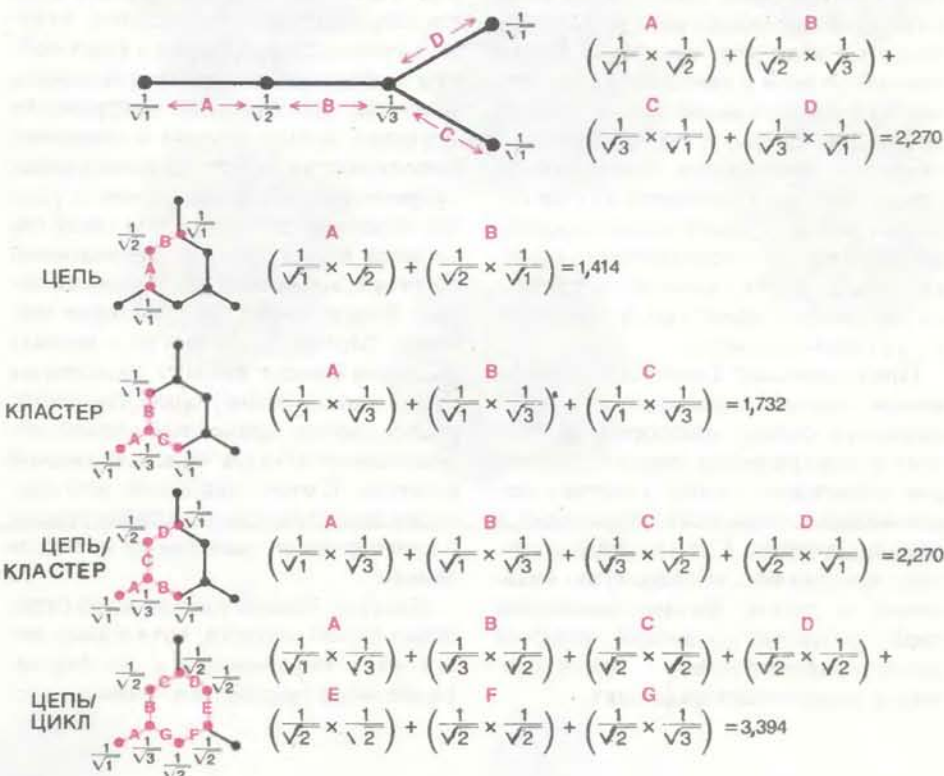
В последние годы было показано, что эти индексы имеют еще более широкие возможности для практического применения. Так, в 1979 г. О. Мекенян и Д. Бончев из Высшего химико-технологического института в Бургасе (НРБ) и Н. Тринайстич из Института им. Босковича в Загребе (СФРЮ) обнаружили, что индексы Винера некоторых сложных молекул, например спиро-соединений (с двумя или несколькими лежащими во взаимно перпендикулярных плоскостях смежными циклами с общей вершиной) или полициклических ароматических углеводородов (состоящих из последовательно сочлененных по ребру нескольких шестичленных колец, лежащих в одной плоскости) очень хорошо коррелируют с энергиями их связывающих электронов.

Этот результат очень важен, поскольку энергетические уровни связывающих электронов молекулы определяют многие ее свойства. Найденная корреляция топологических ин-

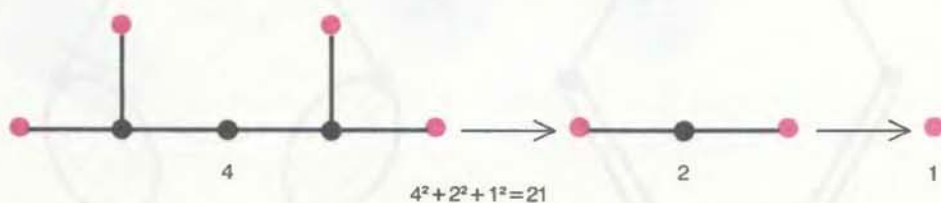
дексов Винера с энергетическими параметрами молекул позволяет прогнозировать такие их свойства, как электропроводность, сродство к электрону (отражающее способность молекулы присоединять электрон или соединяться с другими — электронодонорными молекулами) и длину волны поглощаемого ими света. В даль-

нейшем индексы Винера могут быть использованы для предсказания относительной устойчивости новых химических соединений, пока еще не синтезированных.

Область применений индексов Винера не ограничивается небольшими молекулами; существует возможность их приложения и к таким в



ИНДЕКС МОЛЕКУЛЯРНОЙ СВЯЗНОСТИ РАНДИЧА по сравнению с индексом Винера в большей степени отражает структурные особенности молекул и в меньшей степени — их абсолютные размеры. В этом случае каждая вершина графа характеризуется так называемой «степенью», которая равна числу ребер, сходящихся в этой вершине, а каждое ребро — определенным «параметром», обратным корню квадратному из степеней вершин, связанным этим ребром. Индекс Рандича для любой молекулы представляет собой сумму таких параметров для всех ребер ее графа. В некоторых случаях свойства молекулярных систем могут лучше коррелировать не с индексом связности молекулы как целого, а с особыми индексами связности для составляющих ее структурных фрагментов. Способ вычисления подобных индексов для четырех распространенных типов таких фрагментов показан в нижней части рисунка. По сравнению со всеми другими топологическими индексами индексы связности применяются наиболее широко. Например, они были использованы при разработке новых лекарственных препаратов, моделировании токсичности и вероятности распространения загрязнителей в окружающей среде, а также при прогнозировании вкуса и запаха новых веществ.



ЦЕНТРИЧЕСКИЙ ИНДЕКС БАЛАБАНА предназначен для оценки степени разветвленности молекул. При вычислении этого индекса подсчитывают все вершины, которые связаны только с одной другой вершиной, и удаляют их из молекулярного графа. Эту процедуру повторяют до тех пор, пока не будут учтены все имевшиеся в исходном графе вершины. Числа удаленных таким образом вершин каждый раз возводят в квадрат и последовательно складывают. Итоговая сумма и есть индекс Балабана данной молекулы.

принципе «бесконечным» системам, как высокомолекулярные соединения (молекулы которых содержат последовательно связанные в единую полимерную цепь идентичные звенья мономеров) и кристаллы (трехмерные твердые тела, состоящие из периодически повторяющейся элементарной ячейки). Если индекс Винера вычислять обычным образом, то при переходе к бесконечной полимерной цепи он должен превращаться в бесконечно большую величину, поскольку бесконечно большим в такой молекуле становится число связей, соединяющих ее атомы. Однако в 1980 г. Бончев и Мекенян предложили такой способ модификации этого индекса, при котором он будет давать конечные значения даже для «бесконечных» молекулярных систем, если они построены из множества идентичных конечных структурных единиц.

Предложенный Бончевым и Мекеняном подход позволил получить надежные оценки некоторых физических и электрических свойств полимеров полиенового типа, которые могут использоваться как проводники и полупроводники. С его помощью удалось предсказать температуры плавления и другие физико-химические свойства многих полимеров, включая политетрафторэтилен, поликапримид и полиэтилентерефталат.

Дальнейшее расширение практических применений индекса Винера позволило провести моделирование различных процессов в кристаллах, при которых примесные атомы заполняют междуузлия кристаллической решетки, образованной атомами другого элемента. При этом был решен важный вопрос о том, в какие именно положения попадают примесные атомы. Такие проблемы связаны с контролем за коррозией металлов, а также с процессами катализа и хемосорбции (химического связывания одного вещества на твердой поверхности другого). В этих случаях с помощью топологического метода проверялось теоретическое предположение о том, что в общем данная система тогда находится в состоянии с минимальной энергией, когда соответствующий индекс Винера имеет минимальное значение. Метод заключается в расчете индексов Винера для всех возможных трехмерных конфигураций взаимного расположения примесных атомов относительно атомов кристаллической решетки. В итоге оказалось, что наиболее вероятны как раз конфигурации с наименьшими значениями индексов Винера.

Индексы Винера прежде всего отражают объем молекул, хотя и дают некоторую информацию о их форме. Более «чувствителен» к форме моле-

кул другой топологический индекс, известный в настоящее время под названием индекса молекулярной связности, который был предложен в 1975 г. М. Рандичем, сейчас работающим в Университете Дрэйка. Судя по числу и разнообразию применений, индекс Рандича наиболее удобен из всех предлагавшихся до сих пор топологических индексов.

ПОДОБНО тому как индекс Винера основан на топологической концепции расстояния, в основе индекса Рандича лежит топологическое понятие степени. Степень любой вершины графа равна числу связанных с ней других вершин. Чтобы вычислить индекс Рандича, каждому ребру сопоставляют численный параметр, зависящий от степеней вершин, которые это ребро связывают. Для каждого ребра этот параметр равен величине, обратной корню квадратному из произведения степеней двух вершин. Для молекулы индекс Рандича равен сумме таких параметров для всех ребер ее графа.

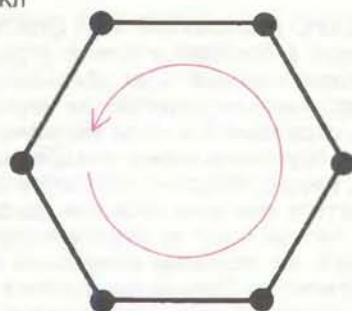
После того как М. Рандич предложил индекс молекулярной связности, было показано, что в некоторых случаях лучшие корреляции можно получить, если рассматривать структурные фрагменты молекул. Например, есть такие свойства, которые лучше коррелируют не с обычным индексом Рандича для всей молекулы, а с суммой индексов Рандича, вычисленных для содержащихся в ней кластеров (групп из трех атомов у одного центрального атома). Поэтому были разработаны индексы связности для тех структурных фрагментов (субструктур), которые особенно влияют на некоторые свойства молекул. Таким образом, существует набор индексов Рандича, применимых в разных случаях.

ИНДЕКСЫ молекулярной связности хорошо коррелируют с такими разными физическими свойствами, как плотность, растворимость в воде и теплота испарения. Были найдены также хорошие корреляции с разнообразными проявлениями биологической активности соединений. Сейчас хорошо известно, что своеобразный запуск очень многих биохимических процессов в живой клетке происходит в результате того, что молекулы особых биостимулирующих веществ приходят в контакт со специфическими рецепторами, расположенными на клеточной оболочке. Для эффективного проявления таких свойств имеет значение не форма этих молекул, а их объем и площадь поверхности. Поэтому соответствующие индексы молекулярной связности, хоро-

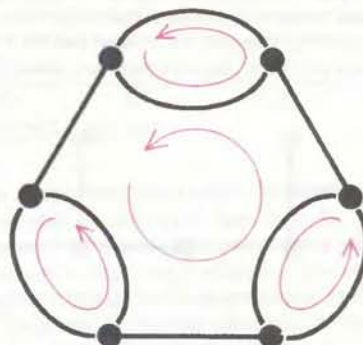
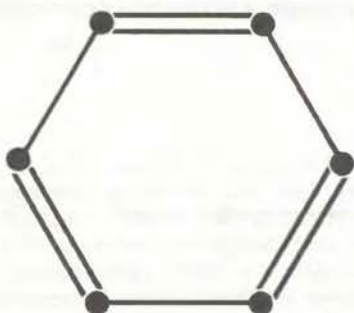
0 ЦИКЛОВ



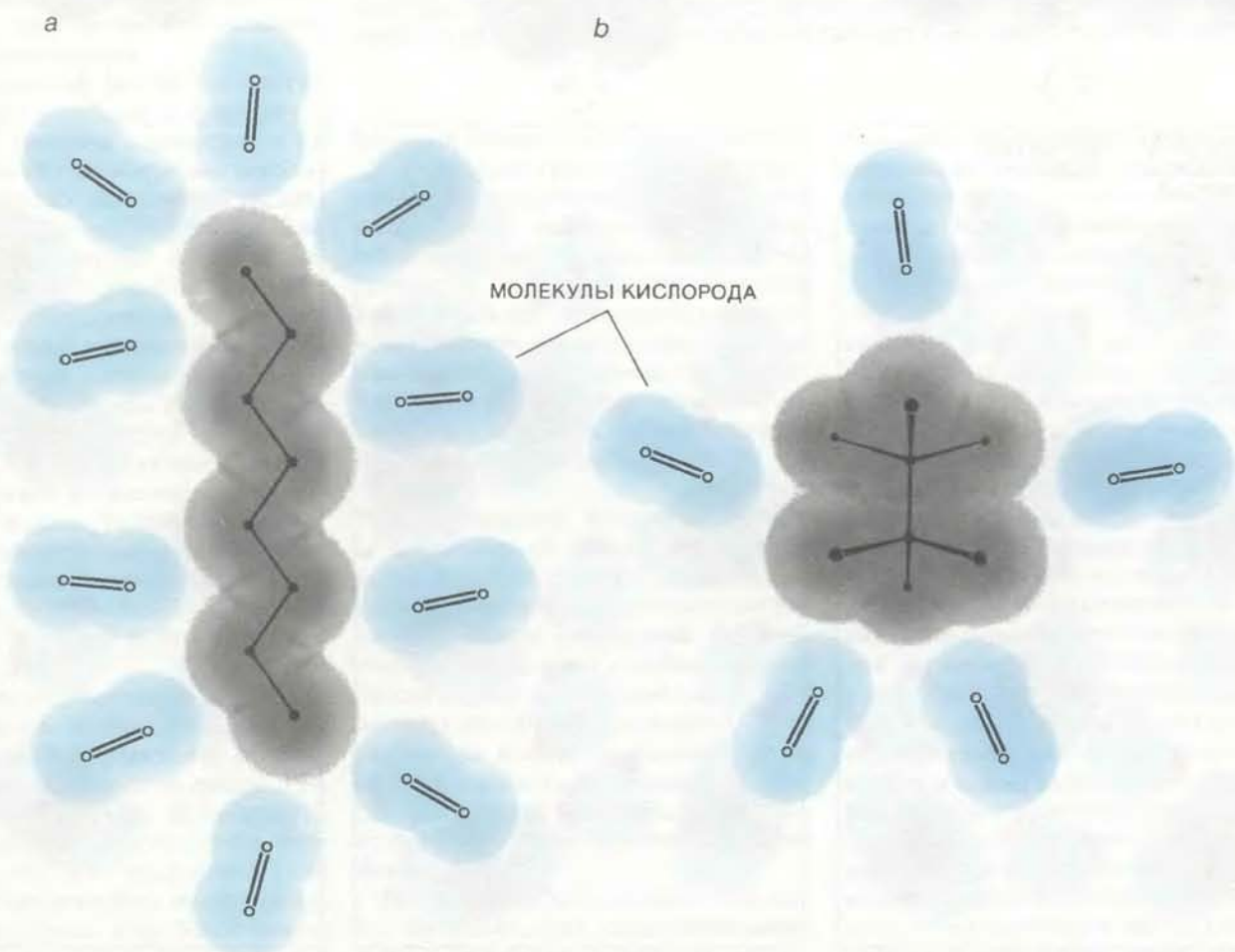
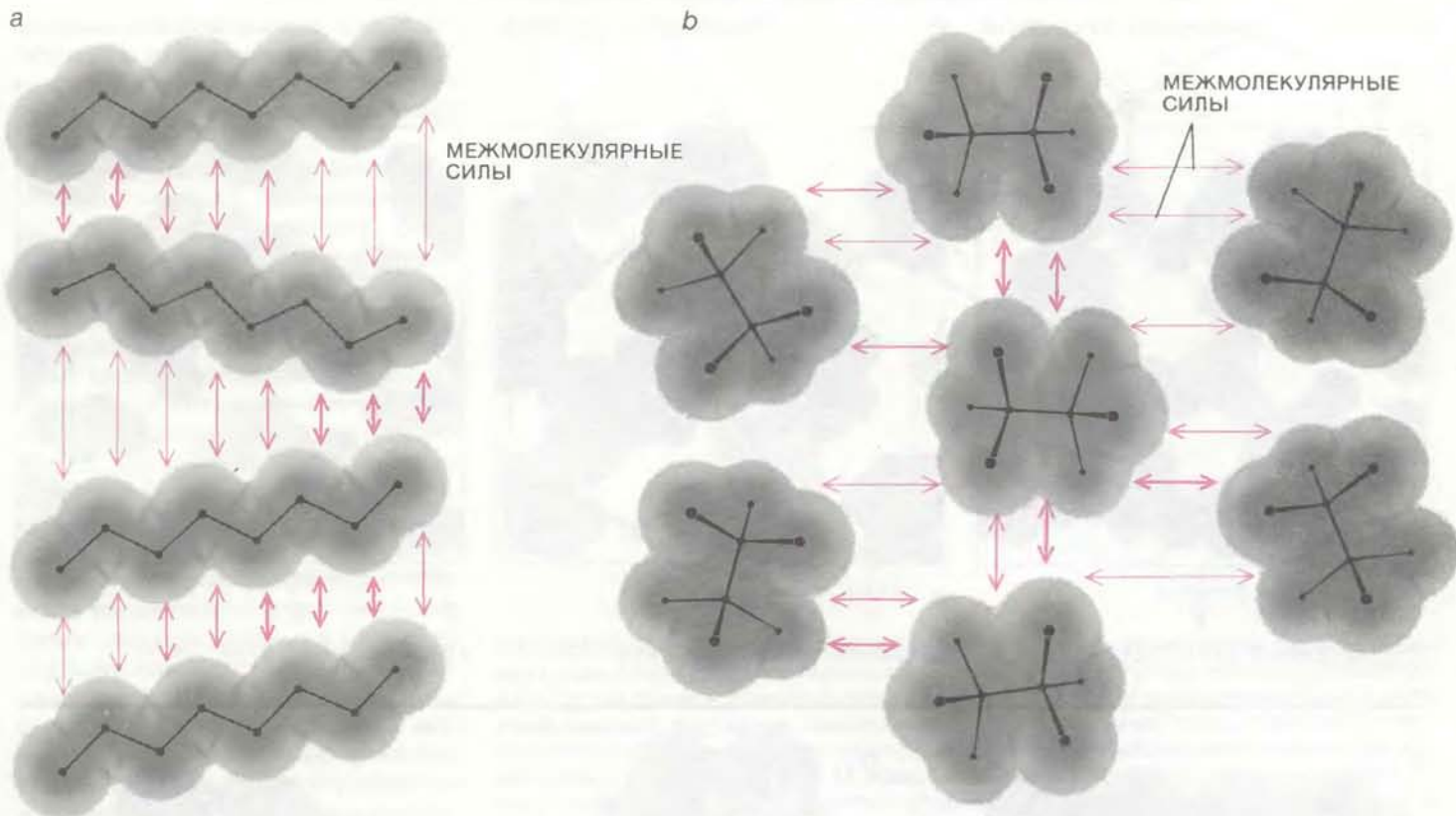
1 ЦИКЛ



4 ЦИКЛА

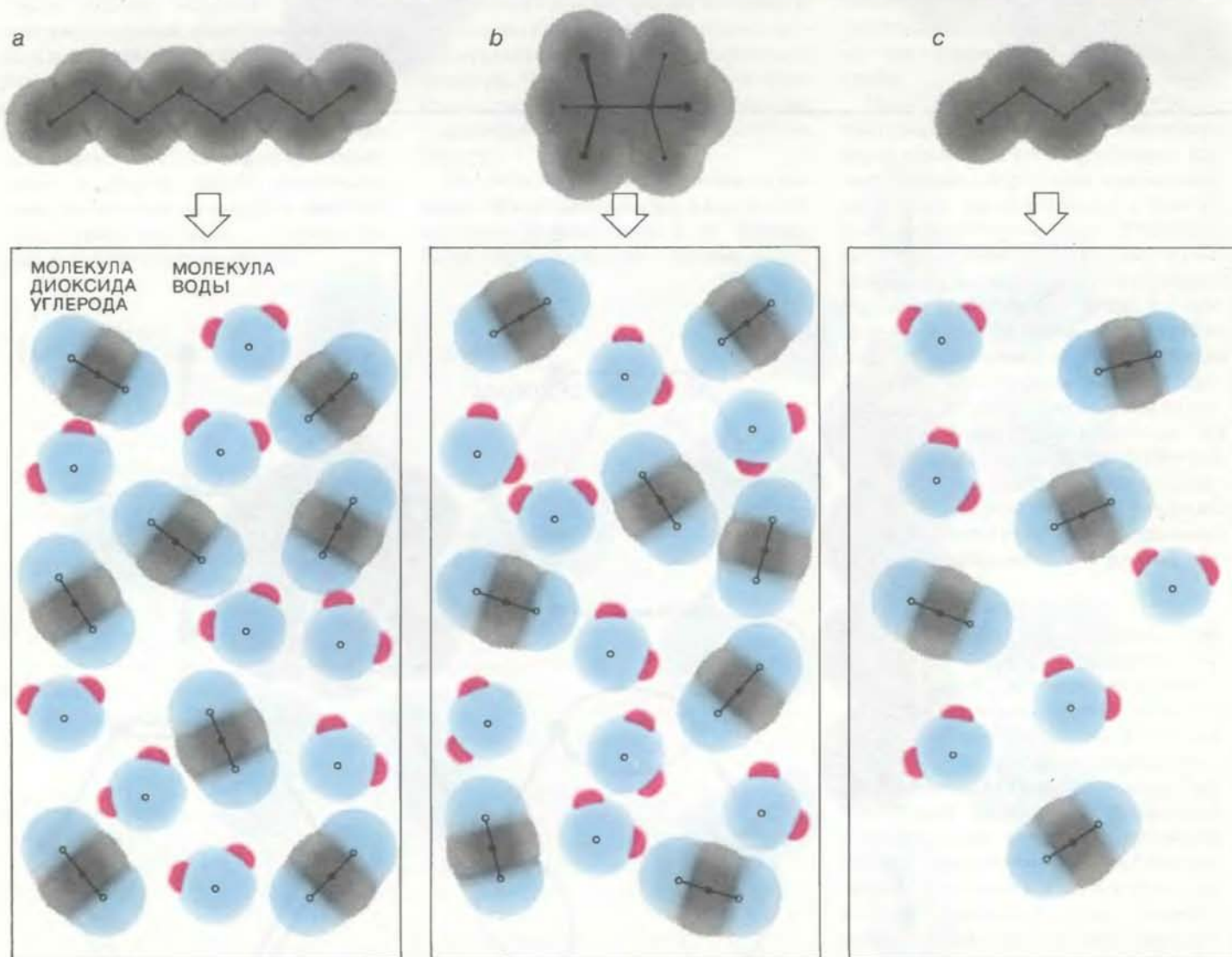
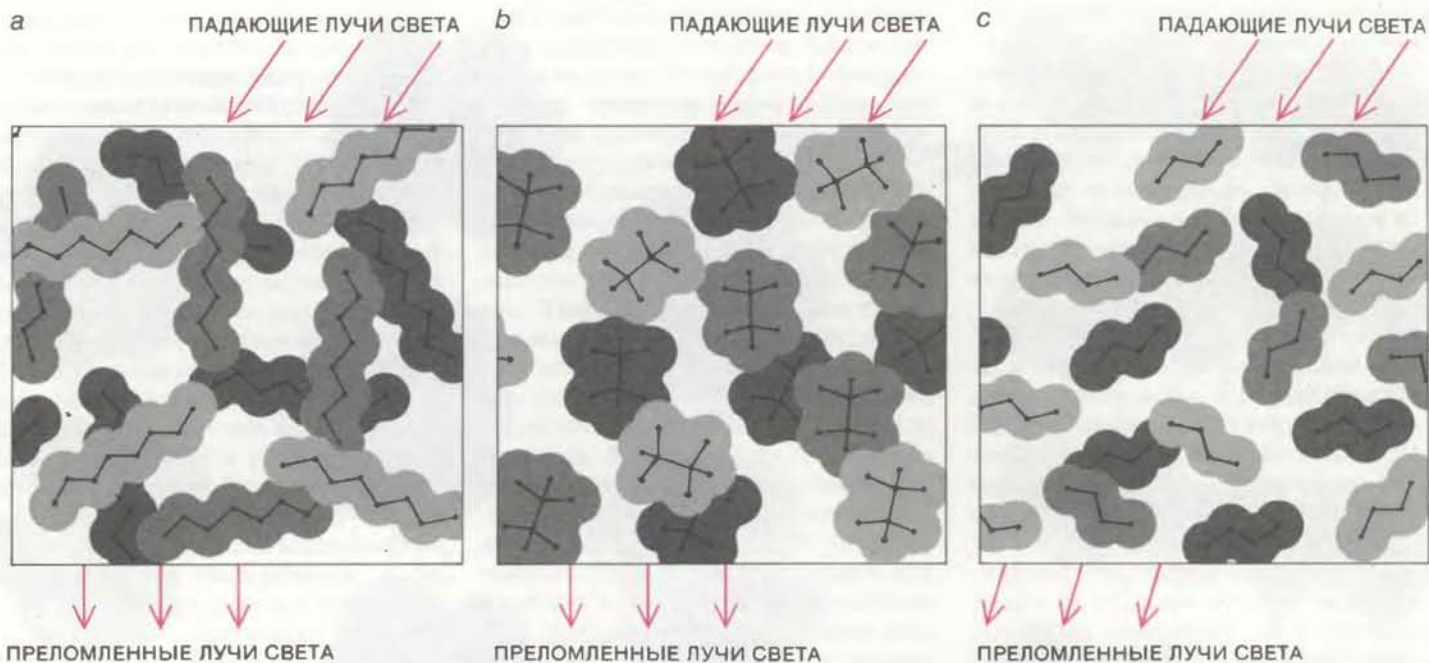


СТЕПЕНЬ НЕНАСЫЩЕННОСТИ равна числу независимых циклов (т. е. колец или двойных связей) в графе анализируемой молекулы. После умножения степени ненасыщенности на особый индекс, характеризующий относительные вклады открытых цепей и замкнутых колец в структуру молекулы, получают новый индекс, хорошо коррелирующий, например, с выходом сажи, образующейся при неполном сгорании углеводов.



ОТ ФОРМЫ МОЛЕКУЛ зависят такие свойства веществ, как температура кипения и октановое число. Температура кипения (вверху) зависит от формы молекул, поскольку она определяется межмолекулярными взаимодействиями. Линейно-цепные молекулы (а) взаимодействуют друг с другом сильнее, чем разветвленные (b), поскольку они имеют большую поверхность, доступную для межмолекулярного

взаимодействия. Октановое число жидкого топлива (внизу) характеризует его антидетонационные свойства. В линейных молекулах (а) имеется значительно больше возможностей для взаимодействия с кислородом, чем в разветвленных (b), поэтому разветвленные молекулы более устойчивы к детонации. С такими свойствами коррелируют индексы, чувствительные к изменениям формы молекул.



ОТ РАЗМЕРОВ МОЛЕКУЛ зависят такие свойства, как молекулярная рефракция и теплота сгорания веществ. Молекулярная рефракция характеризует способность вещества преломлять свет (вверху) и зависит от числа электронов в его молекулах. Молекулы большего размера (a, b), имеющие большее число электронов, преломляют свет в большей степени, чем молекулы меньшего размера (c). Теплота сгорания углеводородов — это количество теплоты, выделя-

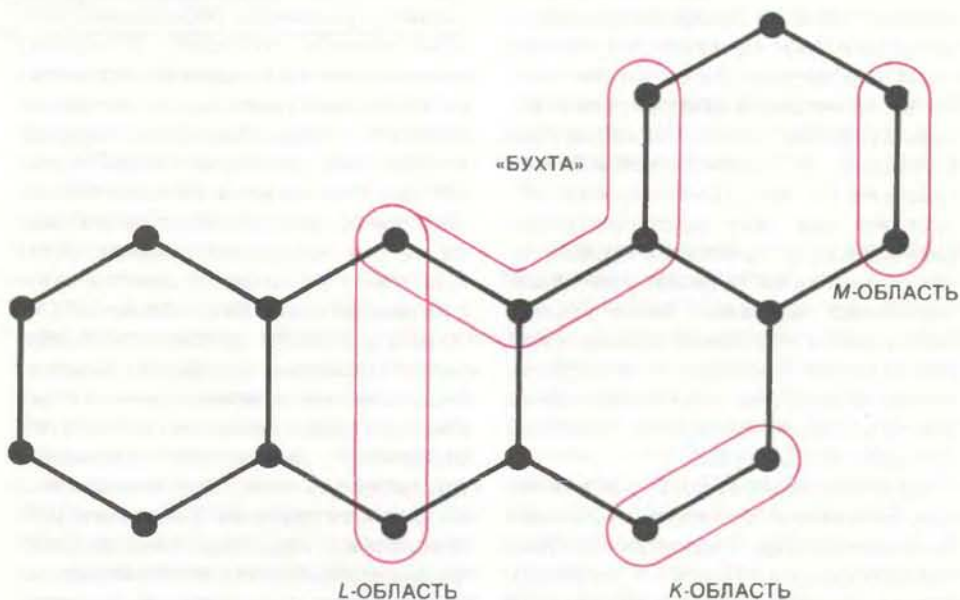
ющейся при их взаимодействии с кислородом с образованием воды и диоксида углерода (внизу). Углеводороды с большими молекулами, которые дают больше продуктов сгорания (a, b), имеют более высокую теплоту сгорания по сравнению с углеводородами с молекулами меньшего размера (c). С такими свойствами коррелируют индексы, чувствительные к изменению размера молекул.

шо коррелирующие с площадью поверхности и объемом, также хорошо коррелируют со способностью этих молекул вызывать специфические биологические реакции.

К подобным коррелирующим с топологией молекул проявлениям их физиологической активности относится способность некоторых классов соединений действовать как анестезирующие, снотворные и наркотические препараты. Оказались также возможными корреляции индексов связности с запахом некоторых веществ; величина соответствующего индекса может указать на то, например, будет ли иметь данное вещество аромат сложногоэфирного типа (как у фруктовых эссенций) или запах, характерный для карбоновых кислот (главного компонента человеческого пота). Оценка величин индексов связности (лежат ли они выше или ниже какого-то порогового значения) позволяет даже предсказать, сладкий или горький вкус будет иметь исследуемое вещество. Недавно Р. Гарднер в сотрудничестве с фирмой Napr Lager, Ltd., использовал подобного рода «органолептическую» избирательность индексов связности для усовершенствования способов пивоварения.

Сейчас известно множество других применений индексов связности в биологии. Найдена возможность их корреляции со способностью некоторых химических соединений подавлять рост таких бактерий, как *Staphylococcus aureus* (золотистый стафилококк), *S. typhosa* и *Mycobacterium tuberculosis* (соответственно возбудители тифа и туберкулеза). Хорошо коррелирует с этими индексами и способность некоторых химических веществ убивать штамм Lee вируса гриппа В. Индексы связности могут также служить в качестве эффективного критерия мутагенной активности (способности вызывать генные мутации) таких соединений, как нитрозамины, которые найдены в табачном дыме, копченой рыбе и консервированном мясе.

Наиболее интересные перспективы использования индексов молекулярной связности открываются в области охраны окружающей среды. Например, уже показана возможность проведения на их основе оценок токсичности многих соединений для мальков и других обитателей пресноводных водоемов. Еще более важно обнаружение хороших корреляций этих индексов с возможностью распространения загрязнителей в воздухе, воде или почве, их концентрированием в живых организмах или участием в различных циклических процессах в окружающей среде. Изучение таких явлений с помощью физических



КАНЦЕРОГЕННОСТЬ некоторых химических соединений (способность вызывать появление злокачественных опухолей) в ряде случаев можно прогнозировать путем топологического анализа. Известно, что на начальных стадиях цепи превращений, ведущих к канцерогенезу под действием полициклических ароматических углеводородов, важную роль играют особые участки молекул, называемые «бухтой», K-, L- и M-областями. Учет этих специфических структурных особенностей лег в основу уравнения, предложенного У. Херндоном и Л. фон Сантпали из Техасского университета в Эль-Пасо и объединяющего несколько топологических индексов разных типов. Полученная корреляция зависит также от размеров молекул: те из них, которые больше или меньше определенного размера, теряют способность проявлять канцерогенные свойства.

методов связано с большими экспериментальными трудностями и экономическими затратами, тогда как в топологических исследованиях можно обойтись карманным калькулятором. Агентство по охране окружающей среды США уже приступило к использованию этих индексов при решении таких проблем, как научно обоснованное прогнозирование токсических свойств неизвестных или ранее еще не проверявшихся загрязнителей.

ХОТЯ индексы Винера и Рандича применимы для решения широкого круга проблем, их использование не всегда ведет к получению достаточно хороших корреляций. В таких случаях можно ввести особый индекс, рассчитанный на решение какой-либо конкретной задачи. Эти индексы нужны прежде всего в тех случаях, когда основную роль в определении химического поведения молекулы играют не ее форма и общие размеры, а другие факторы.

Введение особого индекса требуется, например, для прогнозирования октанового числа жидкого топлива. Октановое число, обычно определяемое путем сжигания данного топлива в специальном испытательном двигателе внутреннего сгорания при стандартных условиях, служит показателем эффективности сгорания топлива и характеризует его антидетонацион-

ные свойства. Детонация вызывается окислением молекул топлива в момент сжатия топливно-воздушной смеси в цилиндре, опережая ее зажигание. Линейные молекулы углеводородов обычно проявляют большую склонность к детонации, чем разветвленные, поскольку все атомы углерода в линейных молекулах в равной степени могут взаимодействовать с кислородом, тогда как в разветвленных молекулах многие атомы углерода оказываются как бы скрытыми в точках ветвления.

Поскольку устойчивость к детонации сильно зависит от того, в какой степени разветвлены молекулы топлива, предпринималось много попыток согласовать октановые числа с топологическими индексами, например с индексом Винера, который в определенной степени отражает и объем, и форму молекул. Хотя корреляции, полученные этим путем, были довольно хорошими, многие исследователи считали, что индекс, учитывающий степень разветвленности молекул, может привести к лучшим корреляциям. Такой индекс, очень хорошо коррелирующий с октановыми числами углеводородного топлива, был предложен в 1979 г. А. Балабаном из Бухарестского политехнического института и назван им центрическим.

Центрический индекс Балабана находят путем удаления вершин опреде-

ленного типа из графа исследуемой молекулы (см. нижний рисунок на с. 17). На первом этапе подсчитывают все те вершины данного графа, которые связаны только с одной другой вершиной, и затем переписывают граф уже без них. Процедуру эту повторяют для всех последовательно получающихся усеченных графов до тех пор, пока не останется ни одной неучтенной вершины. Числа удаленных таким образом вершин каждый раз возводят в квадрат и последовательно складывают. Итоговая сумма и есть центрический индекс Балабана для данной молекулы.

Другой особый топологический индекс был введен для прогнозирования выхода сажи при неполном сгорании углеводородов. Поиск корреляции между выходом сажи и структурой исходных соединений — особенно трудная задача. Простые топологические индексы типа углеродного числа давали хорошие корреляции только для какого-то одного семейства молекул с родственной структурой и становились ненадежными при сопоставлении молекул, принадлежащих разным классам.

В этом году мы с М. Хэнсоном предприняли попытку получить индекс для корреляции между выходом сажи и структурой молекул разных классов. Вскоре стало ясно, что эту задачу можно решить, если найти индекс, который обладал бы достаточной избирательностью по отношению к анализируемым молекулам в зависимости от того, имеются или нет в их структуре кольца и двойные связи. Мы нашли решение этой проблемы, скомбинировав два относительно простых топологических индекса. Первый из них, называемый степенью ненасыщенности, служит количественной мерой числа независимых циклов (т. е. кольцевых фрагментов) в графе данной молекулы (см. рисунок на с. 18). Второй индекс связности, известный под названием индекса суммы усредненных расстояний, служит мерой отдельных вкладов в структуру молекулы таких элементов, как открытые цепи и замкнутые кольца. Полученный нами индекс, представляющий собой математическое произведение двух указанных индексов, позволил вывести линейную корреляцию между выходом сажи и структурой около 100 углеводородов различных классов.

ОДНО ИЗ самых честолюбивых устремлений ученых при разработке топологических методов прогнозирования связано с предпринятой недавно попыткой найти корреляцию индексов со способностью некоторых

молекул вызывать образование злокачественных опухолей. Поскольку механизм этого явления представляет собой многостадийный процесс, соответствующие индексы должны отражать особенности не только исходной молекулы, но и молекул промежуточных соединений, образующихся на его начальных стадиях. Хотя для ответа на вопрос о канцерогенности данной молекулы можно использовать и индексы молекулярной связности Рандича, в прогнозировании более сложного параметра — степени канцерогенной активности таких соединений — наилучшие результаты достигнуты пока У. Херндонем и Л. фон Сентпали из Техасского университета в Эль-Пасо. Они разработали оригинальную комбинацию нескольких простых индексов для моделирования канцерогенности полициклических ароматических углеводородов.

Одно из важнейших соображений при разработке этого прогноза заключалось в том, что молекулы, меньшие или большие определенного размера, теряют канцерогенные свойства. Херндон и Сентпали учли это, используя такие индексы, как углеродное число и квадрат углеродного числа. Другое соображение состояло в том, что в молекулах полициклических ароматических углеводородов имеется несколько участков, которые в канцерогенезе играют более важную роль, чем другие.

Эти участки, известные под названием «бухты», *K*-, *L*- и *M*-областей, особенно влияют на первые стадии цепи превращений, ведущих к канцерогенезу. Если «бухта», *K*- и *M*-области молекулы химически достаточно активны, а ее *L*-область относительно неактивна, то такая молекула должна оказывать канцерогенное действие. Полученное уравнение содержит четыре топологических индекса, два из которых отражают ограничения на размер молекулы, а два других характеризуют ее некоторые структурные особенности (связанные с наличием «бухты», *K*-, *L*- и *M*-областей). На основе этого уравнения была получена хорошая корреляция топологических параметров ряда полициклических ароматических углеводородов с их экспериментально определенной канцерогенной активностью, несмотря на то, что экспериментальные данные содержат некоторую неопределенность.

ТАКИМ образом, топологические методы исследования охватывают широкий круг физических, химических и биологических явлений. С их помощью можно моделировать хи-

мическое поведение газообразных, жидких и твердых соединений, причем как неорганических, так и органических. Хотя пока еще нельзя с полной уверенностью предвидеть, какие именно топологические индексы должны быть наиболее подходящими во всех случаях, уже известны индексы для моделирования размера, формы, степени разветвленности, реакционной способности и многих других свойств молекул. Использование топологических индексов, по-видимому, будет особенно эффективно в двух областях: исследованиях по целенаправленному конструированию (молекулярному дизайну) новых лекарственных препаратов и изучению возможности распространения различных загрязнителей в окружающей среде с моделированием их воздействий на живые организмы.

Возможности прогнозирования с помощью топологических методов только в последнее время стали более широко признаваться среди ученых. То, что топологические индексы можно применять, мы теперь знаем: осталось только разработать методы их применения. Тогда можно будет делать точные и полезные предсказания в химии, используя самые простые, но наиболее фундаментальные и часто еще не учитываемые параметры. В общем у молекулярной топологии все еще впереди.

Издательство
МИР
предлагает:

А. Балаж
**БИОЛОГИЯ
ОПУХОЛЕЙ**

Сомнения и надежды
Перевод с венгерского

В книге в доступной форме описаны биологические основы и возможные механизмы злокачественного перерождения клеток.

Для специалистов в области теоретической, экспериментальной и клинической онкологии, цитологов и всех интересующихся проблемой рака.

1987, 16 л. Цена 2 р. 10 к.



SCIENTIFIC AMERICAN

СЕНТЯБРЬ 1936 г. Этот и следующий годы войдут в историю как решающий период в создании теории космических лучей. В течение последних двенадцати месяцев ученые пришли к более или менее единодушному мнению о природе космических лучей. Установлено, что эти лучи представляют собой в основном поток заряженных частиц. Среди них можно выделить альфа-частицы, обнаруживаемые только высоко в стратосфере, электроны и позитроны, проходящие сквозь значительную толщу атмосферы, и протоны, проникающие наиболее глубоко. Откуда приходят эти лучи и чем объясняется их огромная энергия — эти вопросы предстоит решить в будущем.

Уникальный метод «опознания» химических веществ по дифракционным картинам рентгеновских лучей разработан в фирме "Dow Chemical Company". Молекулы каждого соединения образуют определенную геометрическую структуру, свойственную только этому соединению. Поэтому характерным для данного соединения будет также узор на фотографическом снимке, который отражает взаимодействие рентгеновских лучей с молекулярной структурой вещества. Этот узор состоит из линий, находящихся в определенных местах и имеющих определенную яркость. Именно они дают ключ к точной классификации соединения.

Среди нестандартных средств, которые используют в наши дни археологи, главное место занимает аэрофотосъемка. Если сфотографировать участок земной поверхности, находящийся непосредственно под летательным аппаратом, на снимке будут заметны все следы человеческой деятельности, оставленные на почве. А на фотографиях, сделанных под некоторым углом к поверхности, освещенной косыми лучами солнца, можно заметить «отпечатки» оснований давно исчезнувших строений, даже если это место скрыто под посевами.

Содержимое даже самой большой библиотеки теперь можно будет воспроизвести в микроскопическом масштабе; при этом остается возможность в любой момент прочитать любую книгу. С помощью микрофотографии страницу оригинала уменьша-

ют в 150—400 раз. Пленка с текстом заключается в герметичную кассету, которую при необходимости можно вставить в увеличительный аппарат для чтения. Килограмм пленки содержит столько же текста, сколько тонна печатного материала.

Почти каждый «горячий» американский водитель убежден, что его коллега за рулем соседней машины куда менее компетентен, чем он сам. Эту иллюзию скоро окажется возможным опровергнуть. В бюро исследований уличного движения при Гарвардском университете создан ряд приборов и тестов для оценки водительских способностей. Недалек тот день, когда у совсем неспособных рулевое колесо будет отнято, средний водитель сможет повысить свое мастерство, а лучшим, возможно, будут даны определенные привилегии.

Естественный свет, который мы обычно видим, в значительной мере поляризован. Поляризационные очки закрывают глаза от поляризованного света, отраженного от предметов, но пропускают неполяризованный рассеянный свет. Другими словами, такие очки защищают глаза от блеска, который создают поверхности ярких предметов.



СЕНТЯБРЬ 1886 г. Недавно произошло событие, которое стало одним из самых ярких и интересных эпизодов в египтологии: раскрытие мумии египетского фараона Рамзеса II. Эта операция выполнялась в Булаке под руководством проф. Г. Масперо, Генерального директора Раскопок египетских древностей, по приказу и в присутствии хедива Египта и большой группы официальных лиц и ученых из разных стран. Оказалось, что мумифицированное тело принадлежало старому, но сильному и выносливому человеку. Из других источников мы знаем, что Рамзес II правил 67 лет и умер в возрасте около 100 лет.

На недавнем собрании Национальной ассоциации электрического освещения немало времени было уделено обсуждению целесообразности закапывания проводов. Собрание выступило решительно против этого проекта. Поскольку воздух является наилучшей изоляцией, а земля — наихудшей, вряд ли мы сможем быстро и легко начать «добывать» из-под зем-

ли электрические удобства, которые публика привыкла получать «по воздуху». Спрятать все провода в городе под землю — трудное и дорогостоящее мероприятие и браться за него без решительных доказательств его практической опасно, если не сказать больше.

Мы уже писали о том, как можно получить прекрасный негатив. Для этого нужно поместить чувствительную сухую фотопластинку у одной стенки подходящего ящика, а посередине противоположной стенки прикрепить тонкую металлическую пластинку, в которой проделано булавочное отверстие. Эта идея совсем недавно получила воплощение в небольшой фотокамере, уже появившейся на рынке, которая благодаря своей компактности, простоте и новизне наверняка завоюет поклонников среди молодежи и старшего поколения как прекрасное средство для досуга.

На локомотивном заводе Болдуина строятся четыре локомотива, используемых для движения жар не огня, а соды. Внутри котла локомотива находится пять тонн соды, которая, если ее увлажнить струей пара, дает много тепла. Когда сода полностью насыщается влагой (это происходит примерно за шесть часов), выделение тепла прекращается и первоначальное состояние топлива необходимо восстановить, пропустив через котел перегретый пар из стационарного котла, находящегося на станции. В результате влага полностью удаляется из соды и она снова готова к использованию. Локомотивы, которые появятся на улицах Миннеаполиса, смогут легко тянуть четыре небольших вагона.

Проведены дальнейшие опыты по определению глубины, на которую проникает свет в морях и озерах. Для опытов был выбран залив Ницца с глубиной около 550 м. В апреле в хорошую погоду в полдень свет проникал на глубину 400 м, пока солнце стояло над горизонтом, — не менее чем на 300 м, а в течение восьми часов — не менее чем на 350 м.

Один из экспонатов, выставленных в Национальном музее, показывает, как выглядит человек весом 72 кг с точки зрения химика. «Химический человек» разложен на составляющие элементы, находящиеся в стеклянных банках. Если из «человека» извлечь различные газы, углерод, фосфор и серу, в нем не останется ничего, кроме металлов. Глядя на этот экспонат, нельзя не удивляться, как много металла содержит человеческое тело.

Суперструны

Трактовка элементарных частиц как струн открывает путь к созданию самосогласованной квантовой теории для объяснения всех четырех фундаментальных взаимодействий, существующих в природе. Эта теория может изменить наши представления о пространстве и времени

МАЙКЛ Б. ГРИН

ГЛАВНЫЙ парадокс современной физики элементарных частиц — очевидная несовместимость двух фундаментальных теорий, лежащих в ее основе. Первая из них — общая теория относительности Эйнштейна, которая связала гравитационные силы со структурой пространства-времени. Такое описание позволило объяснить многие явления космических масштабов и понять эволюцию Вселенной. Второй основной теорией, используемой в физике элементарных частиц, является квантовая механика, которая описывает атомный и субатомный мир. Квантовые теории сформулированы для трех из четырех известных взаимодействий природы — сильного, слабого и электромагнитного. До недавнего времени казалось, что нет почти никакой надежды объединить эйнштейновскую теорию четвертого фундаментального взаимодействия — гравитационного — с квантовой механикой. По-видимому, главная трудность такого объединения связана с необходимостью радикально новой формулировки законов физики для очень небольших расстояний. При переформулировке законов придется отказаться от представления о пространстве и времени как о непрерывном множестве точек. Без квантовой теории гравитации и пересмотра основных понятий, которое должно следовать из такой теории, невозможно дать исчерпывающее описание всех взаимодействий, существующих в природе.

В последние два года физики, занимающиеся элементарными частицами, стали более оптимистично смотреть на возможность выхода из этого теоретического тупика. Их оптимизм основан на поразительных достижениях в развитии теорий нового вида — так называемых теорий суперструн, в которых элементарная частица представляется в виде струны. Поэтому такие теории отличаются от всех известных квантовомеханиче-

ских теорий поля, согласно которым кванты или фундаментальные частицы точечноподобны, например от квантовой теории электромагнетизма. Так как струна является протяженным объектом, она может колебаться подобно обычной скрипичной струне. Гармонические, или нормальные, моды колебаний определяются натяжением струны. В квантовой механике волны и частицы — это взаимодополняющие описания одного и того же объекта, поэтому каждая колебательная мода струны соответствует какой-то частице. Частота колебаний определяет энергию и, следовательно, массу этой частицы. Известные элементарные частицы интерпретируются как различные колебательные моды единой струны.

Теория суперструны соединяет теорию струны с математической теорией так называемой суперсимметрии (см.: Г. Хабер, Г. Лейн. Обладает ли природа суперсимметрией?, «В мире науки», 1986, № 8, с. 26). В ней не только удается избежать обычных трудностей, возникающих при объединении гравитации с квантовой механикой, но и появляется возможность рассматривать само существование всех четырех фундаментальных взаимодействий как проявление некоторых более общих принципов. Кроме того, объединение этих взаимодействий выполняется почти однозначно только на основе логического требования внутренней непротиворечивости теории. Развитие теории суперструны привело к необычному оживлению контактов между физиками и математиками. Для понимания этой новой физической теории надо использовать многие из новейших достижений современной математики. В свою очередь теория суперструны вызвала к жизни новые математические исследования.

СОГЛАСНО теории суперструны, стандартные законы физики являются приближенными следствиями

гораздо более полной теории, рассматривающей явления, которые происходят на невообразимо малых расстояниях. Длина струн, постулируемых этой теорией, составляет около 10^{-35} м, что в 10^{20} раз меньше диаметра протона. Хотя различия между теорией суперструны и более традиционными теориями проявляются на столь малых расстояниях, они оказываются существенными с точки зрения непротиворечивости и предсказательной силы теории.

Например, если пренебречь гравитацией, то можно построить объединенную теорию сильных, слабых и электромагнитных взаимодействий в рамках обычной квантовой теории, где кванты рассматриваются как точечные частицы. Единая картина взаимодействий является следствием некоторой симметрии, «встроенной» в теорию. Однако есть много симметрий, которые можно положить в основу такой теории, и нет никаких теоретических соображений, позволяющих предпочесть одну симметрию другой. Наоборот, в теориях суперструны гравитацию в принципе нельзя исключить из рассмотрения, а вид симметрии, необходимый для ее включения, ведет к естественным предсказаниям относительно тех симметрий, на основе которых объединяются три других взаимодействия.

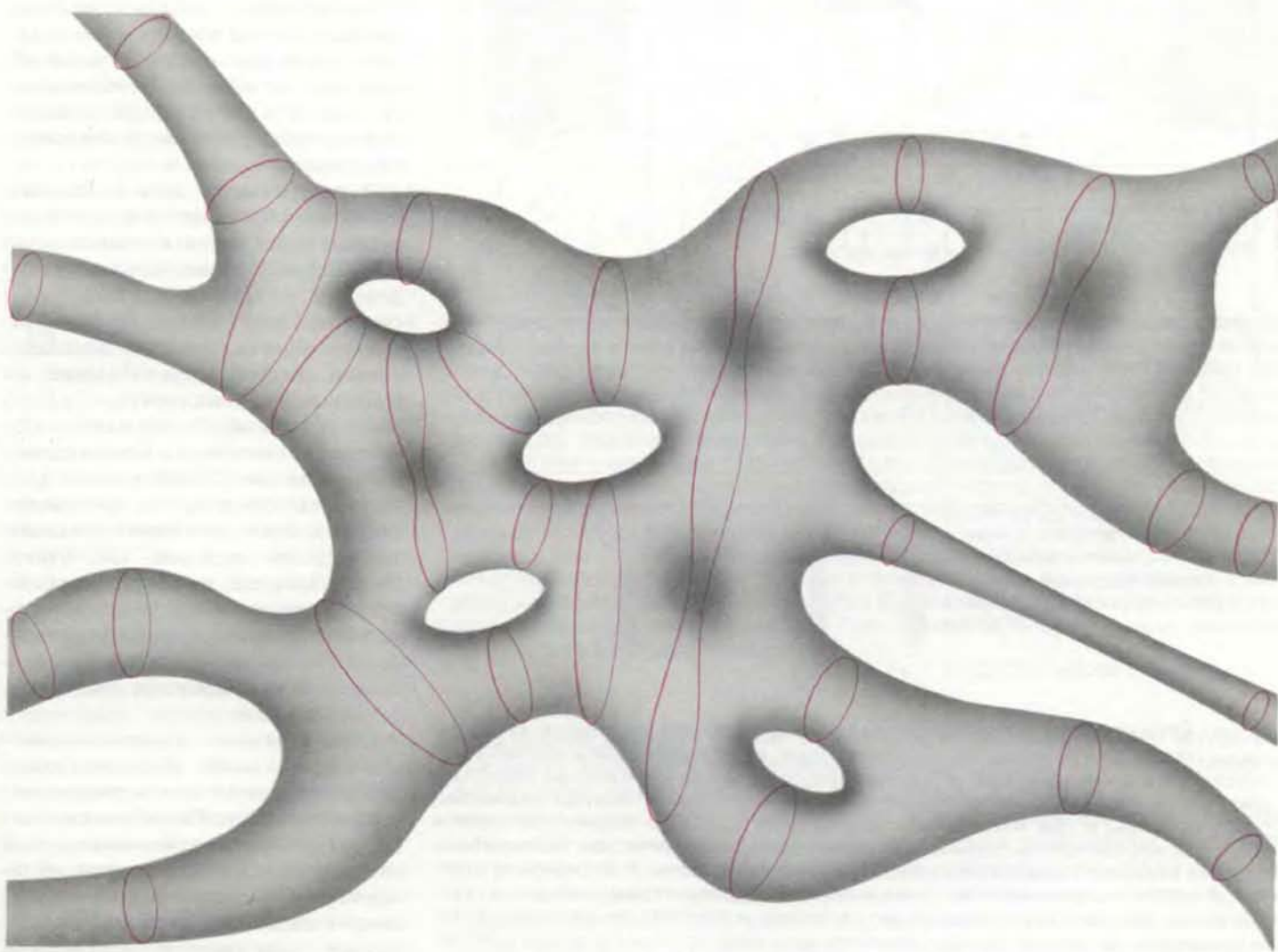
Поскольку новые представления о пространстве и времени столь долго ожидалось от квантовой теории гравитации, следует остановиться на том, каким образом теория суперструны могла бы изменить наши взгляды на геометрию Вселенной. Строго говоря, не совсем корректно считать, что струны, подобно независимым частицам, движутся в некотором заданном пространстве, являющемся просто ареной для происходящих с ними событий. В теории гравитации Эйнштейна, которая должна следовать из теории суперструны в качестве одного из приближений, пространство и время объединены в

четырёхмерный континуум, называемый пространством-временем. Влияние гравитационного взаимодействия определяется кривизной пространства-времени, являющейся аналогом кривизны двумерной поверхности, например сферы. В искривленном пространстве-времени частица движется по так называемой геодезической — кратчайшему пути между двумя точками. Аналогом геодезической на сфере служит дуга большого круга между двумя заданными точками. Частица оказывает обратное влияние на пространство-время, испуская гравитационные волны, которые изменяют саму геодезическую, вдоль ко-

торой она движется. Уравнения общей теории относительности определяют не только пути частиц, но и структуру пространства-времени, в котором они движутся.

В теории суперструны гравитация действует в мире, расширенном до девяти пространственных и одного временного измерения. Как и прежде, движение происходит вдоль геодезических, но теперь это уже поверхности минимальной площади в 10-мерном пространстве-времени. Ясно, что шесть из десяти измерений должны быть скрыты, чтобы наблюдаемыми были лишь четыре известных пространственно-временных измерения.

Шесть дополнительных измерений должны быть свернуты в такие компактные образования, которые недоступны прямым наблюдениям. Идею о ненаблюдаемых малых измерениях легко понять на примере простой двумерной модели обыкновенного шланга. Шланг — это двумерная поверхность. Представим себе, что мы изучаем его при помощи прибора с такой разрешающей способностью, которая не позволяет обнаружить толщину шланга. Следовательно, шланг будет представляться нам одномерным объектом. В теориях суперструны размер свернутых измерений, по видимому, приблизительно равен



МИРОВАЯ ПОВЕРХНОСТЬ «заметается» частицами-струнами при их движении и взаимодействии в пространстве-времени. Струноподобные частицы, как и обычные струны, имеют протяженность только в одном измерении. Суперструны чрезвычайно малы и движутся в 10-мерном аналоге пространства-времени. На рисунке ось времени расположена горизонтально. Замкнутые струны, или петли (выделены цветом), движутся слева направо. Замкнутые струны в своем движении заметают мировые поверхности, которые являются деформированными цилиндрами, т. е. поверхностями, топологически эквивалентными цилиндрам. Соответствующие диаграммы для процессов с участием открытых струн несколько сложнее, так как поверхности имеют границы, образуемые при движении

концов струны. Когда две струны сталкиваются, они соединяются в третью струну: два цилиндра образуют третий цилиндр. Когда струны разрываются надвое, а затем снова соединяются, в мировой поверхности остается дырка. При квантовых расчетах надо учитывать все возможные разрывы и соединения струн, которые могут иметь место между их начальным и конечным состояниями. Мировая поверхность, описывающая такие квантомеханические взаимодействия, по топологической структуре похожа на «бублик» с произвольным числом дырок. Свойства теории суперструны для таких мировых поверхностей интенсивно исследуются, что связано с некоторыми важными направлениями современной математики.

длине струны. Поэтому наблюдаемый мир кажется нам трехмерным, и в этом смысле такая струна ведет себя как точечная частица.

Применение геометрических идей не исчерпывается введением шести дополнительных пространственных измерений. В общей теории относительности гравитационное поле определено в каждой точке пространства-времени. Квантовая эквивалентность волны и частицы требует, чтобы гравитационной волне, или возмущению

гравитационного поля, соответствовала некая частица; эту частицу называют гравитоном. Аналогично в теории струны должно существовать поле, зависящее от конфигурации струны; назовем его струнным полем. Число возможных конфигураций струны невообразимо больше числа точек в пространстве. Абстрактное пространство всех возможных конфигураций струны является грандиозным развитием идеи обычного пространства, а его геометрия, связанная

со струнным полем, — совершенно новым видом геометрии. Частицу-струну следует представлять как «волновое» возмущение в этом огромном пространстве, подобно тому как мы представляем гравитон в виде волны в обычном пространстве.

ИСТОРИЧЕСКИ теория суперструны восходит к так называемой дуально-резонансной модели, развитой в конце 60-х годов для объяснения некоторых наблюдаемых свойств адронов — сильновзаимодействующих частиц (см.: J. Schwarz. Dual-Resonance Models of Elementary Particles, "Scientific American", February, 1975). К этому времени уже была создана квантовополевая теория электромагнетизма, которая успешно применялась, но все же многие теоретики стали разочаровываться в общем подходе квантовой теории поля. Ни одна из таких теорий не могла, казалось, объяснить поведение адронов с большим спином.

Именно в связи с этим Г. Венециано, ныне работающий в Европейской организации ядерных исследований (ЦЕРН) в Женеве, просто угадал формулу, не связанную с формулами квантовой теории поля, которая описывала многие свойства адронных взаимодействий. Позже Й. Намбу из Чикагского университета, Т. Гото (ныне покойный), Х. Нильсен из Института Нильса Бора в Копенгагене и Л. Сасскинд из Станфордского университета показали, что применение формулы Венециано эквивалентно интерпретации адронов как струн. Предполагалось, что гармоники колебаний струны соответствуют наблюдаемым адронам. Струна была нужна, чтобы связать вместе кварки, входящие в состав протона, нейтрона и других адронов.

Первоначальная дуально-резонансная модель могла объяснить лишь свойства частиц с целым спином, таких, как пи-мезон. Подобные частицы называют бозонами, и с точки зрения квантовой механики они резко отличаются от частиц с полуцелым спином, называемых фермионами, например электрона и протона. В 1971 г. П. Раймон из Университета шт. Флорида, А. Невё из Высшей нормальной школы в Париже и Дж. Шварц из Калифорнийского технологического института разработали вариант теории, включающий фермионы. Этот вариант, известный как теория спиновой струны, явился предшественником теории суперструны.

Однако обе ранние теории струны имели некоторые особенности, которые в то время рассматривались как

		ФЕРМИОНЫ					
		КВАНТОВАЯ ХРОМОДИНАМИКА СИММЕТРИЯ SU(3) ЦВЕТОВЫЕ ЗАРЯДЫ ФЕРМИОНОВ (КВАРКОВ)			НЕЙТРАЛЬНЫЕ ПО ЦВЕТУ ФЕРМИОНЫ (ЛЕПТОНЫ)		
ПОКОЛЕНИЕ	1	СИММЕТРИЯ ЭЛЕКТРОСЛАБЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ SU(2) × U(1)			[ν_e] [e^-] e^-_R		
	2	СИММЕТРИЯ ЭЛЕКТРОСЛАБЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ SU(2) × U(1)			[ν_μ] [μ^-] μ^-_R		
	3	СИММЕТРИЯ ЭЛЕКТРОСЛАБЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ SU(2) × U(1)			[ν_τ] [τ^-] τ^-_R		
		БОЗОНЫ					
		КАЛИБРОВОЧНЫЕ БОЗОНЫ ЭЛЕКТРОСЛАБЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ					
		КАЛИБРОВОЧНЫЕ БОЗОНЫ СИЛЬНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ (ГЛЮОНЫ)					
		БОЗОНЫ ХИГГСА (?)					

СТАНДАРТНАЯ МОДЕЛЬ элементарных частиц включает квантовую хромодинамику (КХД), теорию «цветовых», или сильных, взаимодействий и теорию электрослабых взаимодействий. В теории суперструны все эти частицы представляют собой безмассовые состояния колебаний струны. В таблице фермионы сгруппированы в три «поколения» частиц. Это выявляет симметрию теории точно так же, как группы химических элементов в периодической таблице Менделеева отражают симметрию на уровне атомной физики. К фермионам относятся кварки, несущие один из трех цветовых зарядов, которые связаны с группой симметрии SU(3) квантовой хромодинамики, и лептоны, не имеющие цветовых зарядов. Цветовые заряды показаны красным, зеленым и синим цветом. Кварки обладают также «электрослабым ароматом», который связан с группой симметрии SU(2) × U(1). Шесть известных ароматов (видов) обозначены буквами u, d, s, c, b и t. Лептоны участвуют только в электрослабых взаимодействиях. К ним относятся электронное нейтрино (ν_e), электрон (e^-), мюонное нейтрино (ν_μ), мюон (μ^-), тау-нейтрино (ν_τ) и тау-лептон (τ^-). Взаимодействия переносятся калибровочными бозонами. К калибровочным бозонам электрослабых взаимодействий относятся фотон (γ), три массивные частицы W^- и Z^0 . Восемь калибровочных бозонов сильных взаимодействий (глюонов) несут цветовые и антицветовые заряды, показанные цветом и цветными линиями соответственно. Могут существовать также бозоны Хиггса, ответственные за появление масс у частиц. Индексы L и R указывают спиральность — левую и правую соответственно. Для каждой частицы, кроме нейтрино, существует античастица противоположной спиральности. Асимметрия между «левым» и «правым», наиболее заметная по отсутствию правоспирального нейтрино, проявляется в том, что слабые взаимодействия различают частицы по их спиральности.

серьезные недостатки. Оказалось, что квантовомеханическое поведение бозонной струны последовательно описывается только в пространствен-времени 26 измерений! Для теории спиновой струны, как и для современных теорий суперструны, соответствующее число измерений равно 10. Далее, вызывало беспокойство, что состояниями струны с низшей энергией должны быть тахионы — частицы, которые могут двигаться быстрее света. Релятивистская квантовая теория с тахионами внутренне противоречива. Наконец, ранние теории предсказывали существование безмассовых частиц со спином 1 и 2, которые не наблюдались среди адронов. Их свойства скорее были похожи на свойства фотона, гравитона и так называемых слабых калибровочных бозонов (которые переносят слабые взаимодействия). Хотя Дж. Шерк (талантливый физик, безвременно скончавшийся) и Шварц предположили, что теорию струны можно интерпретировать как теорию гравитации и других взаимодействий, противоречия, тающиеся в подобных теориях, казались непреодолимыми.

ВНАЧАЛЕ 70-х годов интерес к квантовополевым теориям, основанным на представлении о точности частиц, стал возрождаться. Еще 20 лет назад была известна только одна удачная квантовополевая теория — квантовая теория электромагнетизма, упоминавшаяся выше; ее называют квантовой электродинамикой (КЭД). Всего через несколько лет были созданы еще две в высшей степени перспективные теории: теория электрослабых взаимодействий, давшая единое описание слабых взаимодействий и электромагнетизма, и квантовая хромодинамика (КХД), объясняющая, как кварки связываются между собой, образуя адроны. Эти теоретические достижения были подтверждены замечательными экспериментальными открытиями.

Во всех подобных теориях первостепенную роль играет симметрия. Симметрия законов физики выражается в существовании некоторого набора преобразований, которые составляют определенную математическую структуру, называемую группой. Например, физические законы, на которых основано действие некоторого прибора, не зависят от его ориентации в пространстве. В этом случае считают, что законы симметричны относительно вращений вокруг любой из трех независимых пространственных осей. Все такие вращения принадлежат группе трехмерных вращений, обозначаемой $O(3)$. Так

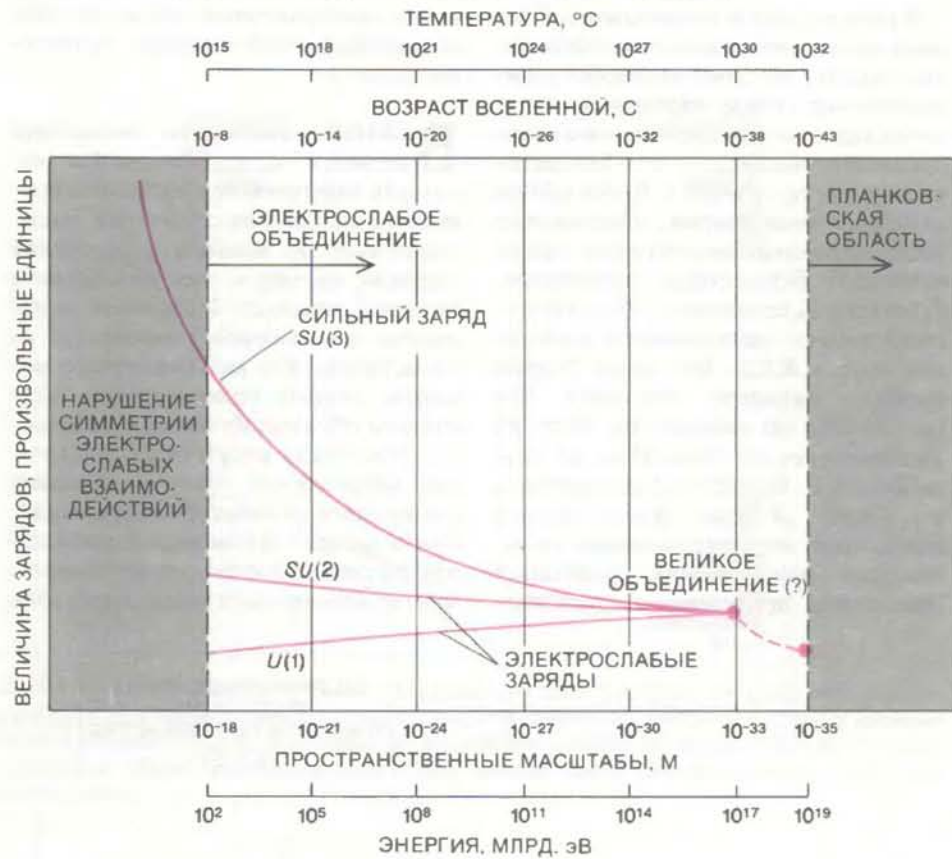
ЗАРЯДЫ, приводящие к электрослабым и сильным взаимодействиям, зависят от расстояния между взаимодействующими частицами. Согласно квантовой теории, в пространстве находится море «виртуальных» частиц, являющееся проявлением флуктуаций энергии. Виртуальные частицы несут заряды, которые могут экранировать реальные частицы и тем самым изменять величину их заряда. На трех горизонтальных осях отложены величины, изменения которых эквивалентны изменениям расстояния между взаимодействующими частицами. Измеренные значения зарядов соответствуют энергии порядка 100 ГэВ (миллиардов электронвольт). При экстраполяции получается, что эти три заряда должны сравняться при энергии около 10^{17} ГэВ. Такая экстраполяция предполагает, что при этих энергиях превагирует более широкая симметрия Великого объединения, при которой сильные и электрослабые взаимодействия становятся неразличимыми. Однако энергия Великого объединения может иметь и порядок планковской энергии (10^{19} ГэВ). В этом случае уже нельзя пренебрегать гравитационными силами.

как вращения задаются углами, которые могут принимать непрерывный ряд значений, то $O(3)$ есть непрерывная группа симметрии. Оказывается, что любой непрерывной группе симметрии в физике соответствует какая-то сохраняющаяся величина. Непрерывная симметрия относительно вращений приводит к сохранению углового момента.

Многие симметрии в физике частиц не связаны с обычным пространством: их можно представить как симметрии в так называемом внутреннем пространстве. Например, в теории электромагнетизма Максвелла внутреннее пространство можно считать окружностью. Физические явления не зависят от вращения по этой окружности точно так же, как они не зависят от вращений в обычном пространстве. Сохраняющейся величи-

ной, обусловленной этой внутренней симметрией, является электрический заряд.

В квантовополевых теориях наиболее богаты и интересны те симметрии, в которых допустимы независимые преобразования в каждой точке пространства и времени. Такие симметрии называют калибровочными симметриями, а основанные на них теории — калибровочными теориями. Первый простейший пример калибровочной теории — это электродинамика Максвелла. Здесь окружности внутреннего пространства сопоставляются каждой точке пространства-времени, и законы электромагнетизма не изменяются при независимых вращениях по любой из окружностей этого бесконечного множества. Такая калибровочная симметрия описывается группой симметрии $U(1)$.



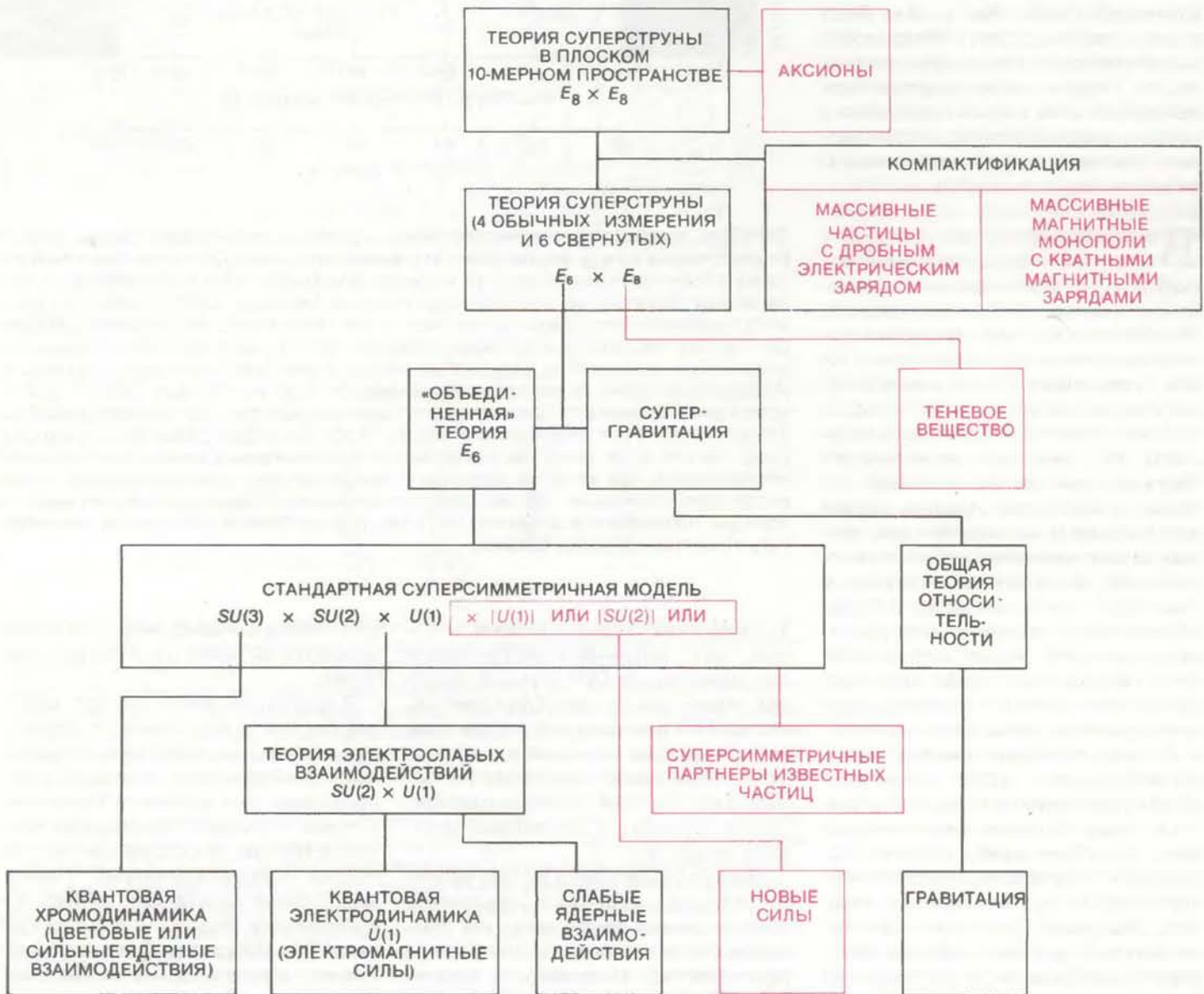
В рамках любой калибровочной теории поля имеется набор калибровочных частиц, которые переносят взаимодействия между частицами, несущими заряд. В электродинамике калибровочная частица — это безмассовый фотон со спином 1. Более общие калибровочные теории, обладающие более широкими симметриями, также включают безмассовые калибровочные частицы со спином 1. К ним относятся теория электрослабых взаимодействий и КХД. Все такие теории принято называть теориями Янга—Миллса по именам Чж. Янга из Университета шт. Нью-Йорк в Стоуни-Брук и Р. Миллса из Университета шт. Огайо. Теории Янга—Миллса описывают негравитационные силы. Наконец, даже теория гравитации Эйнштейна представляет разновид-

ность калибровочной теории, но спин ее калибровочной частицы, гравитона, равен 2.

Важным свойством симметрии является то, что она может выглядеть нарушенной: спонтанное проявление нарушения симметрии свидетельствует об изменении состояния системы частиц — так называемом фазовом переходе. Например, кусок железа при высокой температуре не намагничен, так как магнитные моменты атомов ориентированы случайным образом по всем направлениям. Поскольку отсутствует выделенное направление, система обладает симметрией относительно вращений. Когда железо охлаждается, происходит фазовый переход: магнитные моменты атомов выстраиваются вдоль

какого-то направления и железо намагничивается. Вращательная симметрия выглядит при этом нарушенной. Заметим, однако, что вращательная симметрия, которой удовлетворяют электромагнитные силы, на микроскопическом уровне остается незатронутой. Проявления нарушения симметрии характерны для системы, состоящей из большого числа частиц (в данном случае для куска железа).

Подобным же образом многие теории элементарных частиц, включая теории суперструны, опираются на широкие калибровочные группы симметрии, нужные для единого объяснения различных явлений. Обычно такие широкие симметрии проявляются при чрезвычайно высоких температурах. При обычных же земных темпе-



ТЕОРИЯ СУПЕРСТРУНЫ, основанная на широкой группе симметрии $E_8 \times E_8$, может быть связана с наблюдаемыми физическими явлениями различными способами, показанными на схеме. При учете кривизны шести свернутых измерений теория напоминает суперсимметричную теорию Великого объединения, примыкающую к супергравитации,

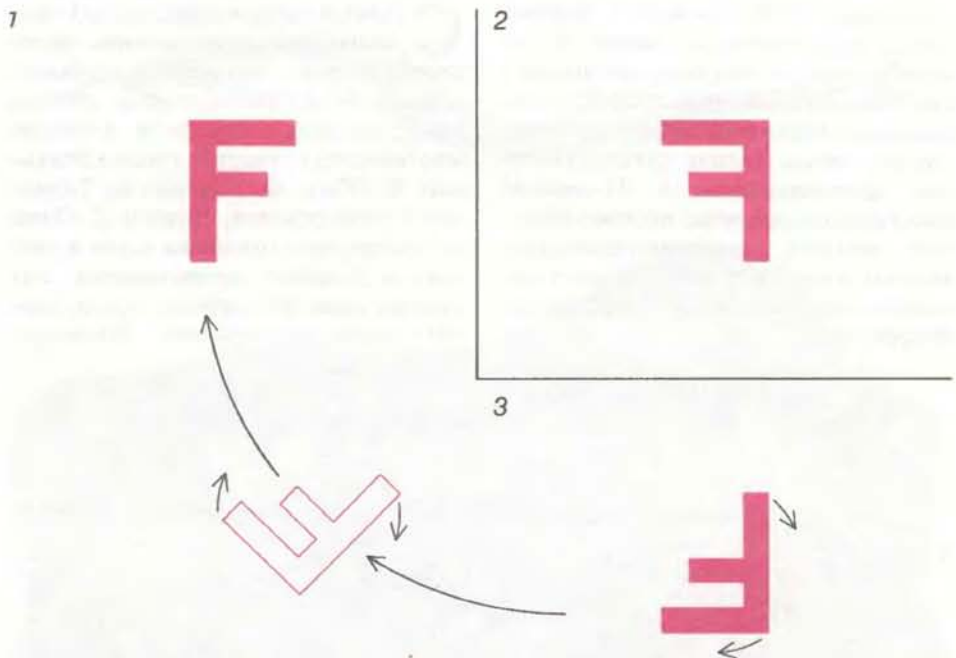
симметрия которой соответствует группе $E_6 \times E_6$. Нарушение этой симметрии приводит к стандартной модели частиц и взаимодействиям, объясняющей свойства трех негравитационных сил. Цветом показаны новые частицы и взаимодействия, существование которых требуется при некоторых интерпретациях новой теории.

ратурах эти симметрии должны быть нарушены, чтобы теория была согласована с данными наблюдений. Например, теория электрослабых взаимодействий единым образом описывает слабые и электромагнитные силы. Ее калибровочная симметрия основана на группе $SU(2) \times U(1)$, что представляет собой расширение группы $U(1)$, связанной с электромагнетизмом. При обычных температурах, однако, наблюдаются два различных взаимодействия, слабое и электромагнитное, отличающиеся по свойствам. Симметрия, позволяющая объединить оба взаимодействия, становится явной только при температурах, превышающих 10^{15} °C.

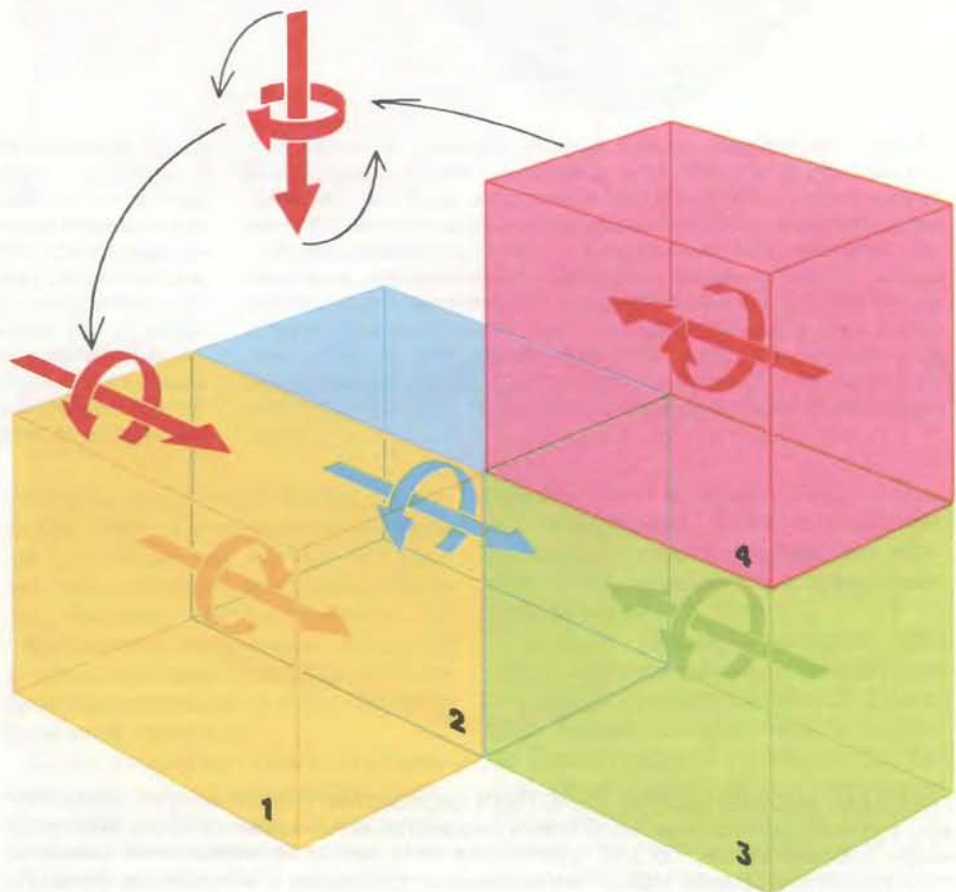
Успех квантовополевых теорий точечных частиц внес свежую струю в физику элементарных частиц, и многие ученые сосредоточили внимание на еще более честолюбивых замыслах — создании моделей, объединяющих все фундаментальные взаимодействия. Почти все подобные модели основывались не на теориях струны, а на более развитых теориях точечных частиц со «встроенными» симметриями так называемого Великого объединения. Схемы Великого объединения, в которых не учитывалась гравитация, были основаны на группах симметрий $SU(5)$, $SO(10)$ или E_6 . Эти широкие симметрии могут нарушаться до более узких симметрий, описываемых группой $SU(3)$ КХД и группой $SU(2) \times U(1)$ электрослабых взаимодействий.

Температуры, при которых могут стать важными симметрии, учитывающие квантовые гравитационные эффекты, невероятно велики: от 10^{30} до 10^{32} °C. В соответствии с современными представлениями о происхождении Вселенной такие температуры достигались только в промежутке между 10^{-43} и 10^{-38} с после Большого взрыва. Несмотря на мимолетность этого периода в развитии Вселенной, его влияние на последующую ее эволюцию было огромным. Как оказалось, физика невообразимо малых величин дает ключ к пониманию явлений космических масштабов.

Многие из новых теорий Великого объединения включают также суперсимметрию, т. е. симметрию, позволяющую превращать друг в друга бозоны и фермионы и тем самым объединяющую частицы с целым и полужелым спинами. В суперсимметричных теориях числа бозонов и фермионов, имеющих данное значение массы, равны. Недавно было предпринято несколько попыток объединить суперсимметрию с теорией гравитации Эйнштейна. Получающиеся на этом пути так называемые теории супер-



КИРАЛЬНОСТЬ не может быть определена в пространстве четного числа измерений (т. е. в нечетно-мерном пространстве-времени). Например, в двух измерениях результат последовательных отражений несимметричной буквы **F** относительно обеих координатных осей может быть воспроизведен простым вращением.



ЗЕРКАЛЬНОЕ ОТРАЖЕНИЕ всех координатных пространственных осей в пространстве нечетного числа измерений (т. е. в четно-мерном пространстве-времени) дает возможность найти киральные частицы. Например, пусть нейтрино (1) летит со скоростью света и вращается как левый винт относительно направления своего движения. Тогда его зеркальное изображение после отражения всех трех осей (4) будет вращаться как правый винт. Иными словами, это изображение нельзя получить никаким поворотом первоначального нейтрино. В природе встречаются только левоспиральные нейтрино, что и демонстрирует несимметричность фундаментальных законов физики относительно замены «левого» на «правое».

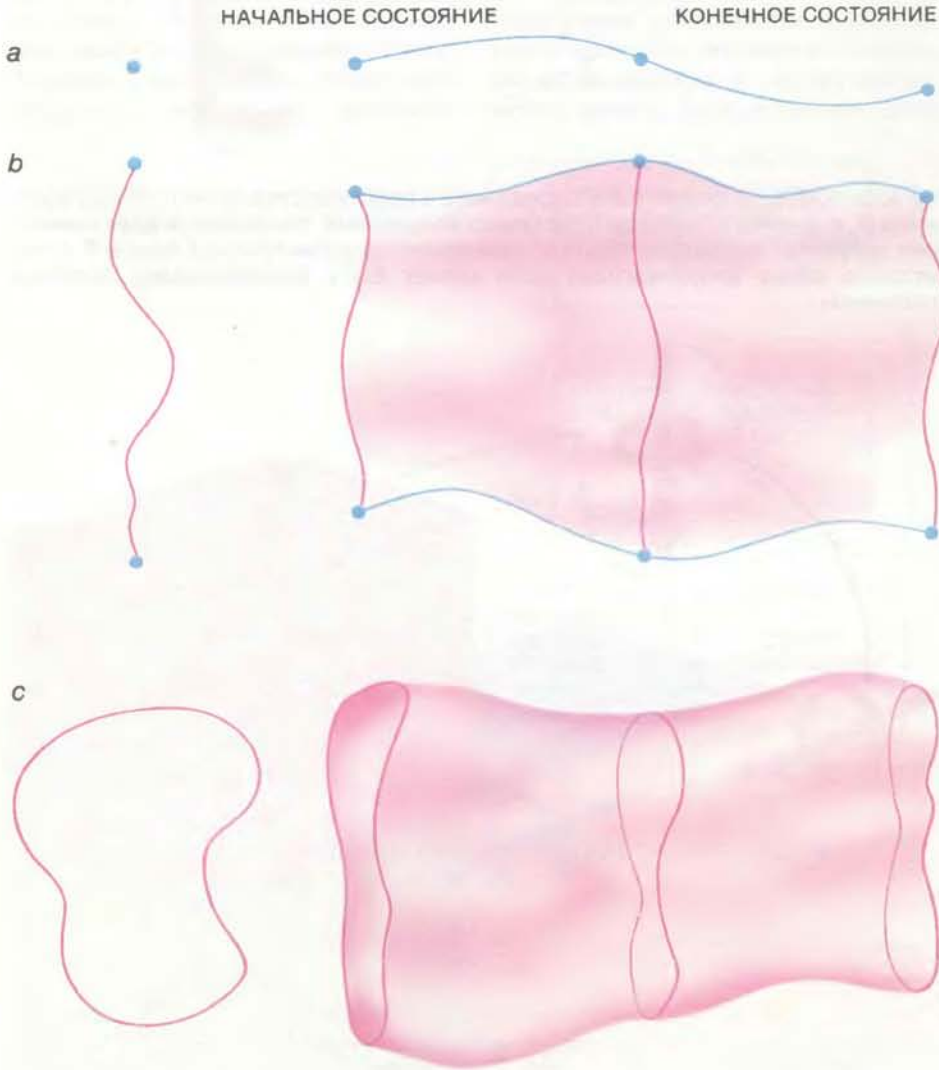
гравитации принадлежат к новому классу калибровочных теорий. В них калибровочные частицы, связанные с суперсимметрией, имеют спин $3/2$; их называют гравитино. Наиболее популярная сейчас теория супергравитации формулируется в 11-мерном пространстве-времени: помимо обычных четырех пространственно-временных измерений она включает дополнительно семь пространственных измерений.

СТОЧКИ зрения современных теоретических представлений интересен тот факт, что одно из наиболее важных открытий в теории струны было сделано в процессе изучения многомерных теорий супергравитации. В 1976 г. Ф. Глюцци из Туринского университета, Шерк и Д. Олив из Имперского колледжа науки и техники в Лондоне предположили, что теорию спиновой струны можно сделать суперсимметричной. Последст-

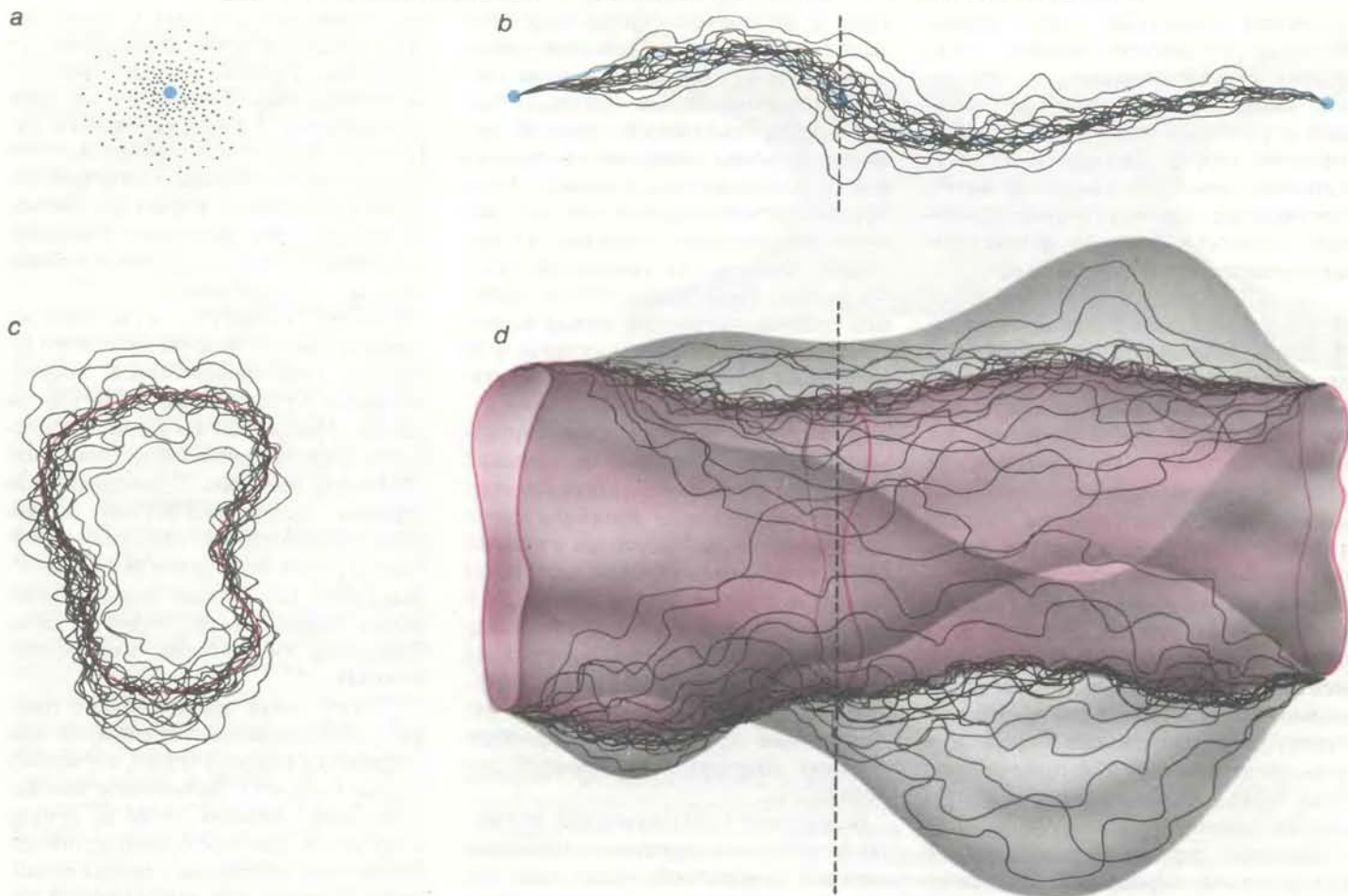
вия этого предположения тогда не были широко осознаны, и работа над теориями струны временно прекратилась. В таком «полусонном» состоянии теория пребывала до 1980 г., пока мы со Шварцем (внес вклад также Л. Бринк из Технологического института Чалмерса в г. Гётеборге) не начали изучение и построение теорий струны, обладающих пространственно-временной суперсимметрией.

Чтобы понять, почему на пути решения проблемы согласования теории гравитации с квантовой механикой встретилось столько трудностей, надо рассмотреть применение соотношения неопределенностей Гейзенберга к явлениям, происходящим на расстояниях, меньших 10^{-15} м. Согласно этому соотношению, с чем большей точностью измеряется положение системы в пространстве, с тем меньшей точностью могут быть известны ее импульс или энергия. Неопределенности в величине энергии проявляются как флуктуации на малых расстояниях. Поскольку энергия и масса эквивалентны, флуктуации энергии могут проявляться в рождении так называемых виртуальных частиц, которые появляются на короткое время из вакуума, а затем снова исчезают. «Море» виртуальных частиц порождает многочастичные эффекты, подобно эффектам, свойственным веществам, состоящим из многих атомов (например, ферромагнетикам).

Когда неопределенность положения частицы в пространстве станет меньше 10^{-15} м, флуктуации энергии будут настолько велики, что, согласно общей теории относительности, должны образоваться виртуальные черные дыры. Энергия таких флуктуаций имеет величину порядка 10^{19} ГэВ (миллиардов электронвольт), которую называют планковской энергией, а соответствующее расстояние — планковской длиной. Поэтому пространство-время на небольших расстояниях надо считать сильно искривленным; в известном смысле оно напоминает пену. Этот вывод лишает нас возможности использовать вычислительные методы обычной квантовой теории поля, поскольку он противоречит представлению о пространстве-времени как о гладкой совокупности точек. Во всех подобных вычислениях предполагается, что кривизна пространства-времени мала, в противном случае они приводят к бессмысленным бесконечно большим величинам. Отсюда следует, что для малых расстояний (т. е. для больших энергий), необходимо пересмотреть квантовую механику или общую теорию относительности (либо и то, и другое).



ПРИНЦИП НАИМЕНЬШЕГО ДЕЙСТВИЯ определяет классическую, неквантовую траекторию частицы: если время рассматривать наравне с пространственными координатами, то эта траектория есть линия минимальной длины в пространстве-времени между начальным и конечным состояниями (вверху). Аналогично, согласно принципу наименьшего действия, струна «заметает» в пространстве-времени мировую поверхность наименьшей площади. Слева показаны точечноподобная частица (а), открытая (в) и замкнутая (с) струны. Открытые струны могут нести на концах заряды (показаны синим цветом), движение которых определяет границы мировой поверхности (в середине). Замкнутые струны представляют собой петли и поэтому не имеют концов (внизу). Струна, удовлетворяющая условию наименьшего действия, может колебаться в любой суперпозиции своих нормальных гармонических мод. Так как искривления мировой поверхности вдоль двух направлений, касательных к ней, неотличимы от других ее конфигураций, физической реальности соответствуют только колебания, перпендикулярные мировой поверхности.



«СУММИРОВАНИЕ ПО ПУТЯМ» — один из способов учета вероятностной интерпретации траектории частицы в квантовой механике. Точечноподобная частица как бы одновременно движется вдоль всех возможных мировых линий в пространстве-времени. Каждому пути приписывается определенный вес, т. е. статистическая вероятность, причем самые короткие пути в пространстве-времени гораздо более вероятны. В результате возникает набор мировых линий, плотность которых максимальна вблизи классической траектории (вверху справа). Сечение мировых линий вдоль временной оси показано пунктирной вертикальной линией. Плотность мировых линий в произволь-

ной области сечения (вверху слева) определяет вероятность нахождения частицы в этой области в данный момент. Аналогично квантовая механика струн получается при рассмотрении всех возможных мировых поверхностей с одинаковыми начальным и конечным состояниями. Вес мировых поверхностей определен таким образом, чтобы поверхности наименьшей площади были гораздо более вероятны (внизу справа). Плотность замкнутых петель в данной области временного сечения мировой поверхности (внизу слева) представляет собой вероятность нахождения струны в этой области в соответствующий момент времени.

Аналогичный аргумент неприменим к струнам, поскольку теория суперструны радикально меняет предположения общей теории относительности для малых расстояний. Как отмечалось выше, теория суперструны может потребовать ревизии общей теории относительности на самом фундаментальном уровне: центральная идея теории Эйнштейна об искривленном пространстве должна быть расширена до бесконечно более богатого пространства конфигураций струны. Однако пока приходится иметь дело с примитивными моделями, в которых струны рассматриваются как независимые частицы, движущиеся в некотором заданном пространстве-времени. Даже с такой оговоркой квантовомеханическое описание струн ведет к сильным ограничениям на теорию суперструны в пространстве высших размерностей.

Рассматриваются два вида струн — открытые и замкнутые. От-

крытые струны имеют концы, с которыми связаны сохраняющиеся заряды (подобные электрическому заряду), порождающие поля Янга—Миллса. Частицы, соответствующие колебательным состояниям открытой струны, включают безмассовые калибровочные частицы со спином 1, но не включают гравитон.

Когда открытые струны сталкиваются, они могут взаимодействовать, прикасаясь и соединяясь своими концами, так что образуется третья струна. В свою очередь третья струна может разорваться, породив пару новых струн. Аналогично концы открытой струны могут соединиться, так что образуется замкнутая струна. Колебательные состояния замкнутой струны включают безмассовый гравитон со спином 2. Таким образом, в любой теории с открытыми струнами имеются также замкнутые струны и в любой теории с замкнутыми струнами нельзя пренебречь силами грави-

тации. Далее, если поля Янга—Миллса (например, электромагнитное) включены в теорию струны, они должны быть объединены с гравитационным полем.

Вариант теории, в котором поля Янга—Миллса связаны с замкнутыми струнами, сформулировали Д. Гросс, Дж. Харвей, Э. Мартинец и Р. Ром из Принстонского университета. Такая теория известна под названием гетерозисной*, и пока она является самой многообещающей из всех развитых до сих пор теорий суперструны. Ее структура весьма необычна. Заряды Янга—Миллса «размазаны» по всей гетерозисной струне. Волны могут обегать любую замкнутую струну в двух направлениях. На гете-

* От греческого heteroïdisis — гетерозис, «гибридная сила» (в биологии гетерозис характеризует повышенную жизнеспособность и плодовитость гибридов). — Прим. перев.

розисной замкнутой струне волны, бегущие по часовой стрелке, — это волны теории 10-мерной суперструны. Волны же, бегущие против часовой стрелки, — это волны первоначальной теории 26-мерной струны. Дополнительные 16 измерений интерпретируются как внутренние измерения, ответственные за симметрию взаимодействий Янга—Миллса.

ПРИ ДВИЖЕНИИ струна «заметает» двумерную поверхность в пространстве-времени, называемую мировой поверхностью по аналогии с мировой линией, прочерчиваемой точечной частицей (см. рисунок на с. 30). Согласно классической, т. е. некантовой, общей теории относительности, частица движется вдоль той мировой линии, которая минимизирует так называемое действие частицы. Грубо говоря, действие есть сумма энергий частицы по всем моментам времени. Оно пропорционально длине мировой линии, так что траектория наименьшего действия есть геодезическая, т. е. кратчайший путь между двумя точками в пространстве-времени.

Движение струны рассматривается аналогичным образом. В классиче-

ском приближении струна тоже движется так, чтобы ее действие минимизировалось. Действие в этом случае пропорционально площади поверхности, заметаемой струной, поэтому мировая поверхность должна иметь минимальную площадь. Если время рассматривается так же, как пространственные измерения, то мировую поверхность замкнутой струны можно представить в виде мыльной пленки, натянутой между первоначальным положением струны и ее конечным положением после «путешествия» в пространстве-времени.

В условии, что движение струны минимизирует площадь ее мировой поверхности, заложена широкая симметрия. Площадь — это геометрическая величина, не зависящая от способа, которым мы отличаем одну точку мировой поверхности от другой. Никакое искривление координатной сетки на этой поверхности не может изменить ее геометрию: можно сказать, что законы физики симметричны относительно произвольного преобразования координат на мировой поверхности.

Вследствие этой симметрии не имеют физического значения искривления мировой поверхности вдоль двух на-

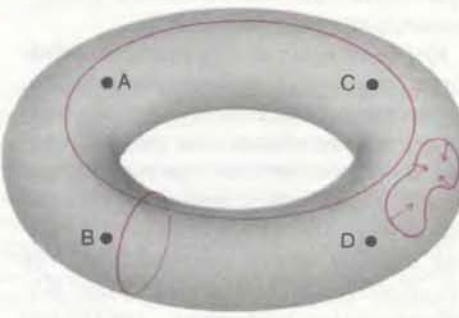
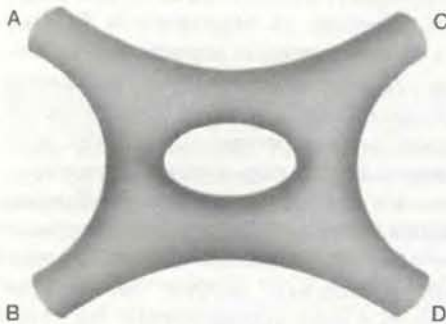
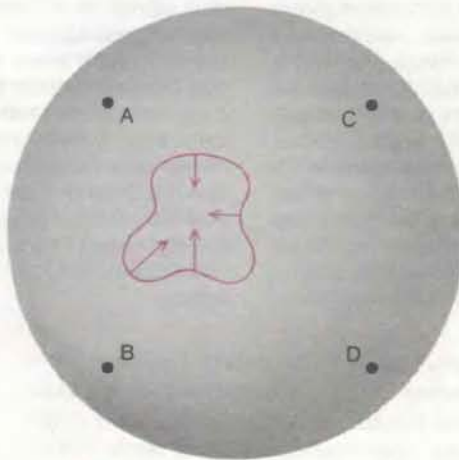
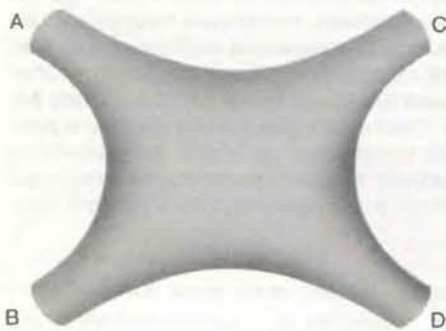
правлений, касательных к поверхности в каждой ее точке. Важны лишь те колебания струны, которые ведут к волнообразным изменениям мировой поверхности, перпендикулярным ей. Поэтому если струна движется в пространстве d измерений, то два направления колебаний не имеют физического смысла. Все физически реальные колебания — это поперечные колебания в $d - 2$ измерениях.

Следует отметить, что похожие ограничения на колебательные моды фотона (электромагнитной волны) являются отличительным признаком теории Максвелла. Не имеют физического смысла колебания фотона в направлении времени. Продольные колебания электромагнитной волны вдоль направления ее движения невозможны, если она движется со скоростью света. Отсутствие таких нефизических колебаний гарантируется калибровочной симметрией электромагнетизма.

С этой точки зрения можно ожидать непреодолимых трудностей при разработке теории струны, поскольку струна содержит бесконечное множество точек. Каждая точка на струне колеблется, так что потенциал для нефизических колебаний струны бесконечно больше, чем для точечной частицы, например фотона. Отсутствие таких колебаний гарантировано симметрией относительно преобразования координат. При квантовом рассмотрении струны та же симметрия накладывает и сильные ограничения на возможные теории струны. Именно в этом смысле теория суперструны в высшей степени элегантна.

ДО СИХ ПОР я говорил о струне как о классической частице. В квантовой механике движение частицы точно не определено. При движении в пространстве она как бы пробует любой из возможных путей между своим начальным и конечным состояниями. Каждому пути соответствует своя вероятность, причем чем большую вероятность имеет путь, тем меньше соответствующее ему действие. Классическая траектория есть наиболее вероятный путь с наименьшим действием. Такая формулировка квантового поведения частицы называется суммированием по путям; она была предложена Р. Фейнманом из Калифорнийского технологического института. Ее приложение к теории струны было наиболее полно разработано С. Мандельштамом из Калифорнийского университета в Беркли и А.М. Поляковым из Института теоретической физики им. Л.Д. Ландау АН СССР.

В теории суперструны суммирование по путям означает суммирование



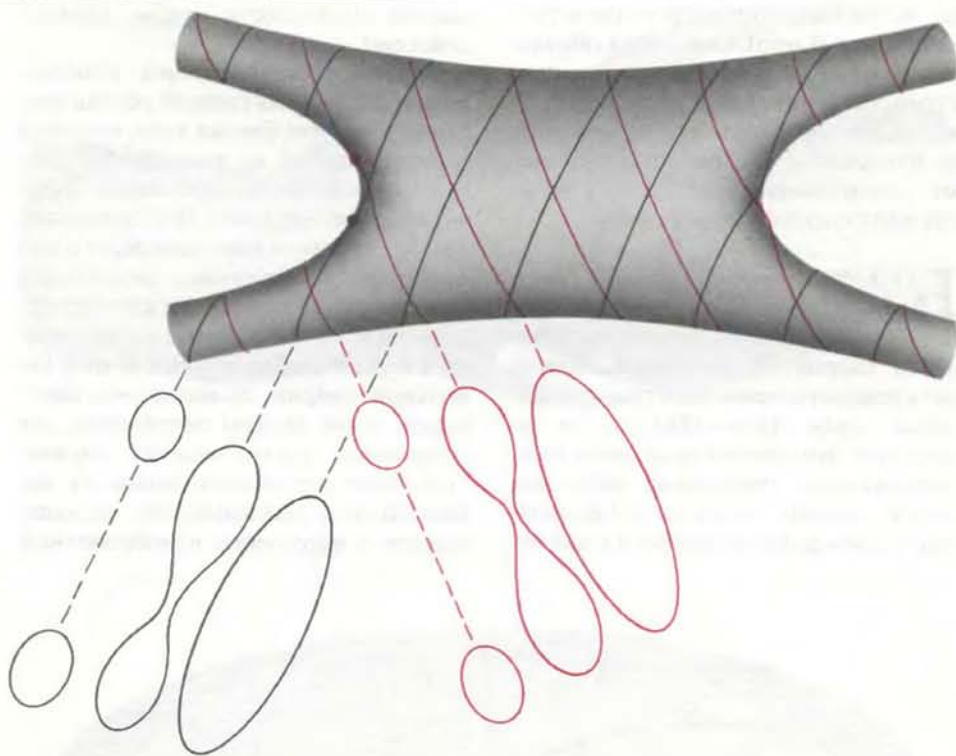
ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СТРУН изображается мировыми поверхностями, топологически эквивалентными сфере или «бублику» (тору) с произвольным числом дырок. Эти поверхности непрерывны, за исключением точек, соответствующих поглощению или испусканию струны (A, B, C, D). Сфера отличается тем, что любая замкнутая кривая на ее поверхности может быть непрерывным образом стянута в точку. Это невозможно для двух видов замкнутых кривых на торе.

по всем возможным поверхностям, соединяющим начальное и конечное состояния струны или набора взаимодействующих струн. Различные пути можно интерпретировать как флуктуации мировой поверхности, которые подобны случайным дрожаниям мыльной пленки при любой температуре, отличной от абсолютного нуля (см. рисунок на с. 31).

Важное квантовомеханическое ограничение на теории суперструны было сформулировано в 1972 г. Р. Броуером из Бостонского университета, П. Годдардом из Кембриджского университета и Ч. Торном из Университета шт. Флорида в Гейнсвилле. Оказывается, чтобы определить размерность пространства-времени, в котором движется струна, достаточно потребовать, чтобы существовала симметрия относительно преобразования координат на мировой поверхности квантовых флуктуаций свободной струны. Напомним, что в первоначальной дуально-резонансной теории размерность пространства-времени равна 26; в теории суперструны требуется 10 измерений. В 1971 г. этот результат был упомянут в работе К. Лавлейса из Университета Ратгерса. Это ограничение дает интересный пример того, как формулировка теории в терминах двумерной мировой поверхности ведет к богатой и в значительной степени предопределенной структуре пространства, в котором движется струна.

Частоты колебаний суперструны определены ее натяжением, которое измеряется энергией, приходящейся на единицу длины (или квадратом массы в естественных единицах $\hbar = c = 1$). Так как теория должна описывать гравитацию, натяжение струны связано с планковской энергией — единственным размерным параметром теории гравитации. Поэтому натяжение струны должно быть порядка $(10^{19} \text{ ГэВ})^2$, или в более известных единицах 10^{39} т. Следовательно, частоты нормальных колебаний струны разделены огромным интервалом: частицы, соответствующие низшему колебательному состоянию, безмассовые, но масса частицы, соответствующей следующей колебательной моде, почти равна массе пылинки, что чрезвычайно много для элементарной частицы. Для колебаний с высокими частотами массы соответствующих частиц беспредельно велики.

Важно, что безмассовые состояния в теории суперструны содержат не только гравитон, калибровочные частицы со спином 1, частицы со спином 0 и 1/2, но и калибровочные частицы со спином 3/2 (гравитино), свя-



МОМЕНТ, когда две струны соединяются, не может быть точно установлен, так как определение временной координаты на мировой поверхности зависит от наблюдателя. Цветные координатные линии отмечают места с одинаковым временем с точки зрения одного наблюдателя; для него две струны соединяются в цветной точке. Для другого же наблюдателя линии одинакового времени изображены черным цветом, для него струны соединяются в черной точке.

занные с супергравитацией. Поэтому при энергиях, меньших планковской, безмассовые частицы в теории суперструны совпадают с набором частиц в теории супергравитации.

КВАНТОВАЯ теория струны отличается от квантовой теории точечной частицы еще одним важным аспектом. Рассмотрим снова суммирование по путям для одиночной замкнутой струны. Оно производится по всем возможным связанным поверхностям, которые могут быть превращены в цилиндр растягиванием, перекручиванием или любой другой деформацией без разрывов. Говорят, что все такие поверхности топологически эквивалентны цилиндру; они включают поверхности с длинными «щупальцами» (см. верхний рисунок на с. 35). При определенном выборе временной координаты на мировой поверхности «щупальцы» можно интерпретировать как процессы соединения двух замкнутых струн в новую струну или процессы, когда новая замкнутая струна отделяется от первоначальной и исчезает в вакууме.

Таким образом, автоматически возникает взаимодействие струны с пространством, в котором она движется, даже если это взаимодействие не включено непосредственно в сумму по путям. Наоборот, сумма по путям

для одиночной точечной частицы не включает никакой информации о взаимодействии с окружающим пространством. Вследствие самой природы взаимодействия струны с окружающим ее пространством движение даже одиночной струны можно описать последовательно только при серьезных ограничениях на кривизну пространства. Этот результат был впервые получен в 1979 г. Д. Фриданом из Чикагского университета.

Чтобы оценить сделанный вывод, необходимо иметь в виду, что сначала вообще не предполагалось, что 10 измерений, требуемых для последовательной теории суперструны, должны быть искривлены. Теория была сформулирована в упрощающем предположении, что все 10 измерений эквивалентны, иными словами, все они «плоские». Однако если любая теория суперструны претендует хоть на какое-то описание реальности, то шесть пространственных измерений должны быть сильно искривлены. Чтобы сумма по путям мировой поверхности была непротиворечивой, шесть измерений должны быть свернуты одним из нескольких специальных способов. Именно, свернутые измерения должны образовывать так называемое пространство Калаби—Яо (названное так по именам Ю. Калаби из Пенсильванского университета и

Ш. Яо из Калифорнийского университета в Сан-Диего). Они могут образовать также обобщение такого пространства, называемое пространством орбит (orbifold). Эти пространства приводят к многообещающей схеме, описывающей реальность в четырех наблюдаемых измерениях.

БОЛЬШОЙ интерес к теории суперструны обусловлен также следствиями из требования непротиворечивости теории. Если теория должна дать реалистическое квантовое объяснение силам Янга—Миллса, то существует эмпирическое ограничение, дополняющее требование наблюдаемости только четырех измерений: эта теория должна привести к наблю-

даемой киральности слабых взаимодействий.

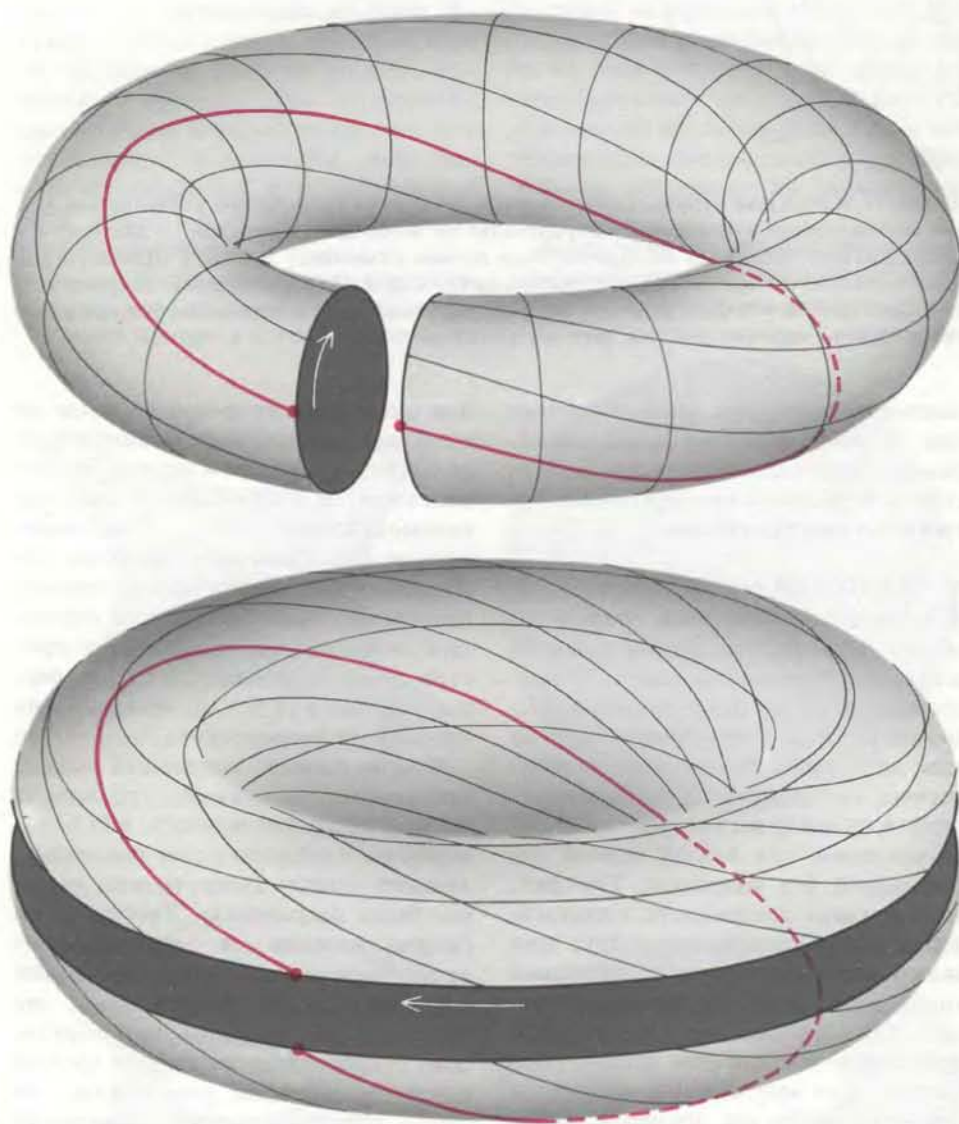
Слабые взаимодействия ответственны за радиоактивный распад (например, за бета-распад ядер, который является одной из важнейших реакций, происходящих на Солнце). Взаимодействие кирально (от греческого *χειρ* — «рука») в том смысле, что оно приводит к эффектам, зеркальных изображений которых не существует в природе. Однако квантовомеханические версии любой калибровочной киральной теории, по-видимому, нарушают такие законы сохранения, как сохранение электрического заряда. Подобные нарушения называют киральными аномалиями; они сигнализируют о нарушении калибровочной

симметрии, что делает теорию противоречивой. Построить киральную теорию в четырех измерениях, избежав при этом киральных аномалий, — дело весьма тонкое. До недавнего времени считали, что для 10-мерного пространства это вообще невозможно.

Понятие киральности можно определить только для пространства с нечетным числом пространственных измерений (или для четно-мерного пространства-времени). Киральность при любом числе измерений зависит от последовательных зеркальных отражений всех пространственных осей. Если размерность пространства нечетна, то зеркальные отражения каждой из пространственных осей дают в итоге нечетное число отражений, так что любой левосторонний объект превращается в правосторонний. Если пространство имеет четное число измерений, то совокупность отражений всех пространственных осей не изменит свойства «правого» или «левого» у любого объекта: после отражений изображение может быть совмещено с оригиналом одними поворотами. Например, популярная 11-мерная теория супергравитации не может привести к киральной теории, так как число пространственных измерений (10) четно. При девяти пространственных измерениях теория суперструны может быть киральной.

Даже если многомерная теория киральна, процесс свертывания дополнительных измерений уничтожает киральность. Сейчас считают, что наблюдаемую киральность можно объяснить, только если киральная многомерная теория с самого начала включает группу калибровочной симметрии полей Янга—Миллса в дополнение к гравитационному полю. Эта группа симметрии должна присутствовать в плоской 10-мерной теории, прежде чем будет рассматриваться возможность свертывания дополнительных измерений.

В августе 1984 г. мы со Шварцем, к удивлению многих физиков, показали, что киральную теорию, свободную от аномалий, можно сформулировать в 10 измерениях, если группа симметрии полей Янга—Миллса принадлежит одному из двух конкретных видов; это либо группа $SO(32)$ — обобщение симметрии пространства-времени на 32 внутренних измерения, либо группа $E_8 \times E_8$ — произведение двух так называемых исключительных непрерывных групп, впервые открытых французским математиком Э. Картаном. Недавно была обнаружена третья группа $O(16) \times O(16)$, которая также ведет к отсутствию аномалий; ее симметрия является подсимметрией двух упомянутых вы-



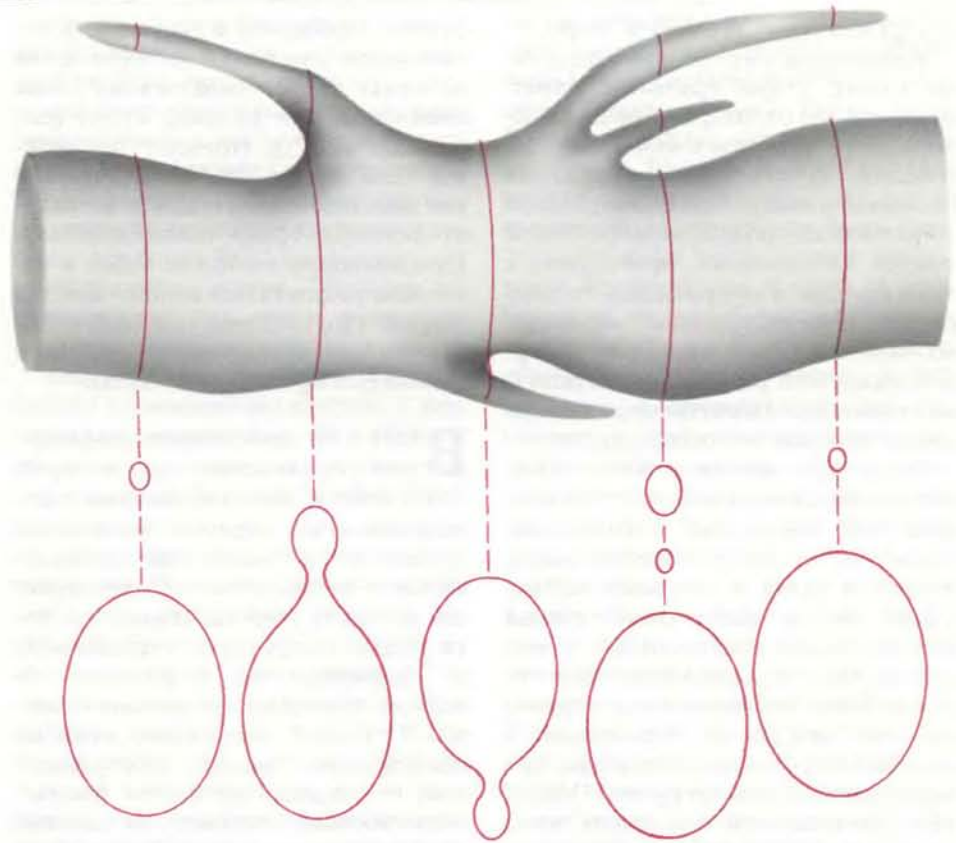
ИНВАРИАНТНОСТЬ относительно преобразования пространственно-временных координат на мировой поверхности с топологией тора приводит к более сильным ограничениям, чем на сфере. Тор можно разрезать поперек (вверху) или вдоль (внизу). Одну сторону разреза можно повернуть на полный оборот относительно другой стороны, а затем снова «склеить» с ней. Тогда на торе возникают новые системы координат (черные и цветные линии), которые нельзя путем непрерывной деформации перевести в старые координаты. Требование, чтобы теория суперструны не «чувствовала» такого переопределения координат, ведет к сильным ограничениям на группы симметрии, связанные с негравитационными взаимодействиями. Группами симметрии могут быть только $SO(32)$, $E_8 \times E_8$ или $O(16) \times O(16)$.

ше групп. Тот факт, что непротиворечивость квантовой теории ведет к почти однозначному выбору группы симметрии, является многообещающим достижением, которое и вызвало такой интерес физиков к разработке теории суперструны.

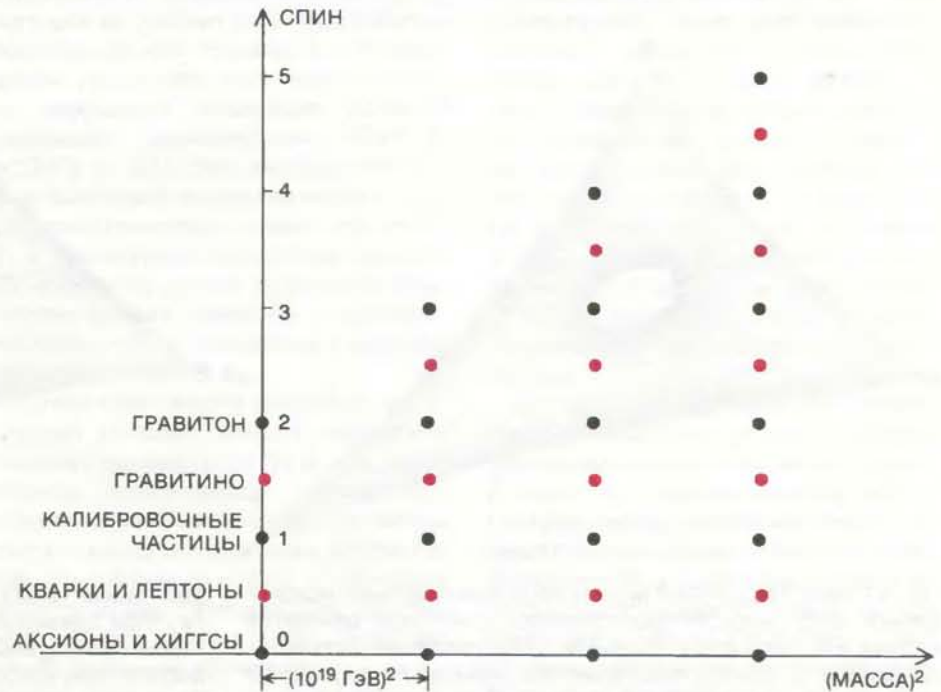
КВАНТОВАЯ механика одиночной струны есть только приближение к полной теории, пока еще не развитой. Она должна описывать взаимодействие произвольного числа струн. Взаимодействия происходят, когда струны соединяются или разрываются. Вероятность того, что данный первоначальный набор струн перейдет в данный конечный набор, определяется бесконечным числом так называемых фейнмановских диаграмм. Диаграммы описывают всевозможные соединения и разрывы мировых поверхностей, просуммированные по всем путям для каждого отдельного случая.

Простота возможного набора фейнмановских диаграмм для струн резко контрастирует со сложностью подобного набора для точечных частиц. Рассмотрим возможные диаграммы для двух взаимодействующих замкнутых струн. Во-первых, струны могут соединиться и затем снова разорваться. Фейнмановская диаграмма этого процесса топологически эквивалентна поверхности сферы (см. рисунок на с. 32). Следующий член последовательности диаграмм описывает процесс, в котором промежуточная струна разрывается на две, а затем снова восстанавливается. Эта диаграмма топологически эквивалентна тору (или поверхности «бублика»). Далее последовательность диаграмм продолжается простым добавлением дырок к «бублику».

Требование симметрии по отношению к преобразованию координат на торе приводит к новым сильным ограничениям в теории суперструны. Если разрезать тор любым из двух способов, перекрутить и снова склеить, то его топология не изменится. Однако «перекрученную» систему координат невозможно непрерывным образом превратить в первоначальную без повторного разрезания поверхности (см. рисунок на с. 34). Инвариантность тора относительно такого преобразования координат ведет к важному ограничению в теории гетерозисной суперструны. Гетерозисная суперструна может двигаться через плоское 10-мерное пространство-время лишь при условии, что симметрия негравитационных сил теории описывается одной из следующих групп: $E_8 \times E_8$, группой $spin(32)/Z_2$, являющейся разновидностью группы



КВАНТОВОМЕХАНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ мировой поверхности приводит к сильным ограничениям на вид свернутого пространства, в котором движется струна. Квантовомеханическая сумма по путям включает такие конфигурации мировой поверхности, которые описывают процессы рождения струн из вакуума (слева) или разрыва струн и их исчезновения в вакууме (справа). Поэтому взаимодействие струн с пространством автоматически учитывается при квантовом рассмотрении даже одиночной струны. С такими эффектами согласуются только пространства Калаби—Яо или родственные им пространства орбит.



СПЕКТР СОСТОЯНИЙ гетерозисной струны со свернутыми шестью измерениями пространства-времени. Каждая черная точка представляет собой набор бозонов, а каждая цветная — набор фермионов. Все состояния струны, соответствующие известным частицам, безмассовые. Состояния с ненулевой массой образуют бесконечный набор частиц, квадраты масс которых являются целыми кратными квадрата планковской массы, равной 10^{19} ГэВ. При каждом значении массы число фермионных состояний совпадает с числом бозонных состояний. Если любое возможное направление спина частицы рассматривать как отдельное состояние, то всего будет 8064 безмассовых состояний и 18 883 584 состояний с наименьшей отличной от нуля массой.

$SO(32)$ или группой $O(16) \times O(16)$.

Удивительно, что теория ограничена только этими группами. Напомним, что мы со Шварцем ранее выделили эти же группы с помощью требования об отсутствии киральных аномалий в любой непротиворечивой 10-мерной киральной калибровочной теории. Ограничения, приводящие к этим группам в гетерозисной теории, связаны с замечательными математическими свойствами некоторой 16-мерной дискретной решетки. Такие решетки строятся из 16 внутренних измерений, о которых я упоминал выше.

Существует другая и почти столь же удивительная особенность тороподобной диаграммы, которая указывает на глубокое различие между теориями струн и точечных частиц. Среди многих видов однопетлевых фейнмановских диаграмм для точечных частиц, служащих аналогами тороподобной диаграммы для струны, имеются диаграммы, приводящие к бесконечно большим величинам при вычислении суммы по путям. Подобные расходимости возникают из-за того, что в сумме учитываются и такие случаи, когда две взаимодействующие точки находятся неограниченно близко друг к другу в пространстве-времени. Надо учесть вклад в полный процесс каждого из бесконечного числа флуктуирующих путей, а это ведет к бесконечно большим величинам в

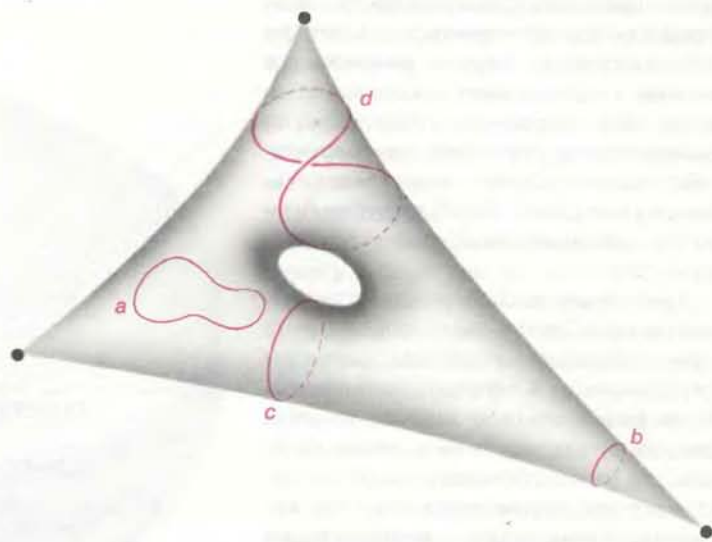
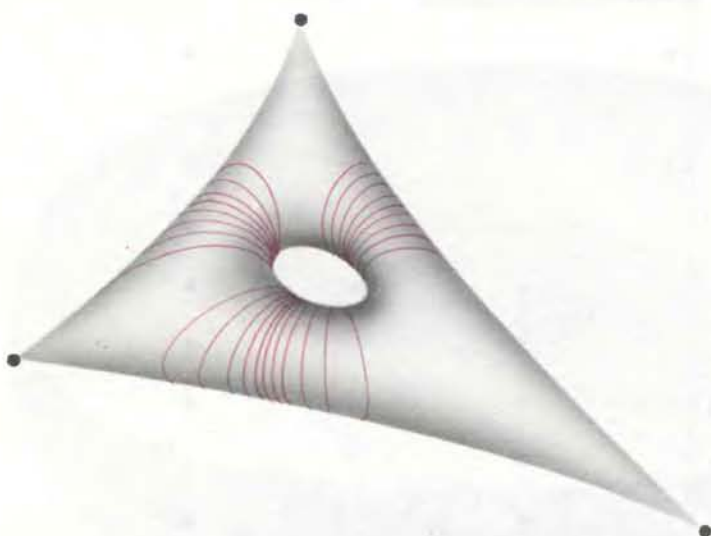
ответе. Наоборот, в струнной фейнмановской диаграмме ни одна точка не может рассматриваться как точка соединения или разрыва струн (см. рисунок на с. 33). Поэтому по крайней мере для однопетлевой диаграммы взаимодействия струн не возникает понятия точки взаимодействия. Суммирование по путям ведет к конечным результатам именно для тех теорий суперструны, где поля Янга—Миллса описываются группами симметрии $E_8 \times E_8$ или $SO(32)$.

В СЛУЧАЕ любой квантовой теории гравитации, в которой естественный масштаб энергий с необходимостью огромен, появляется трудность при выделении проверяемых или наблюдаемых предсказаний для меньших энергий. Например, хотя теория суперструны первоначально формулируется в плоском 10-мерном пространстве-времени с широкой группой симметрии, лишь на невообразимо малых расстояниях, или, что эквивалентно, при чрезвычайно больших энергиях или высоких температурах, можно пренебречь кривизной дополнительных шести измерений. Только тогда проявляется полная симметрия теории. Поэтому рискованной выглядит любая попытка вывести низкоэнергетические следствия теории, иными словами, существуют серьезные проблемы от-

носительно конкретных предсказаний. Тем не менее сейчас можно нарисовать правдоподобную картину связи теории суперструны с явлениями, наблюдаемыми в экспериментах на ускорителях.

Многие детали этой картины основаны на топологических соображениях, приложения которых к физике впервые разработаны Эдвардом Виттенем из Принстона. Виттен отметил, что свертывание дополнительных измерений и нарушение симметрии тесно связаны. Должна существовать строгая корреляция между кривизной дополнительных измерений и тем способом, каким широкая симметрия полей Янга—Миллса нарушается до более узкой симметрии. В плоском 10-мерном пространстве-времени средние значения полей Янга—Миллса, связанных с группами $E_8 \times E_8$ или $SO(32)$, равны нулю. Виттен показал, что если кривизна пространства в некоторых измерениях не равна нулю, то в тех же измерениях средние значения полей также не равны нулю.

Ненулевое среднее значение поля свидетельствует о фазовом переходе в состояние с более низкой симметрией. Точно так же ненулевая намагниченность ферромагнетика сигнализирует о переходе в менее симметричную магнитную фазу. Поэтому, когда шесть измерений первоначально пло-



ПРОСТРАНСТВО ОРБИТ может образовать сильно искривленное шестимерное пространство, в котором движется струна. Рисунки дают образное представление двумерного варианта такого пространства. Замкнутая двумерная поверхность растянута так, что образовались три острых конца, называемые коническими сингулярностями. Всюду, за исключением сингулярностей, поверхность считается плоской в том смысле, что она может быть разрезана и уложена на плоскость. Аналогично шестимерное пространство орбит является плоским всюду, за исключением изолированных конических сингулярностей; в этих точках его кривизна бесконечна. Дырка в центре поверхности означает, что пространство орбит не является «просто связным»: можно провести такой разрез, что оно не разделится на две отдельные части. Дырки приводят к захвату сило-

вых линий электромагнитного потенциала, связанного с группой симметрии E_6 (цветные линии слева). В результате симметрия E_6 нарушается до более низкой симметрии, подобной тем, которые лежат в основе стандартной модели. Замкнутая струна в пространстве орбит (справа) может двигаться свободно (a), но она может быть захвачена различными способами. Если она навита на коническую сингулярность, то кривизна помешает ее высвобождению (b). Ее можно также обмотать вокруг поверхности сквозь дырку (c) или протернуть сначала в дырку, а затем навить на коническую сингулярность (d). Пропущенная сквозь дырку струна может привести к существованию массивных частиц с дробным электрическим зарядом или массивных магнитных монополей с кратными магнитными зарядами.

ского пространства-времени сильно свертываются, поля Янга—Миллса результирующей теории в искривленном пространстве обладают подсимметрией групп $E_8 \times E_8$ или $SO(32)$. Этот результат и хотелось получить.

До сих пор не доказано, что именно шесть пространственных измерений в теории суперструны должны свернуться. Однако, как отмечалось выше, требование симметрии теории относительно преобразования координат на мировой поверхности вынуждает свернутые измерения образовать пространство Калаби—Яо или, возможно, пространство орбит. Предполагая, что шесть измерений свертываются таким образом, Ф. Канделас из Техасского университета в Остине, Г. Горовиц из Калифорнийского университета в Санта-Барбаре, Э. Строминджер из Института высших исследований в Принстоне и Виттен разработали весьма наглядную схему, которая позволяет понять, как теория суперструны связана с явлениями, наблюдаемыми при доступных в настоящее время энергиях.

В СХЕМЕ Канделаса и его коллег среднее значение электрического поля, связанного с группой $E_8 \times E_8$, полагается равным ненулевому значению кривизны шестимерного пространства. Вследствие специальных свойств пространств Калаби—Яо (или соответствующих пространств орбит) симметрия нарушается определенным образом и сводится к группе $E_6 \times E_6$ при все еще сохраняющейся суперсимметрии. Получение на таком пути группы E_6 внушает доверие, так как это одна из групп, изучавшихся при попытках Великого объединения полей Янга—Миллса.

Дополнительный ненарушенный групповой множитель E_8 очень сильно расширяет группу симметрии, но это не влияет непосредственно на наблюдаемые частицы. Частицы, связанные с дополнительной группой симметрии E_8 , нейтральны по отношению к наблюдаемым полям Янга—Миллса, но должны испытывать гравитационное притяжение. Выдвинута гипотеза, что вещество, состоящее из таких частиц (его называют «теневым» веществом), отвечает за часть скрытой массы Вселенной.

Одно из прямых следствий данной интерпретации теории суперструны — существование частицы, называемой аксионом. Существование аксиона было постулировано, чтобы избежать нарушения важной симметрии в теории сильных взаимодействий (КХД). Хотя аксион пока не обнаружен, несколько экспериментальных групп планируют его дальнейшие поиски.

Многие другие физические следствия вытекают из чисто топологических свойств шести свернутых измерений. Например, одним из основных топологических свойств пространства является эйлерова характеристика. Если бы свернутое пространство было двумерным, эйлерова характеристика равнялась бы 2 за вычетом удвоенного числа дырок. Эйлерову характеристику для шести измерений определить уже не столь просто.

Наблюдаемые фермионы группируются в «поколения» кварков и лептонов (см. рисунок на с. 26). (Лептоны — это фермионы, не участвующие в сильных взаимодействиях.) Пока открыты три поколения, и, возможно, существует еще не более одного поколения. Предсказываемое теорией число поколений равно половине эйлеровой характеристики шестимерного компактного пространства. Так как лишь немногие из известных пространств Калаби—Яо и пространств орбит имеют небольшое значение эйлеровой характеристики, число кандидатов на описание наблюдаемых физических явлений резко сокращается.

Известные шестимерные пространства с небольшим значением эйлеровой характеристики также имеют «дырки» (см. рисунок на с. 36). В присутствии дырок поля, связанные с группой симметрии E_6 , могут попадать в «ловушки». Это приводит к дальнейшему нарушению симметрии, которое не требует массивных частиц Хиггса, обычно вводимых для нарушения симметрии. В результате такого нарушения симметрии остается групповое произведение $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$, описывающее симметрии квантовой хромодинамики и теории электрослабых взаимодействий, т. е. симметрии стандартной физики. По-видимому, то же нарушение симметрии может привести к дополнительным силам, связанным с другими остатками группы E_6 .

Существует много способов, с помощью которых можно поймать в ловушку замкнутую струну в искривленном пространстве. Например, струна может навиться на тор сквозь дырку; тогда ее колебания проявятся как массивные частицы с дробным электрическим зарядом или массивные магнитные монополи с кратными магнитными зарядами.

ХОТЯ теория суперструны открывает много направлений исследований как в области физики, так и математики, имеются фундаментальные вопросы, на которые нельзя ответить без более углубленного ее понимания. Например, почему наблюдаемое пространство-время четырехмерное и приблизительно плоское? Мож-

но ли доказать, что свертываются шесть измерений? Можно ли объяснить, почему четыре известных измерения столь велики? Сразу после Большого взрыва, когда размер наблюдаемой Вселенной был порядка планковской длины (10^{-35} м), все 10 измерений должны были быть свернуты. Во время последующего расширения Вселенной все измерения, кроме шести, должны были развернуться и расширяться. Непротиворечивое объяснение этого процесса может привести к предсказанию его последствий, доступных наблюдению.

Эти проблемы тесно связаны с другими фундаментальными вопросами. Почему космологическая константа столь близка к нулю? Эта константа ответственна за ту часть кривизны Вселенной, которая не вызывается присутствием вещества. Найдено, что отношение космологической постоянной к ее «естественному» планковскому значению отличается от нуля не более чем на 10^{-120} . Если теория суперструны сможет объяснить столь малое отношение, то это станет убедительной проверкой теории.

Как отмечалось выше, естественный масштаб масс в теории суперструны так велик, что по сравнению с ним пренебрежимо малы массы даже самых тяжелых частиц, получаемых на современных ускорителях. До тех пор пока остается ненарушенной суперсимметрия, включенная в теорию суперструны, массы всех наблюдаемых ныне частиц будут равны нулю. Малые ненулевые массы частиц связаны с нарушением суперсимметрии при сравнительно низких температурах нашего мира. Тем не менее имеются сильные аргументы в пользу того, что нарушение суперсимметрии и, следовательно, точные значения масс частиц, получаемых на ускорителях, не могут быть объяснены в рамках современной формулировки теории суперструны.

Для решения этих проблем необходимо, по-видимому, понять глубокие принципы, лежащие в основе теории. В известном смысле имеется резкий контраст между развитием теорий суперструны и общей теории относительности. Вся структура общей теории относительности возникла как следствие глубокого понимания Эйнштейном логики физических законов. В теориях суперструны вначале появились лишь отдельные детали: мы все еще только нащупываем пути проникновения в логику теории. Например, присутствие гравитона и калибровочных частиц, существование которых следует из теории суперструны, представляется случайным и даже таинственным. Хотелось бы, чтобы они возникали в теории более

естественным образом после того, как будут хорошо установлены ее основные принципы.

КАК же можно обнаружить внутреннюю логику теории суперструны? Принципы общей теории относительности должны быть частным случаем более глубоких принципов теории суперструны, так что в известном смысле общая теория относительности может служить здесь путеводной звездой. Например, развивая аналогию с общей теорией относительности, я объяснял выше, каким образом теория суперструны должна расширить понятие обычного пространства-времени до пространства

всех возможных конфигураций струны. Эта идея сейчас интенсивно разрабатывается. Даже более радикальным является предположение, что теорию следует изучать исключительно в ее двумерной формулировке: вообще не должны использоваться координаты пространства и времени, в котором мы живем.

Каким бы путем ни разрешились эти альтернативы, углубленное понимание логического статуса теории, без сомнения, приведет к серьезным физическим и математическим проблемам. Оно должно также привести к лучшему пониманию предсказаний теории суперструны.

Наука и общество

Опасные средства защиты

В США в личном владении находится 120 млн. единиц огнестрельного оружия; почти каждая вторая семья располагает по меньшей мере одной такой единицей. Около половины из них — пистолеты. Желание иметь дома пистолет наиболее часто объясняется необходимостью защищать дом от посягательств посторонних лиц. Исследование, проведенное в графстве Кинг, шт. Вашингтон, показывает, что такая предусмотрительность имеет свою оборотную сторону.

Исследователи выяснили, что на каждый случай, когда пистолет, хранящийся в доме, был действительно применен для «самообороны» и привел к смертельному исходу, приходится в среднем 1,3 случая смерти, вызванной неосторожным обращением с оружием, 4,6 убийства (главным образом, родственника или друга) и 37 самоубийств. Исследование было проведено А. Келлерманом, работавшим в Медицинской школе Вашингтонского университета, и Д. Реем, медицинским экспертом графства Кинг. Результаты исследования приведены в журнале "The New England Journal of Medicine".

Для сбора данных авторы изучили все случаи смерти от огнестрельных ран, имевшие место на протяжении шести лет (1978 — 1983 гг.) в графстве Кинг. (Согласно переписи 1980 г., численность населения графства составляла 1270 тыс. человек, из них 88,4% белых, а 92% городских жителей; следует учесть, что в графство

входит город Ситл.) Всего собраны свидетельства о 743 таких случаях, из которых 398 (54%) имели место в доме, где хранилось оружие. Оказалось, что лишь в двух из 398 случаев жертвами стали посторонние лица, пытавшиеся проникнуть в дома. Если исключить самоубийства, случаев применения пистолета против члена семьи было в 18 раз больше, чем использования его против грабителей. Против друзей или знакомых это же оружие было применено в 12 раз чаще, чем против посторонних лиц. Более 80% убийств произошло во время спора или ссоры.

Келлерман и Рей приходят к выводу, что «хранение дома оружия создает дополнительные факторы риска», включая ранения и смертные случаи, вызванные неосторожным обращением с огнестрельным оружием, убийства во время домашних ссор, а также «доступность быстрого и надежного средства покончить с собой». В свете этих результатов авторы задаются вопросом: «действительно ли огнестрельное оружие, хранящееся в доме, обеспечивает семью надежной защитой, или же оно ставит ее в более опасное положение?»

Радон и его родственники

НАВЕРНОЕ, почти во всех случаях угроза здоровью городских жителей промышленно развитых стран исходит от объектов, созданных человеком. Нас все время осведомляют об опасностях, которые

могут нести человеку транспорт, промышленное производство и, наконец, атомные электростанции. Однако основную дозу ионизирующего излучения большинство людей в течение своей жизни получают из источника не искусственного происхождения. Им является радон — радиоактивный газ, выделяющийся из земных пород в процессе распада урана, содержащегося в этих породах. Некоторые эпидемиологи и специалисты по изучению окружающей среды считают, что радон может вызывать заболевание раком легких у людей, которые ведут абсолютно безопасное существование, если не считать того, что они живут в домах, построенных на таких породах. Поскольку риск может оказаться велик, эти ученые призывают к немедленным санитарно-гигиеническим мероприятиям. Другие исследователи настаивают на том, что, прежде чем принимать серьезные меры, необходимо собрать больше информации.

В нагромождении противоречивых аргументов можно увидеть несколько фактов, в целом признанных достоверными. Радон является одним из промежуточных продуктов радиоактивного распада, который начинается с превращения урана в торий и заканчивается образованием стабильного изотопа свинца. Этот газ непрерывно выделяется из земли, так как уран содержится практически во всех породах и почвах. Радон быстро распадается. Однако внутри зданий, куда он проникает через мельчайшие трещины в фундаменте, по канализационным трубам и стенам, радон может накапливаться в концентрациях, которые в десятки, сотни и даже тысячи раз превосходят его концентрацию на открытом воздухе.

Сам радон не создает большой непосредственной радиационной опасности. Хотя газ испускает радиоактивные лучи (в виде альфа-частиц), которые могут вызывать перерождение нормальных клеток в раковые, он не остается в опасной близости от легочной ткани достаточно долго: радон не вступает в химические реакции, и поэтому, попадая в легкие при вдохе, быстро покидает организм с выдыхаемым воздухом или уносится из легких кровью. Основным источником радиоактивного излучения, которое поражает легкие, являются продукты распада радона (главным образом, изотопы полония). Эти изотопы химически активны. Они оседают на стенках бронхов в элементарной форме или находясь на мельчайших атмосферных частицах и в этом случае в течение продолжительного времени облучают живую ткань.

Первые подозрения, что радон в потенциально опасных концентрациях может просачиваться из земли в здания, зародились после измерений, проведенных в середине 70-х годов в новых хорошо изолированных домах в Швеции. Озабоченное этим открытием министерство энергетики США начало субсидировать программы по измерению содержания радона внутри зданий, учитывая тот факт, что меры, направленные на экономию энергии, такие, как строительство домов с замкнутым циклом, могут привести к неприятным последствиям: сами того не желая, американцы начнут строить «радоновые ловушки». Энергетически экономичные дома проектируются так, чтобы свести к минимуму интенсивность вентиляции (т. е. скорость обмена воздухом между внешней средой и помещением), поэтому можно ожидать, что в таких домах содержание радона будет выше.

Часть энергетически экономичных домов, как показали наблюдения, действительно содержала радон в больших концентрациях, однако вскоре обнаружилось много старых ветхих домов также с высоким содержанием радона. В настоящее время большинство исследователей сходятся на том, что вентиляция играет не столь важную роль. М. Айзенбуд из Медицинского центра Нью-Йоркского университета полагает, что ошибочный вывод о связи интенсивности вентиляции с концентрацией радона стал возможен, вероятно, в силу того что «переход к программам по экономии энергии в жилищах совпал по времени с разработкой методов по измерению концентрации радона на местах». А. Неро из Лоуренсовской лаборатории в Беркли утверждает, что, по всем данным, параметром, который наилучшим образом объясняет широкий диапазон уровней содержания радона в домах (концентрации этого газа в отдельных домах могут различаться в 1000 раз), следует считать не интенсивность вентиляции, а скорость поступления газа в дома. Распространяться радон внутрь домов заставляет главным образом разница в давлениях воздуха вне и внутри дома, поскольку давление в почве обычно несколько выше, чем давление внутри здания. Кроме того, градиент давления может возникать благодаря ветру и разнице температур, поскольку в доме температура выше, чем снаружи.

Вооруженные этими фактами исследователи смогли предложить несколько мер по уменьшению количества радона, проникающего в дома: от герметизации фундаментов зданий до уменьшения давления воздуха в

почве за счет всасывающих вентиляторов. Однако до того, как государственные службы смогут приступить хотя бы к рассмотрению вопроса об активных действиях по разработке санитарно-гигиенических мер, они должны знать, действительно ли проблема настолько серьезна, чтобы принимать такие меры. Эта сторона проблемы скрыта под покровом неопределенности.

Самые первые свидетельства, устанавливающие связь между облучением человека, находящегося вблизи от источников радона (и его дочерних продуктов), и заболеванием раком легких, получены на основании результатов обследований, проведенных эпидемиологическими службами среди горняков, которые 20—30 лет назад работали на урановых рудниках и для которых степень облучения, вызванного радоном, может быть оценена лишь приблизительно. Для того чтобы анализировать такие данные, необходимо выделить и учесть другие факторы, которые могут влиять на смертность и частоту заболеваний среди обследуемой группы населения. В некоторых случаях учет курящих лиц и влияния канцерогенов на рабочих местах приводит к тому, что на долю радона остается небольшой процент заболеваний раком легких.

Эти исследования усложняются также в связи с тем, что, согласно данным наблюдений, совместный эффект курения и вдыхания воздуха, в котором велико содержание радона, приводит к гораздо худшим последствиям, чем каждый фактор, взятый по отдельности. Айзенбуд полагает, что роль такого синергического действия в начальной стадии заболевания раком легких до недавнего времени недооценивалась, но соглашается с тем, что эпидемиологические данные являются «неплохой отправной точкой».

Учитывая ограниченность этих данных, специалисты обратились и к другим исследованиям. Результаты опытов на животных, похоже, согласуются с эпидемиологическими данными, указывая на линейную связь между дозой радиоактивного облучения, в котором повинен радон, и частотой заболевания раком легких. Если в качестве отправных данных взять высокую частоту заболеваний раком легких и высокий уровень облучения среди рабочих урановых рудников и экстраполировать эти данные линейно назад до тех значений концентрации радона, которые обнаруживаются в жилых домах, то для США в расчете на год мы получим оценку в 10 тыс. случаев заболеваний раком легких, обусловленных воздействием радона, что соответствует примерно 10% всех

случаев этого заболевания.

Однако некоторые исследователи сомневаются в правомерности такой экстраполяции. Б. Кохен, который возглавляет в Питтсбургском университете программу по измерению содержания радона в жилых домах, пришел к иному выводу, хотя и носящему предварительный характер. Он считает, что в диапазоне значений концентрации радона, которые характерны для большинства домов и, как правило, намного ниже значений, наблюдающихся на урановых рудниках, линейная зависимость числа заболеваний от дозы облучения не сохраняется. Идя вразрез с мнением большинства радиобиологов, Кохен высказывает предположение, что при содержании радона, меньшем определенного значения, частота заболеваний раком легких мало зависит от облучения.

Неро сомневается, что на основании одних эпидемиологических данных вообще возможно продемонстрировать влияние радона на здоровье населения. Он считает, что при тех уровнях концентрации радона, которые наблюдаются в домах, любые случаи превышения числа заболеваний раком легких над нормальными значениями будут скрыты среди многочисленных «фоновых» случаев, имеющих причиной курение и воздействие других канцерогенов. Тем не менее, считает он, радон — «это, бесспорно, наиболее надежно выявленный агент, вызывающий, по всей вероятности, заболевание людей раком наряду с химическими канцерогенами, которые уже попали в список веществ, подлежащих контролю».

Неясным остается и вопрос о том, насколько распространена эта опасность: число домов, в которых присутствует хоть сколько-нибудь радона, остается неизвестным. В докладе Центрального статистического бюро указывается, что дома, содержащие радон, обнаружены почти в каждом штате. До последнего времени, однако, данные по содержанию радона в домах систематически не собирались, а выборка зданий, где проводились измерения, может не давать реального распределения содержания радона на территории США. Для того чтобы облегчить ситуацию, Управление по охране окружающей среды США собирается провести наиболее полное, по мнению официальных лиц, обследование содержания радона в жилищах. Предусматривается проведение в течение одного года измерений содержания радона в случайно выбранных жилых зданиях в масштабах всей страны с применением подходящей техники измерений.

Гематоэнцефалический барьер

Капилляры мозга отличаются от капилляров других органов.

Их особые свойства создают между кровью и мозгом надежную преграду, обладающую строго избирательной проницаемостью

ГАРИ У. ГОЛДСТЕЙН, А. ЛОРРИС БЕЦ

У ЧЕЛОВЕКА и других сложных организмов само существование зависит от гомеостаза, т. е. от поддержания постоянства внутренней среды. Нигде эта зависимость не выражена так, как в мозгу. В других участках тела внеклеточная концентрация гормонов, аминокислот и ионов, например ионов калия (K^+), подвержена частым небольшим изменениям, особенно после приема пищи или физической нагрузки. Если бы такие флуктуации происходили в мозгу, это сопровождалось бы неконтролируемой нервной активностью, поскольку некоторые гормоны и аминокислоты играют роль нейромедиаторов, а ионы K^+ влияют на порог активации нейронов (нервных клеток). Следовательно, мозг должен быть надежно изолирован от временных изменений состава крови.

Как же это осуществляется? Ответ был найден в результате изучения капилляров, снабжающих кровью ткани мозга. Структура их уникальна. В капиллярах мозга, в отличие от капилляров других органов, эндотелиальные клетки образуют непрерывную стенку, не позволяющую проникать в мозг многим веществам. Непрерывный эндотелий капилляров является основой так называемого гематоэнцефалического барьера, существование которого было впервые убедительно доказано в 60-х годах нашего столетия. Жизненно важная функция гематоэнцефалического барьера заключается в создании своего рода кордона между мозгом и прочими тканями, исключаящего проникновение в мозг одних веществ и пропускающего другие. Действительно, если бы изоляция мозга была полной, то ткани мозга погибли бы без питательных веществ. К счастью, незаменимые питательные вещества легко проникают сквозь барьер при помощи специальных транспортных систем, специфически узнающих определенные молекулы и переносящих их в мозг.

В последние годы многие исследования гематоэнцефалического барьера, включая работы авторов этой статьи, были сосредоточены на изучении транспортных систем. В итоге стало ясно, что существует несколько различных типов переносчиков, каждый из которых выполняет свою специфическую функцию. Транспортные системы не только переносят питательные вещества в мозг, но и откачивают из него продукты отхода и избыток ряда веществ, обеспечивая тем самым постоянство среды вокруг нейронов. Используя новейшие методы выделения капилляров мозга, мы идентифицировали ряд переносчиков, локализованных в стенках капилляров. Полученные нами данные вместе с результатами других исследователей позволили подойти к пониманию механизмов гематоэнцефалического барьера, создающих необходимое для работы мозга постоянство условий. Это важно не только для фундаментальной биологии, но и для медицины, поскольку при лечении заболеваний мозга приходится нарушать целостность барьера.

Концепция барьера

Современные представления о гематоэнцефалическом барьере сложились в результате многолетних исследований. Сама концепция барьера появилась в конце XIX в., когда немецкий бактериолог Пауль Эрлих обнаружил, что при внутривенном введении некоторых красителей мелким животным, прокрашиваются все органы, за исключением мозга. Эрлих объяснил свои наблюдения тем, что по сравнению с другими тканями мозг обладает меньшим сродством к этим красителям. В 1913 г. ученик Эрлиха Э. Голдман установил, что его руководитель неправ. Голдман инъецировал краситель (трипановый синий)

кроликам и собакам непосредственно в спинномозговую жидкость. При этом краситель легко прокрашивал весь мозг, но не проникал в кровяное русло и внутренние органы не окрашивались. Таким образом, Голдман показал, что центральная нервная система отгорожена от крови неким барьером.

Открытие Голдмана несколько прояснило для физиологов интересные, но загадочные результаты, полученные ранее другими исследователями. Еще в 1898 г. А. Бидл и Р. Краус обнаружили, что желчные кислоты не оказывают нейротоксического действия, если ввести их внутривенно, но инъецированные прямо в мозг, они вызывают судороги и кому (оцепенение). Через два года М. Левандовский наблюдал аналогичную картину при инъекциях ферроцианида натрия. В своей интерпретации полученных результатов эти три исследователя проявили завидную прозорливость: они предположили, что мелкие кровеносные сосуды мозга обладают особой проницаемостью.

Гипотеза о том, что капилляры мозга являются анатомической основой барьера, постулированного Голдманом, долгие годы не имела экспериментального подтверждения. В начале века не существовало адекватных методов для исследования ультраструктуры кровеносных сосудов. В 50-х годах появился инструмент для такого анализа — электронный микроскоп, и вскоре он был применен к изучению капилляров мозга. Результаты электронной микроскопии показали, что клетки эндотелия, выстилающие просвет капилляра, соединены между собой так называемыми непрерывными плотными контактами, так что между клетками нет щелей. Каждая животная клетка, как правило, заключена в свою собственную наружную мембрану, состоящую из двух слоев. В местах плотного контакта внешние слои мембран двух соседних

клеток сливаются, так что клетки оказываются физически соединены.

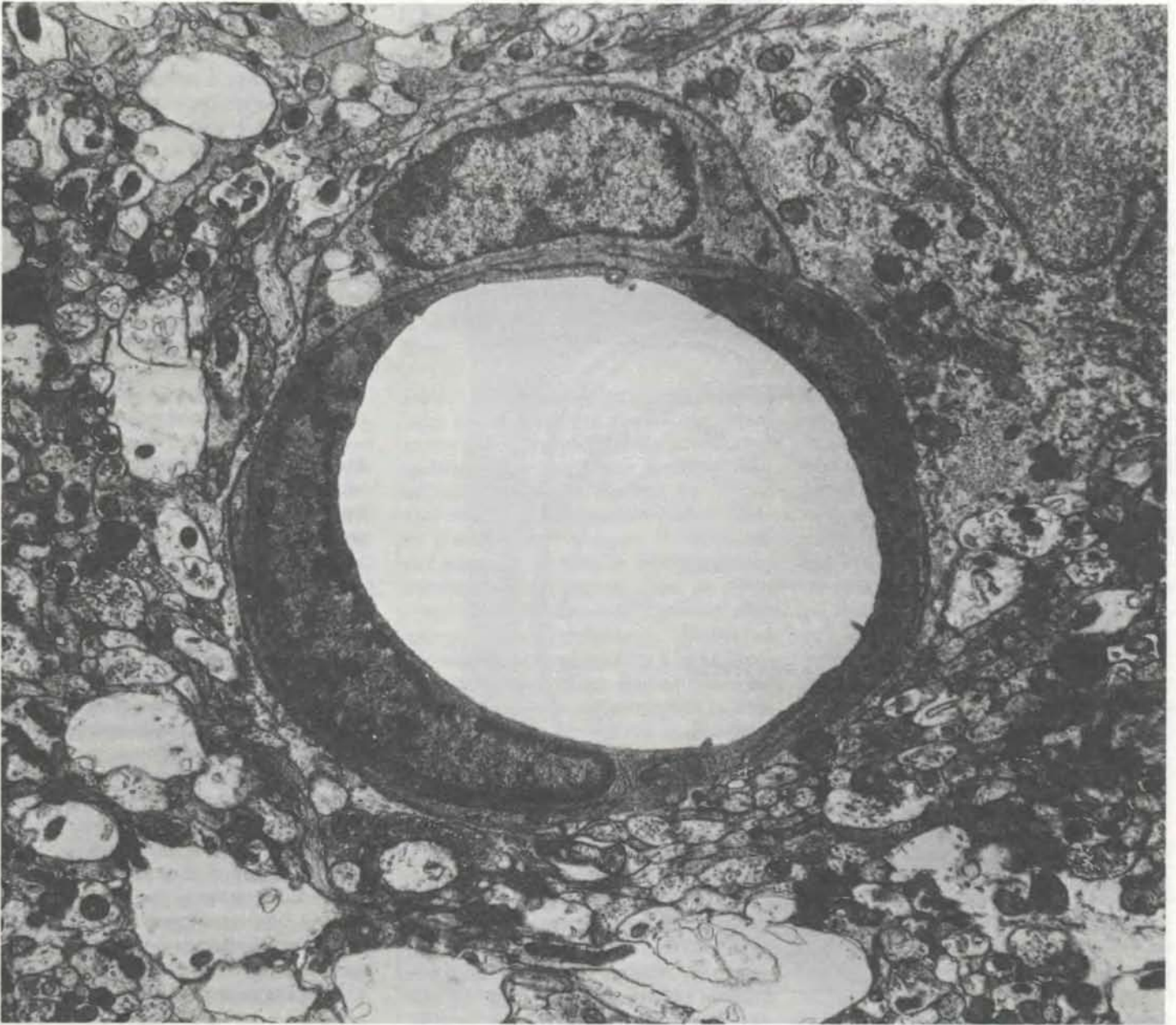
Непрерывные плотные контакты — не единственная особенность кровеносных сосудов мозга. В некоторых органах в эндотелии капилляров имеются «поры», или каналы, пронизывающие весь слой; в эндотелии сосудов мозга такие каналы отсутствуют. Кроме того, капилляры мозга почти полностью окружены отростками клеток мозга, известных под названием астроцитов. Астроциты — это одна из разновидностей многочисленного класса глиальных клеток; глиальные клетки выполняют различные функции, в частности некоторые из них формируют миелино-

вую оболочку нервных волокон. Поскольку астроциты обхватывают капилляры своими отростками, в ранних исследованиях предполагалось, что эти клетки и образуют гематоэнцефалический барьер, но в дальнейшем эта гипотеза не подтвердилась. Функция астроцитов до сих пор остается предметом дискуссии.

По мере накопления информации об ультраструктуре капилляров стало ясно, что в мозгу не все микрососуды обладают упомянутыми характерными чертами. В шести-семи небольших областях мозга были обнаружены пронизывающие эндотелий щели или каналы, обеспечивающие проникновение веществ из крови

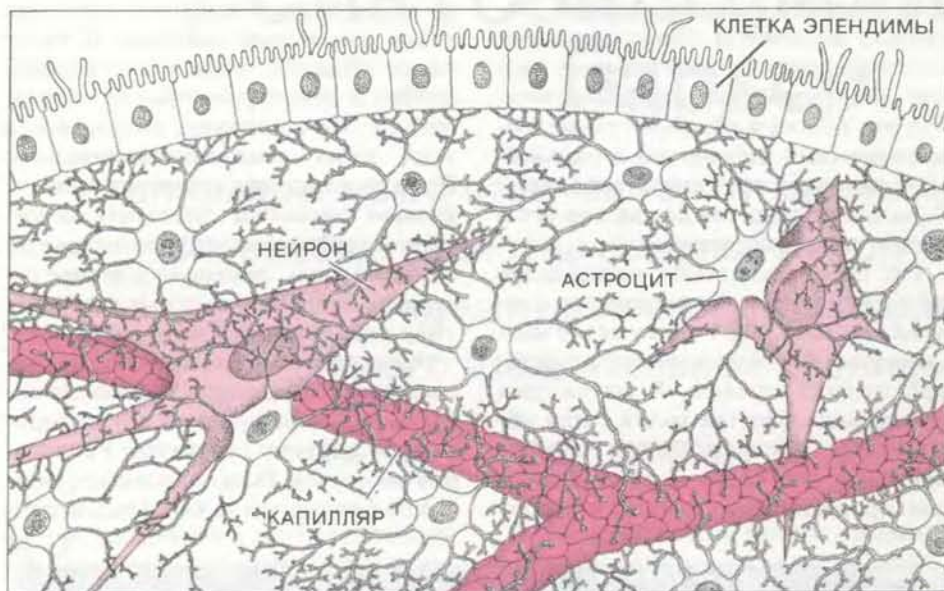
во внеклеточную жидкость мозговой ткани или в сами нейроны. К числу таких областей относятся гипофиз, эпифиз и некоторые участки гипоталамуса. По-видимому, отсутствие в этих зонах гематоэнцефалического барьера позволяет циркулирующим с кровью гормонам достигать секреторных нейронов мозга, замыкая тем самым петлю, лежащую в основе регуляции нейроэндокринных систем по типу отрицательной обратной связи.

Электронно-микроскопические исследования 50-х годов позволили создать значительно более детализированную картину структуры капилляров мозга, чем было возможно ранее. А в 60-х годах, когда были разработа-

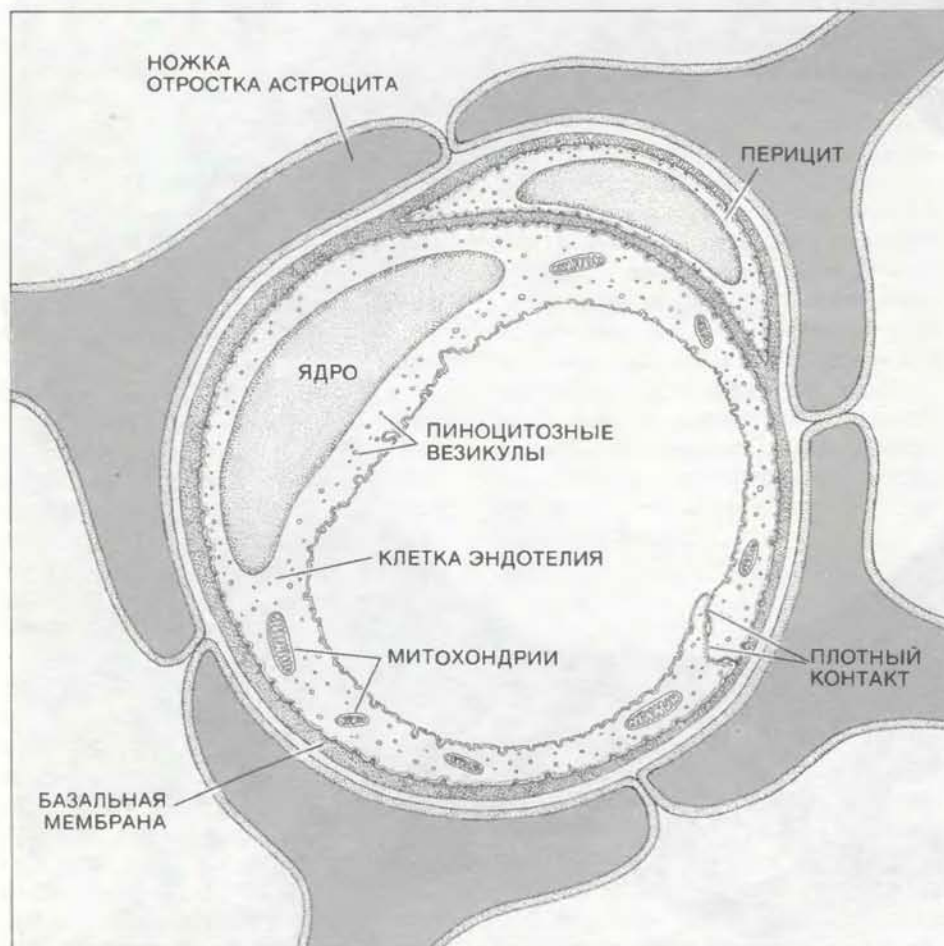


ПОПЕРЕЧНЫЙ СРЕЗ КАПИЛЛЯРА из коры мозга крысы демонстрирует анатомические структуры, составляющие основу гематоэнцефалического барьера. Два больших серповидных образования, формирующие стенку капилляра, — это клетки эндотелия. Вверху просвета сосуда и немного вправо внизу видно, что клетки контактируют тонкими перекрывающимися краями. В этих местах их наруж-

ные мембраны частично сливаются, образуя так называемые плотные контакты, препятствующие свободной диффузии веществ из крови в мозг. Сверху к капилляру прилегла крупная клетка — пероцит; функция пероцитов неясна. (Микрофотография П. Кансилла из Медицинской школы Калифорнийского университета в Лос-Анджелесе; увеличение $\times 10\ 000$.)



АСТРОЦИТЫ своими длинными отростками контактируют с нейронами, клетками эпендимы, выстилающими желудочки мозга, и капиллярами. Каждый капилляр, как правило, находится в контакте с несколькими астроцитами. Астроциты относятся к глиальным клеткам мозга. Об их функциях известно пока мало; считается, что они могут влиять на проницаемость капилляров.



НОЖКИ ОТРОСТКОВ АСТРОЦИТОВ почти полностью покрывают капилляры мозга. По этой причине раньше полагали, что гематоэнцефалический барьер формируется астроцитами. Теперь известно, что барьер создают клетки эндотелия. Эндотелиальные клетки избирательно переносят из крови в мозг питательные вещества; их многочисленные митохондрии обеспечивают этот процесс энергией. В мозгу в клетках эндотелия капилляров мало пиноцитозных везикул; в других же органах такие везикулы обеспечивают относительно избирательный транспорт веществ через стенки капилляров.

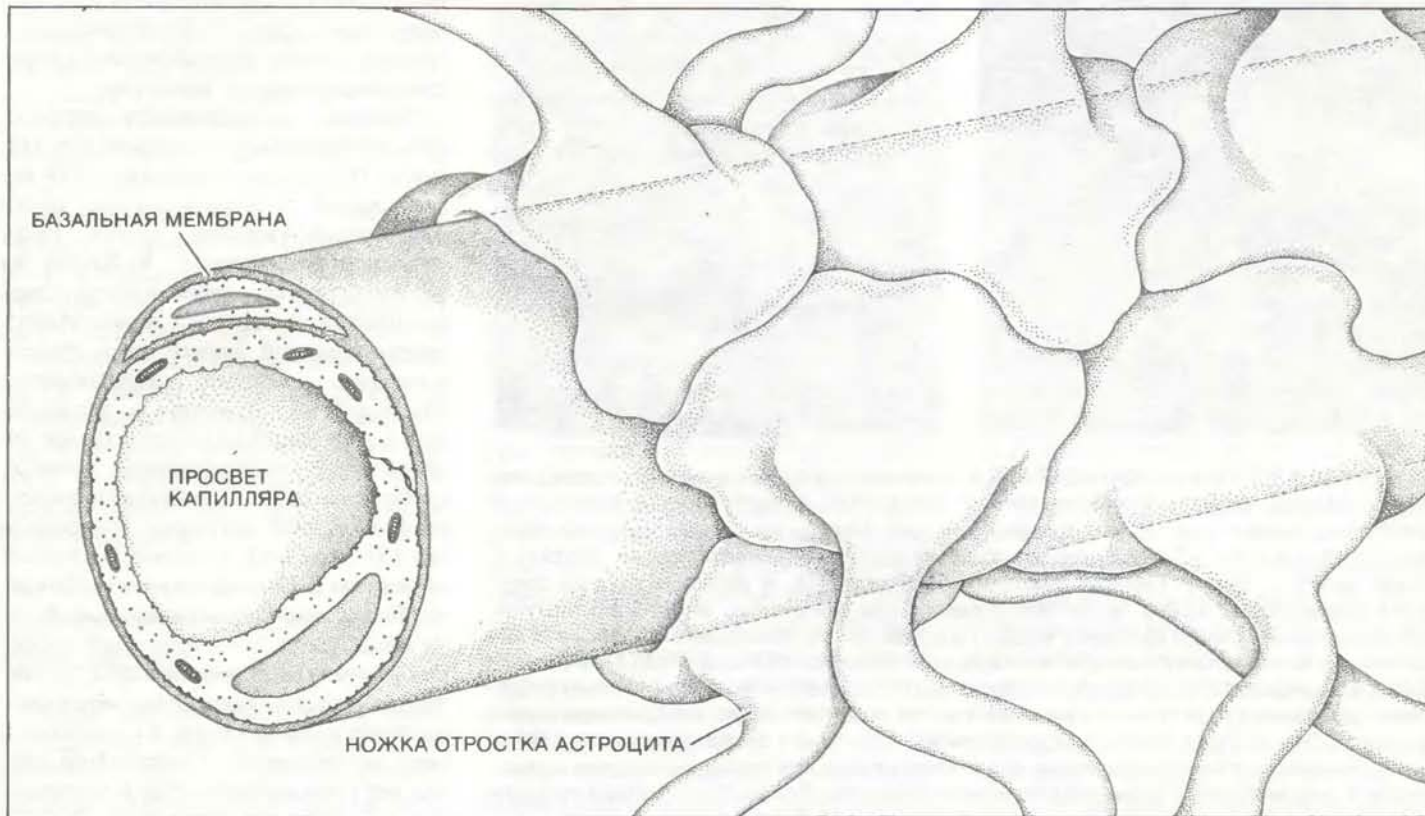
ны методы, основанные на применении молекул-зондов, выявляемых при помощи электронного микроскопа, удалось увязать обнаруженные структурные детали с функцией гематоэнцефалического барьера. Один из таких зондов — пероксидаза хрена. Этот фермент, который сходен по размерам с белками, в норме присутствующими в крови, при обработке специальным реагентом дает электроноплотное «окрашивание», что позволяет увидеть локализацию зонда на электронных микрофотографиях.

Т. Рис и М. Карновски из Медицинской школы Гарвардского университета использовали пероксидазу хрена в экспериментах, аналогичных описанным выше опытам с трипановым синим. Они вводили пероксидазу в кровяное русло и через некоторое время проводили электронно-микроскопический анализ мозга. В большинстве органов пероксидаза легко проникла сквозь стенки капилляров по каналам и щелям между клетками эндотелия, а также захватывалась самими клетками эндотелия и транспортировалась через них, заключенная в маленькие капсулы, называемые пиноцитозными везикулами (пузырьками). В мозгу же плотные контакты между эндотелиальными клетками останавливали пероксидазу и, кроме того, лишь очень небольшое ее количество переносилось через клетки эндотелия с помощью везикул.

Вскоре после опубликования этих важных результатов Рис в сотрудничестве с М. Брайтменом в Национальном институте неврологических заболеваний и инсульта осуществил эксперимент, обратный тому, который он провел в работе с Карновски. Пероксидазу хрена инъецировали в спинномозговую жидкость, так что она распространилась в желудочки (полости) мозга и проникла во внеклеточное пространство мозговой ткани. Однако фермент не выходил из мозга, так как ему препятствовали плотные контакты между эндотелиальными клетками капилляров. Эти исследования показали, что астроциты не создают барьера для движения пероксидазы из мозга. Более того, в совокупности с экспериментами Риса и Карновски они не оставляли сомнений, что анатомическим воплощением гематоэнцефалического барьера является эндотелий кровеносных сосудов.

Как питательные вещества проникают через барьер?

После того как было установлено, что гематоэнцефалический барьер действительно существует, и выясни-



КАПИЛЛЯР окутан образующими причудливый рисунок ножками астроцитарных отростков. Базальная мембрана удерживает эндотелиальные клетки вместе и способствует сохранению трубчатой формы сосуда. Просвет капил-

ляра достаточно широк, чтобы через него могли пройти эритроциты. Капилляры — это тончайшие разветвления сосудистой системы, в них происходит обмен веществами между кровью и остальными тканями.

лась лежащая в его основе ультраструктура, ученые перешли к следующему этапу исследований: выявлению механизмов проникновения через него веществ, необходимых для метаболизма мозга. Прежде всего следовало установить, какие вещества могут проходить через барьер и какие им останавливаются. К тому времени физиологи и биохимики разработали новые методы, позволявшие проследить распределение молекул в тканях при помощи радиоактивно меченных соединений. Поначалу такого рода исследования проводились по одинаковой схеме, по которой для эксперимента требовались два различных радиоактивных вещества. Одно из них служило эталоном и выбиралось так, чтобы оно либо почти полностью проникало через барьер, либо вообще не проникало. Вторым меченым соединением являлось исследуемое вещество. Скорость проникновения исследуемого вещества сравнивалась со скоростью проникновения эталонного соединения; для этого измерялись их концентрации в оттекающей от мозга венозной крови и в самом мозгу.

Такому анализу были подвергнуты многие вещества, и в результате выяснилось, что ряд химических свойств облегчает проникновение молекул в

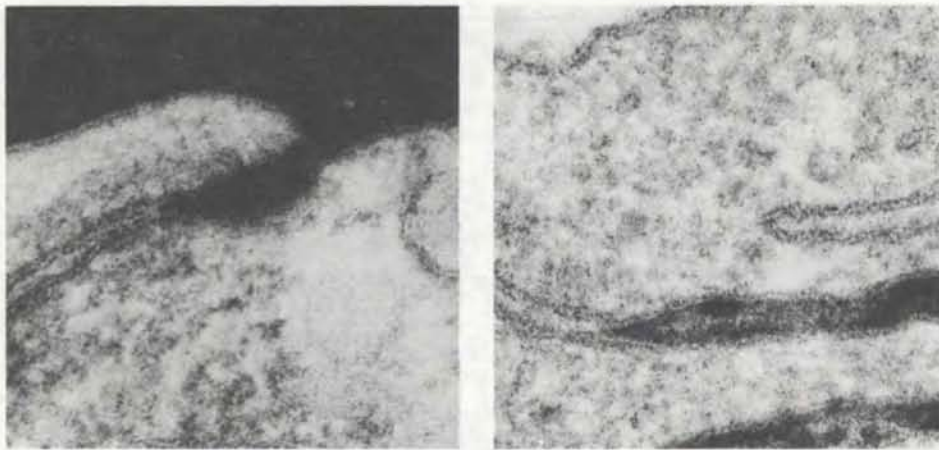
мозг. Решающим фактором оказалась растворимость в липидах, эквивалентная в первом приближении способности растворяться в масле. Липидорастворимые молекулы легко проходят гематоэнцефалический барьер и проникают в мозг. К числу таких веществ относятся никотин, этиловый спирт и героин (это их свойство отчасти объясняет, почему ими часто злоупотребляют). Вещества же, хорошо растворимые в воде, проникают в мозг плохо или не проникают вообще. Эта закономерность наблюдается для множества соединений в широком диапазоне молекулярных масс — от белков размером с альбумин до мелких ионов, таких как ионы натрия.

Причина проницаемости гематоэнцефалического барьера для липидорастворимых веществ заключается в том, что клеточные мембраны, включая мембраны клеток эндотелия кровеносных сосудов, состоят в основном из липидов. В молекуле всякого липида имеются относительно небольшая «голова», содержащая ОН-группы и потому гидрофильная, и прикрепленные к ней два длинных «хвоста», представляющих собой углеводородные цепи и потому гидрофобных. Слои клеточной мембраны сформированы множеством

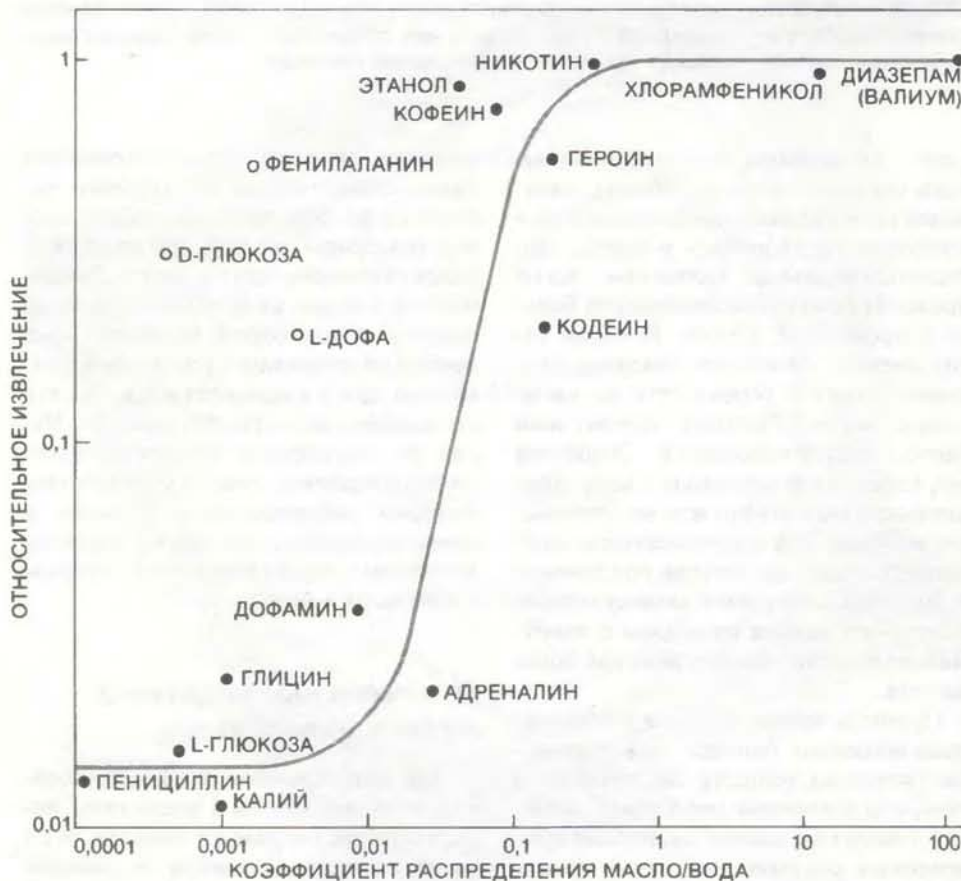
молекул липидов, ориентированных таким образом, что их «голова» находится на поверхности с обеих сторон мембраны, а «хвосты» от разных слоев обращены друг к другу. Липидные молекулы, образующие слой, не связаны между собой. Напротив, они свободно перемещаются относительно друг друга в пределах слоя, так что он подобен двумерной жидкости. Через эту двумерную жидкость могут диффундировать только те вещества, которые растворимы в липидах, и лишь молекулы, способные пересечь мембраны эндотелиальных клеток, проникают в мозг.

Незаменимые вещества транспортируются

Для нормального функционирования мозг нуждается в веществах, которые не растворимы в липидах. К их числу относятся глюкоза — главный источник энергии для клеток мозговой ткани — и некоторые аминокислоты, которые эти клетки не могут синтезировать самостоятельно. Ни глюкоза, ни аминокислоты не растворяются в липидах и поэтому не могут проходить через гематоэнцефалический барьер путем простой диффузии. Молекулы каждого такого питатель-



ГЕМАТОЭНЦЕФАЛИЧЕСКИЙ БАРЬЕР в действии. На этих микрофотографиях представлены эндотелиальные клетки капилляра в мозгу мыши. Клеточные мембраны имеют вид тонких двойных линий. Между клетками заметны плотные контакты. На обоих снимках просвет капилляра расположен сверху, а ткань мозга — внизу. Темные участки — это области, в которые проник фермент пероксидаза хрена и соответственно там появилось электроноплотное «окрашивание». Когда фермент вводят в кровь, он не проникает из просвета капилляра в мозг, так как ему препятствуют плотные контакты (слева). При инъекции в спинномозговую жидкость пероксидаза по щелям между клетками эндотелия достигает участков плотных контактов и дальше, в капилляр не проходит (справа). Эти снимки стали классическими. Они были опубликованы в 1960 г. как доказательство роли плотных контактов между клетками эндотелия капилляров в создании гематоэнцефалического барьера. Левая фотография получена Т. Рисом и М. Карновски; правая — Т. Рисом и М. Брайтменом.



РАСТВОРИМОСТЬ В ЛИПИДАХ является наиболее важным химическим свойством, обеспечивающим способность молекул проникать через гематоэнцефалический барьер. Жирорастворимость вещества измеряется по его распределению между фазами в смеси масла и воды. Способность вещества преодолевать барьер измеряется по относительной скорости его проникновения в мозг в сравнении с веществами, о которых известно, что они легко проходят барьер. Некоторые необходимые для метаболизма мозга соединения проникают в него лучше, чем это следует из их растворимости в липидах (светлые кружки), так как в эндотелии капилляров мозга действуют специальные системы переноса. (По данным У. Олдендорфа.)

ного вещества должны быть узнаны и перенесены через мембрану эндотелиальных клеток переносчиком, специфичным к данному веществу.

Принцип специфичности переносчика впервые был установлен при изучении транспорта глюкозы, и эти исследования показали, сколь тонко дискриминирующими могут быть транспортные схемы. Х. Кроун из Копенгагенского университета сравнил скорости переноса через гематоэнцефалический барьер двух стереоизомеров глюкозы, обозначаемых буквами D и L. Изомеры — это молекулы, состоящие из одних и тех же, но по-разному расположенных атомов; стереоизомеры зеркально-симметричны. Живой организм толерантен как к D-, так и к L-глюкозе, но только молекулы в D-конфигурации обладают биологической активностью. Кроун обнаружил, что эндотелий способен различать стереоизомеры: значительная часть D-глюкозы переходит из крови в ткань мозга, а L-глюкоза в мозг не проникает. Совершенно другая картина наблюдается в мышцах, где оба изомера одинаково быстро поступают в ткань. Кроун пришел к заключению, что существует высокоспецифичная система переноса D-глюкозы в мозг, и сформулировал новую для своего времени гипотезу: переносчик глюкозы находится в эндотелии капилляров мозга.

Совместная работа авторов этой статьи началась после того, как в ходе научной стажировки мы независимо друг от друга заинтересовались гематоэнцефалическим барьером. Когда Бец перед получением ученой степени стажировался в лаборатории Д. Гилбо в Медицинской школе Висконсинского университета в Мадисоне, он, проводя экстракцию тканей мозга, обнаружил, что система транспорта глюкозы в мозг обладает некоторыми общими свойствами с системой переноса глюкозы в эритроциты, которая была гораздо лучше изучена. Как и в эритроцитах, транспорт глюкозы в мозг увеличивается при повышении концентрации глюкозы в плазме крови, но только до определенного уровня. При дальнейшем возрастании содержания глюкозы в крови интенсивность ее транспорта не изменяется, т. е. система, как говорят, насыщается. Как и в эритроцитах, система транспорта глюкозы в мозг подавляется цитохалазином В и нечувствительна к инсулину. Однако когда распределение изучаемого вещества оценивается в экспериментах на животных, в том числе по методике, примененной Бецем, присутствие клеток мозга мешает выявить деятельность эндотелия капилляров. Чтобы изучать функционирование гематоэнце-

фалического барьера без этих запутывающих картину влияний, необходимо было исследовать капилляры отдельно от других тканей. В то время не существовало метода выделения неповрежденных микрососудов из окружающей мозговой ткани, и Голдстейн, который тогда, получив докторскую степень, проходил стажировку в лаборатории И. Даймонда в Медицинском центре Калифорнийского университета в Сан-Франциско, приступил к разработке такого метода. Он добился успеха, и вскоре, объединив свои усилия, мы сначала в Сан-Франциско, а затем в Мичиганском университете вплотную занялись исследованием гематоэнцефалического барьера.

Проблема переносчиков проясняется

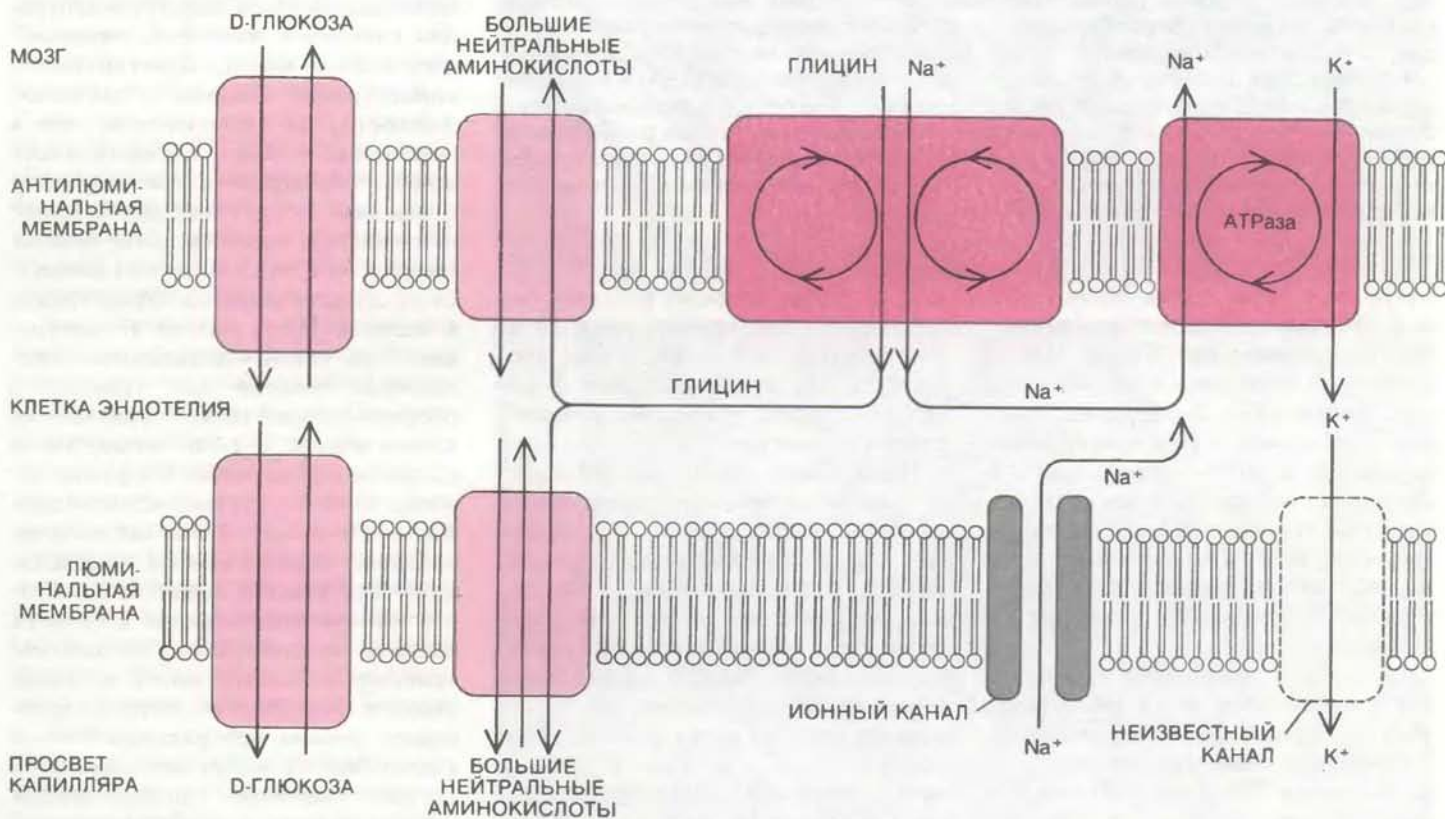
Нашей первой общей идеей было исследовать обнаруженное Бецем сходство между системами переноса глюкозы в капиллярах мозга и в эритроцитах. В экспериментах с изолиро-

ванными капиллярами мы показали, что эти транспортные системы действительно очень похожи. Кроме того, мы измерили, сколько глюкозы входит в клетки эндотелия и сравнили полученную величину с количеством образующихся в эндотелии внутриклеточных метаболитов. Оказалось, что эндотелиальными клетками потребляется только малая часть поступающей в них глюкозы. Следовательно, большая ее часть предназначена служить топливом работающему мозгу. Эти результаты явились первым прямым подтверждением гипотезы Кроуна, согласно которой глюкоза входит в эндотелий сосудов через клеточные мембраны, обращенные в сторону крови, и выходит из эндотелиальных клеток через их мембраны с противоположной стороны, в мозг. Мембраны эндотелия, контактирующие с кровью, получили название люминальные, а контактирующие с мозговой тканью — антилюминальные (от лат. lumen — просвет).

Как только стали ясны характеристики транспортной системы, внимание исследователей обратилось к са-

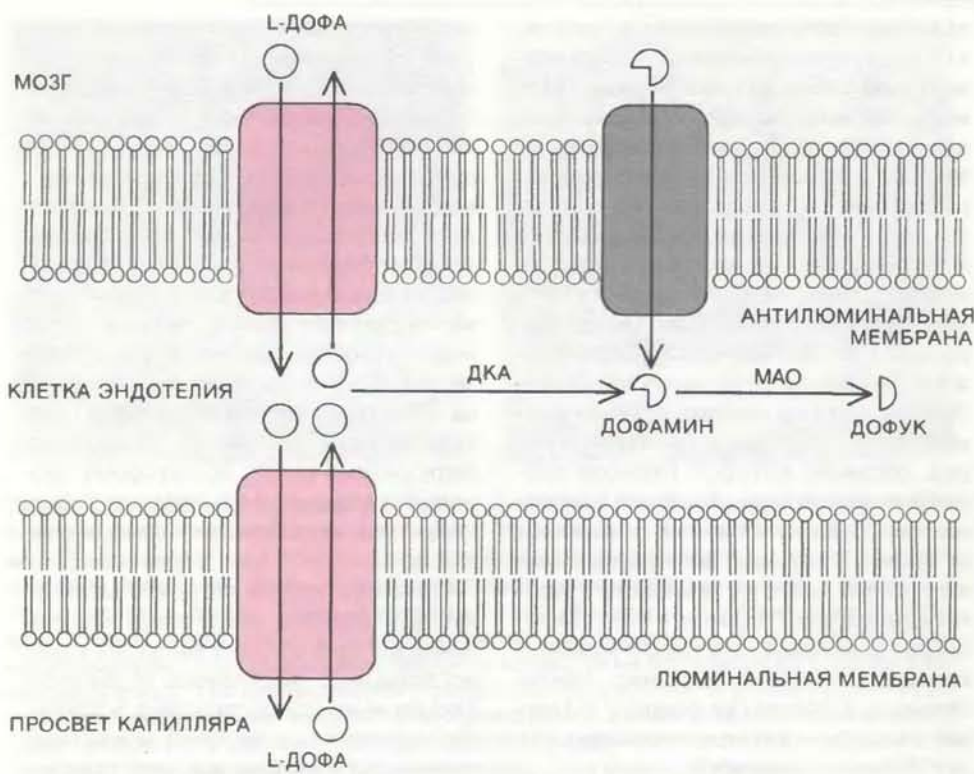
мым переносчикам. Недавно С. Харик из Университета Кейса с помощью цитохалазина В определил количество переносчиков глюкозы в эндотелии. Он установил, что в каждой эндотелиальной клетке имеется множество участков переноса. Это объясняет, как стенки капилляров избавляются от большого избытка глюкозы, извлекаемой ими из крови. Однако на молекулярном уровне система транспорта глюкозы до сих пор остается загадкой. Она, несомненно, образована белками, пронизывающими клеточную мембрану и тем самым формирующими канал, по которому проходит глюкоза. Но пока состав и структура этих белков только изучаются.

Одной из причин того, что глюкоза явилась первым веществом, поступление которого в мозг было детально исследовано, послужило ее относительно высокое содержание в крови. По сравнению с другими представителями того же класса химических соединений глюкоза присутствует в крови в весьма значительном количестве. Что касается аминокислот, то



СЛОЖНАЯ СИСТЕМА ПЕРЕНОСЧИКОВ обеспечивает способность эндотелиальных клеток капилляров мозга контролировать перемещение веществ из крови в мозг и обратно. Некоторые переносчики просто облегчают диффузию по градиенту концентрации (светло-розовые); другие осуществляют активный перенос, требующий энергии (темно-розовые). Переносчики D-глюкозы и больших нейтральных аминокислот, таких как фенилаланин, имеются и в люминальной, и в антилюминальной мембране каждой эндотелиальной клетки, и эти соединения проникают через гематоэнцефалический барьер в обе стороны. Ионы K⁺ и мелкие нейтральные аминокислоты, такие как глицин, пере-

мещаются путем активного транспорта только из мозга в кровь, так как их переносчики присутствуют главным образом в антилюминальных мембранах. Перенос глицина против градиента его концентрации обеспечен энергией благодаря тому, что он сопряжен с переносом Na⁺. Транспорт K⁺ происходит за счет энергии расщепления АТФ ферментом АТФазой, причем одновременно Na⁺ переносится в мозг. Глицин может выходить из эндотелия с помощью переносчика для больших нейтральных аминокислот. Ионы K⁺ выходят оттуда через неизвестные пока каналы.



МЕТАБОЛИЧЕСКИЙ ГЕМАТОЭНЦЕФАЛИЧЕСКИЙ БАРЬЕР представляет собой систему ферментов, осуществляющую такую модификацию попавшего в эндотелиальные клетки соединения, что оно теряет способность проникать в мозг. Аминокислота L-ДОФА, являющаяся предшественником нескольких нейромедиаторов, проникает через барьер в обе стороны с помощью переносчика больших нейтральных аминокислот. Но внутри эндотелиальных клеток L-ДОФА под действием двух ферментов — декарбоксилазы аминокислот (ДКА) и моноаминоксидазы (МАО) может превратиться в дофамин, а затем в 3,4-диоксифенилуксусную кислоту (ДОФУК). Дофамин может выйти из мозга, так как для него есть свой переносчик, но ни дофамин, ни ДОФУК не переходят через антилюминальную мембрану в сторону мозга. Таким образом, ферментативные превращения могут регулировать поступление ДОФА в мозг.

ситуация в этом случае более сложная. Двадцать аминокислот, являющихся компонентами белков, можно разбить на подгруппы в соответствии с их химическими свойствами, которые определяются главным образом боковыми цепями — теми частями молекулы, которыми разные аминокислоты отличаются друг от друга. По этому принципу среди аминокислот выделяют крупные нейтральные, мелкие нейтральные, основные и кислые.

Сложность транспорта аминокислот в капиллярах мозга явствует из того, что судьба больших и мелких нейтральных аминокислот совершенно различна. Большие нейтральные аминокислоты особенно важны, поскольку они необходимы мозгу для синтеза нейромедиаторов и белков. У. Олдендорф и У. Пардридж из Медицинской школы Калифорнийского университета в Лос-Анджелесе, которые внесли большой вклад в эту область исследований, описали две специфичные системы переноса аминокислот. Одна из них предназначена для больших нейтральных аминокислот, а вторая — для кислых и основ-

ных. В случае больших нейтральных аминокислот по крайней мере 10 из них конкурируют за то, чтобы проникнуть в клетки эндотелия с помощью одного и того же транспортного механизма.

Переносчики больших нейтральных аминокислот, как и переносчики глюкозы, располагаются и в люминальной, и в антилюминальной мембранах, а следовательно, с их помощью эти незаменимые аминокислоты могут перемещаться через эндотелий в мозг. Мелкие нейтральные аминокислоты, напротив, не транспортируются из крови в мозг; это и неудивительно, поскольку клетки мозга могут сами синтезировать такие аминокислоты, так что они не являются «незаменимыми». Более того, по крайней мере одна из аминокислот этой группы, глицин, действует в мозгу как эффективный тормозный нейромедиатор, и его концентрация в жидкости, окружающей нейроны, должна быть значительно ниже, чем в крови. Решающую роль в поддержании такого соотношения играют транспортные свойства эндотелия капилляров.

Асимметричный транспорт доказан

Выяснить роль капилляров в обеспечении необходимого уровня глицина в мозгу удалось в экспериментах с изолированными капиллярами мозга. По данным ряда исследователей, изучавших захват веществ мозгом на целостных животных, перенос глицина из крови в мозг строго ограничен, и на основании этого был сделан вывод, что переносчики глицина в клетках эндотелия отсутствуют. Однако, работая с изолированными капиллярами, мы обнаружили транспортную систему, способную концентрировать глицин внутри эндотелиальных клеток. Эти кажущиеся противоречащими друг другу результаты согласуются, если, как мы предположили, переносчики мелких нейтральных аминокислот имеются в антилюминальной мембране, но их нет в люминальной мембране, так что такие аминокислоты могут транспортироваться из мозга, но не могут входить в него.

Асимметричное распределение позволяет понять, каким образом поддерживается столь низкая концентрация глицина в жидкости, окружающей клетки мозга. Действительно, концентрация глицина в мозговой жидкости, как правило, ниже, чем в эндотелии, — факт, который имеет прямое отношение к транспортным процессам. Когда глюкоза и большие нейтральные аминокислоты перемещаются из крови в мозг, они движутся от области высокой концентрации к области более низкой концентрации. При таком «нисходящем» перемещении энергия для транспорта обеспечивается самим градиентом концентрации, и роль переносчиков сводится к облегчению диффузии, которая в их отсутствие происходила бы, но медленнее. Если, как в случае глицина, осуществляется «восходящее» перемещение вещества из области низкой концентрации в область высокой концентрации, то процесс транспорта должен иметь источник энергии. Оказывается, энергия для переноса мелких нейтральных аминокислот берется за счет переноса ионов натрия: транспорт глицина против градиента концентрации сопряжен с движением ионов натрия, которые «нисходят» в эндотелий по градиенту своей концентрации и увлекают с собой глицин.

Не вызывает сомнения, что должен существовать и путь выхода мелких нейтральных аминокислот из эндотелиальной клетки, в противном случае концентрация этих аминокислот внутри клеток повысилась бы до нежелательного уровня. По-видимому,

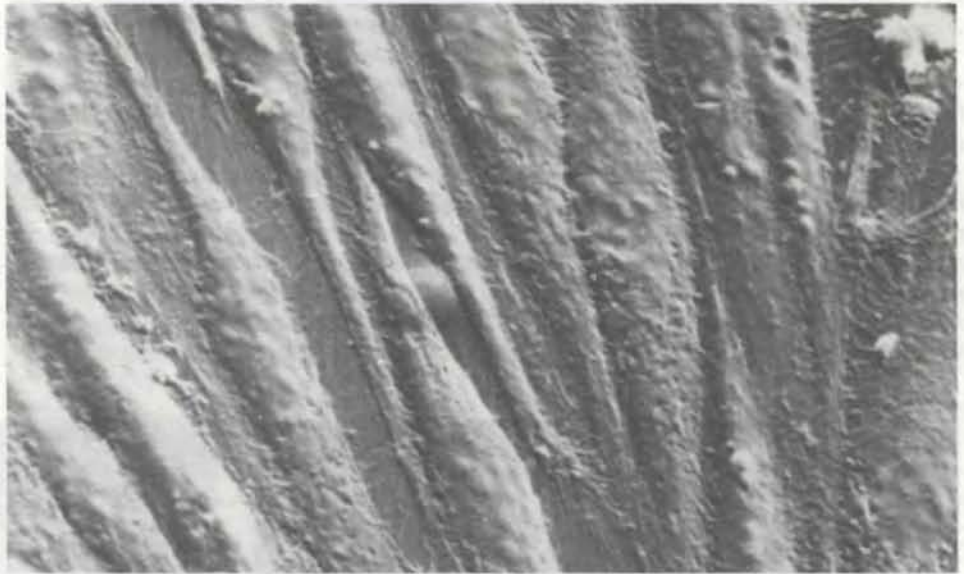
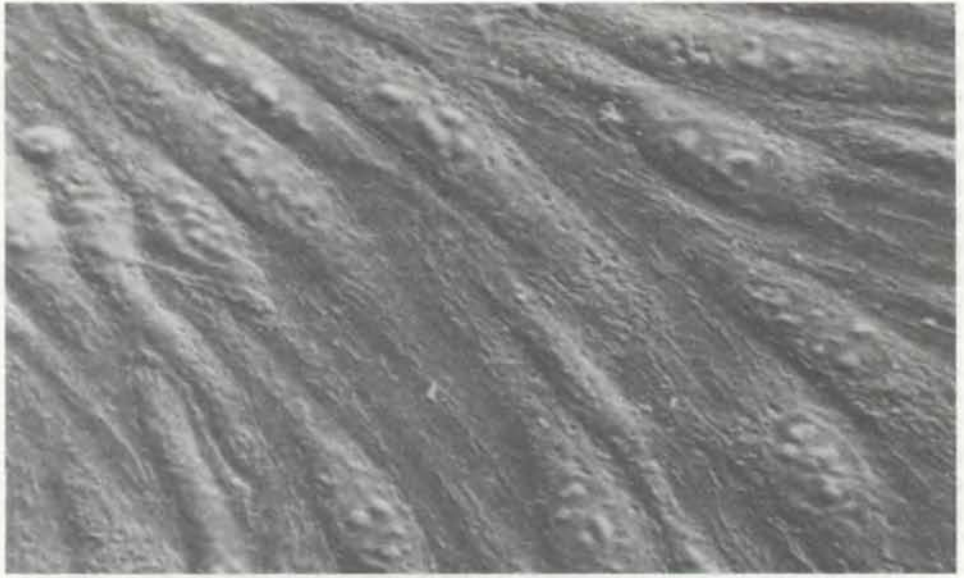
мелкие нейтральные аминокислоты выносятся при помощи той же системы, которая транспортирует большие нейтральные аминокислоты. И хотя сродство этих переносчиков к мелким аминокислотам не такое высокое, как к их «собственным» лигандам — большим нейтральным аминокислотам, все же оно достаточно для вывода мелких нейтральных аминокислот из клеток.

Дополнительная асимметрия

Представление об асимметричном распределении переносчиков оказалось весьма плодотворным для понимания судьбы мелких нейтральных аминокислот, и мы попытались применить это представление к транспорту ионов K^+ . Были серьезные основания считать, что перенос мелких нейтральных аминокислот может служить удобной моделью для изучения переноса K^+ . Подобно глицину, ионы калия сильно влияют на проведение нервных импульсов, и по этой причине их концентрация в среде, окружающей клетки мозга, должна быть низкой. Второе сходство — относительная непроницаемость люминальных мембран эндотелия для K^+ . И наконец, еще одна общая черта была обнаружена М. Брэдбери (в то время сотрудником Медицинской школы больницы св. Фомы в Лондоне), который показал, что удаление ионов K^+ из мозга осуществляется насыщаемой транспортной системой.

Воодушевленные наблюдениями Брэдбери, мы исследовали транспорт калия в опытах с изолированными капиллярами и обнаружили, что клетки эндотелия могут накачивать в себя ионы K^+ . Перенос K^+ , как и перенос глицина, является «активным», т. е. он происходит против градиента концентрации. Однако механизмы активного транспорта этих двух веществ различны, что было установлено нами в сотрудничестве с Д. Энтони Фиртом, работавшим тогда в Медицинской школе больницы св. Георгия в Лондоне.

Оказалось, что по сравнению с люминальными мембранами антилюминальные мембраны содержат большее количество фермента Na^+ , K^+ -аденозинтрифосфатазы. Этот фермент составляет основу транспортной системы, которая одновременно переносит ионы Na^+ из эндотелия в мозг и ионы K^+ из мозга в эндотелий. Поскольку и Na^+ , и K^+ транспортируются против градиентов их концентраций, для функционирования переносчика требуется значительный приток энергии. Топливом служит



КУЛЬТИВИРУЕМЫЕ КЛЕТКИ ЭНДОТЕЛИЯ — действующая модель гематоэнцефалического барьера. На этих фотографиях представлены эндотелиальные клетки капилляров из мозга коровы. При первичном культивировании клетки формируют гладкий монослой (вверху). Если их перенести в среду без Ca^{2+} , клетки разъединяются, обнажая пластиковую поверхность, на которую они растут (в середине). Если же вновь поместить клетки в среду с Ca^{2+} , монослой восстанавливается (внизу). Эти явления соответствуют реакции интактного гематоэнцефалического барьера. Метод культивирования эндотелиальных клеток капилляров мозга разработан Ф. Боуеном с коллегами в лаборатории авто-ров, где и получены эти микрофотографии.

макроэргическое (т. е. богатое энергией) соединение — аденозинтрифосфат (АТФ). Фермент-переносчик расщепляет молекулы АТФ, в результате чего освобождается достаточно энергии для выведения из клетки Na^+ и введения в нее K^+ . Накапливающиеся в клетках ионы K^+ должны иметь возможность выйти оттуда: это, по-видимому, осуществляется с помощью пор в люминальной мембране.

Вся эта сложная система обеспечивает снижение содержания K^+ в мозгу и выведение избыточного калия из эндотелия. Основой ее является неравное распределение транспортного фермента между двумя сторонами клеток эндотелия.

Метаболизм в качестве барьера

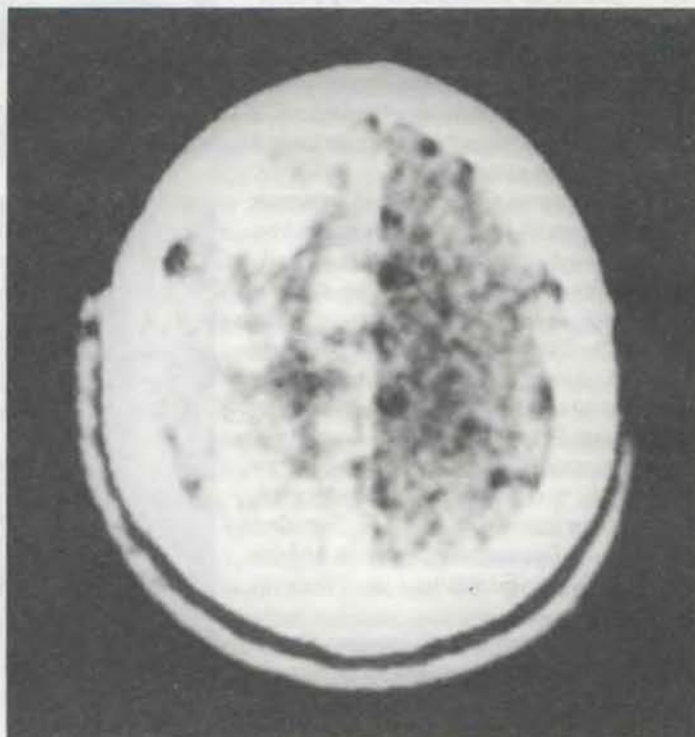
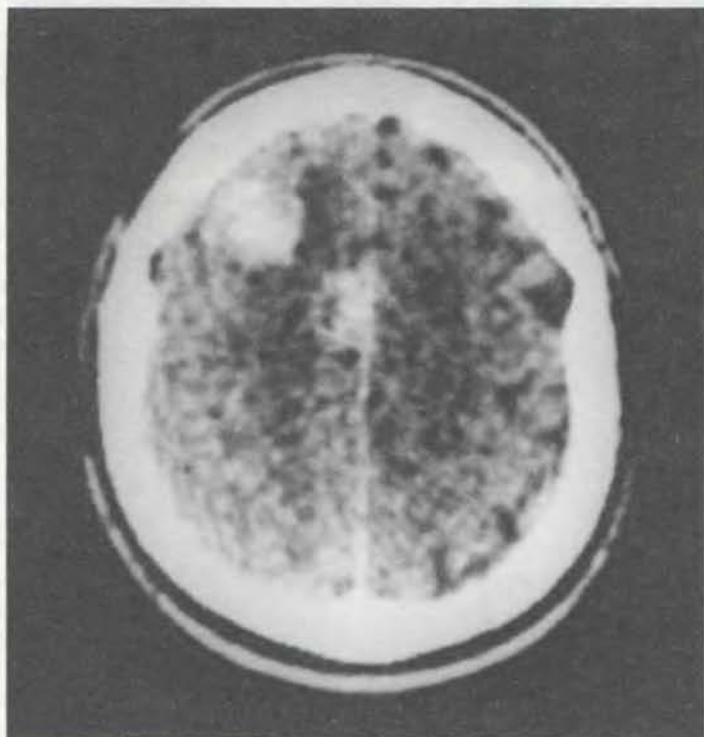
В рассмотренных выше примерах гематоэнцефалический барьер создавался главным образом регуляцией транспорта через эндотелий. Это, однако, не единственный способ не допускать вещество в мозг. Попав в эндотелиальную клетку, оно может в процессе внутриклеточного метаболизма превратиться в соединение, химические свойства которого не позво-

ляют ему пересечь антилюминальную мембрану и войти в мозг. Наиболее яркий пример такого механизма, получившего название метаболический гематоэнцефалический барьер, приведен в работах А. Бертлера, Б. Фалька, К. Оумена и Э. Розингрена из Лундского университета (Швеция). Эти исследователи показали, что L-ДОФА, являющийся предшественником нейромедиаторов дофамина и норадреналина, легко входит в эндотелий, но там подвергается ферментативной модификации и превращается в форму, не проникающую в мозг.

Открытие метаболического гематоэнцефалического барьера и расшифровка сложной сети переносчиков, пронизывающих плазматическую мембрану эндотелиальных клеток, привлекли внимание исследователей к свойствам эндотелия. В последнее время многие ученые пытаются выяснить, чем обусловлены необычные свойства эндотелия мозговых капилляров. М. Уили и П. Стюарт из Торонтского университета в опытах на эмбрионах птиц обнаружили, что если пересадить ткань мозга в кишечник, микрососуды кишечника, прорастающие в трансплантат, приобретают свойства гематоэнцефалического барьера. А при пересадке мышеч-

ной ткани кишечника в мозг сосуды мозга, прорастающие в трансплантат, теряют свою специфику. Эти данные позволяют думать, что становление барьера стимулируется сигналами от окружающей сосуды мозговой ткани, а не является результатом реализации генетической программы особых эндотелиальных клеток.

Вероятный источник таких сигналов — астроциты. Но изучение взаимодействия астроцитов и эндотелиальных клеток в целостном организме и даже в суспензии изолированных капилляров представляет собой очень сложную задачу. Сотрудники нашей лаборатории, в частности Ф. Боумен, и другие исследовательские группы разработали методы выращивания эндотелиальных клеток капилляров мозга в культуре. В начале культивирования клетки сохраняют свои барьерные свойства, но после нескольких пассажей (т. е. после нескольких циклов деления клеток и перенесения их в другие чашки) клетки утрачивают их. Л. Де Бо и П. Кансилла (тогда сотрудники Университета шт. Айова) показали, что если пассированные клетки эндотелия из мозга мышей выращивать на слое культивируемых глиальных клеток, то барьерные



ГЕМАТОЭНЦЕФАЛИЧЕСКИЙ БАРЬЕР МОЖНО ОТКРЫТЬ. Больному с опухолью мозга ввели концентрированный раствор сахара в сонную артерию. Эти изображения, полученные методом компьютерной томографии, представляют собой вид мозга сверху (передняя часть головы на снимках вверху). В мозг инъецировали контрастирующий химический реагент и те места, где действовал гематоэнцефалический барьер, на изображениях темные, а участки с повышенной проницаемостью барьера светлые. Слева —

мозг до введения раствора сахара в кровь; светлая область в левой верхней части — это опухоль, где барьер несколько ослаблен. Справа — мозг через 30 мин после инфузии. Видно, что в результате воздействия раствора сахара проницаемость барьера в окрестностях опухоли и окружающих тканей существенно понижается. «Гиперосмотический» метод позволяет доставлять в мозг химиотерапевтические агенты. (Изображения получены Э. Ньювелтом, Орегонский медицинский университет.)

свойства эндотелиальных клеток восстанавливаются. Итак, по крайней мере в культуре, глиальные клетки обладают трансформирующим действием; мы предполагаем, что они обладают таким действием и в живом организме.

Культивирование эндотелия

Культивирование клеток эндотелия позволяет изучать не только возникновение гематоэнцефалического барьера, но и механизм его функционирования. Мы изучали в культуре клеток изменения проницаемости барьера. В результате работы, проведенной Боуменом, мы теперь можем получать первичные культуры эндотелиальных клеток, обладающих некоторыми характерными признаками естественного гематоэнцефалического барьера: они содержат мало пиноцитозных везикул и часто образуют между собой плотные контакты.

Следующий шаг был сделан в совместной работе Боумена и К. Доровини-Зис из лаборатории Брайтмена в Национальном институте неврологических заболеваний, которая присоединилась к нашей группе. Она изучала загадочный феномен, открытый С. Рапопортом из Национального института геронтологии. В опытах на животных он обнаружил, что инъекция гипертонического раствора сахара в сонную артерию (по ней мозг снабжается кровью) вызывает быстрое значительное увеличение проницаемости гематоэнцефалического барьера, причем это изменение временное и барьерные функции вскоре восстанавливаются. Чтобы объяснить свои наблюдения, Рапопорт предположил, что из-за высокой концентрации сахарозы каким-то образом на время ослабляются плотные контакты между клетками эндотелия. В лаборатории Брайтмена Доровини-Зис, наблюдая морфологические изменения капилляров после инъекции гиперосмотического раствора сахара интактным животным, заметила, что плотные контакты действительно временно расходятся после инъекции сахара. Это подтверждало гипотезу Рапопорта. В нашей лаборатории Доровини-Зис и Боумен провели серию аналогичных экспериментов с культурой клеток эндотелия. Они показали, что культивируемые клетки создают функциональный барьер, препятствующий проникновению пероксидазы хрена через плотные контакты. Когда же клетки подвергали воздействию высокой концентрации сахара, плотные контакты

разъединились и краситель проникал в межклеточное пространство. После удаления сахара барьер восстанавливался.

Применение в медицине

Работы Доровини-Зис и Боумена дали исследователям действующую модель гематоэнцефалического барьера. В ближайшие годы она пригодится не только в фундаментальных исследованиях, но и в клинической практике. С медицинской точки зрения гематоэнцефалический барьер создает существенную трудность: при лечении заболеваний, затрагивающих ткани мозга, лекарственные средства должны его преодолевать. Некоторые препараты, как, например, антибиотик хлорамфеникол, хорошо растворимы в липидах и поэтому легко проникают в мозг. Но многие лекарства, в том числе такие необходимые, как пенициллин, плохо растворимы в липидах и переходят из крови в мозг медленно или совсем не переходят. По счастливой случайности пенициллин мало токсичен, так что его можно назначать в довольно больших дозах, чтобы высокая концентрация антибиотика в крови компенсировала его низкую растворимость в липидах.

К сожалению, лишь немногие лекарственные вещества так же относительно безвредны, как пенициллин. Большинство препаратов имеет по крайней мере несколько вредных побочных эффектов, и поэтому их нельзя вводить в избытке с расчетом на то, что часть дозы достигнет нужной мишени. В принципе, чтобы ввести лекарство в мозг, есть два пути: либо ослабить на время гематоэнцефалический барьер, либо как-то его обойти.

Возможность реализовать первый путь наметила в связи с данными Рапопорта о резком усилении проницаемости барьера после введения гипертонического раствора сахара в сонную артерию. Хотя эти эксперименты были выполнены на животных, обратимость эффекта позволяет надеяться, что на основе инъекций гипертонических растворов будет разработан применимый для человека метод введения лекарств в мозг. Недавно Э. Ньювелл из Орегонского медицинского университета попытался использовать данные Рапопорта для лечения опухолей мозга. Он вводил больным раствор сахара высокой концентрации и показал, что это может открывать гематоэнцефалический барьер. Его результаты свидетельствуют, что в таких условиях химиотерапевтические препараты могут способствовать регрессии и исчезновению опухоли мозга.

Второй путь, в обход барьера, также осуществим. Наиболее прямой способ — инъекция лекарственного вещества непосредственно в спинномозговую жидкость. Прямое введение химиотерапевтических средств долгие годы было общепринятым методом лечения опухолей мозга. Преимущество этого метода заключается в том, что лекарство попадает сразу туда, где оно нужно. Однако, стремясь уменьшить число инъекций, часто используют большие дозы препаратов, что может приводить к негативным побочным явлениям, так как многие химиотерапевтические агенты высокотоксичны.

Возможен и гораздо более тонкий подход. В нем используются высокая избирательность гематоэнцефалического барьера и особенности метаболизма мозга. Если бы удалось создать лекарство, которое легко проникало в мозг и подвергалось там такой модификации, что становилось бы непроницаемым, то оно, задерживаясь в тканях мозга, производило бы желаемый локальный эффект. В настоящее время этот подход находится в стадии исследования. Но есть обнадеживающие указания на эффективность лежащего в его основе принципа: особенности действия на мозг героина и морфина.

Героин и морфин очень похожи по химической структуре. Единственное различие между ними состоит в том, что в молекуле героина имеются две ацетильные группы (CH_3CO), а в молекуле морфина на их месте расположены гидроксильные группы (OH). Химические свойства ацетильных групп придают молекуле героина способность растворяться в липидах, тогда как морфин в них плохо растворим. Поэтому героин проникает в мозг значительно лучше, чем морфин. (Это одна из причин того, что героин злоупотребляют больше, чем морфином.) В мозгу ферменты отщепляют от героина ацетильные группы, и он превращается в морфин, который задерживается в тканях мозга. Терапевтические препараты, ведущие себя подобно героину, могут вводиться в контролируемых дозах и при этом оказывать сильное действие.

Итак, можно надеяться, что новейшие результаты исследования гематоэнцефалического барьера в ближайшие годы найдут важное применение в медицине. Однако наибольшая ценность этих работ заключается, пожалуй, не в их практическом значении, а в достигнутом понимании фундаментального биологического феномена.

Цвета предметов

Цветовые «иллюзии», порождаемые с помощью изображений на дисплее компьютера, свидетельствуют о том, что восприятие цвета предмета обусловлено не только ощущением света, идущего от поверхности предмета

ФИЛИПП БРУ, ТОМАС Р. ШАША,
ЛАЙНЕТТ ЛИНДЕН, ДЖЕРОМ ЛЕТТВИН

ЦВЕТ, равно как и красоту, человек воспринимает благодаря глазу. Однако многие полагают, что в отличие от красоты восприятие цвета целиком предопределяется непосредственно физической причиной, а именно — спектром попадающего в глаз света. Глаз часто сравнивают с цветной телекамерой, регистрирующей световой поток на более длинных (красных), средних (зеленых) и более коротких (синих) волнах в каждой точке изображения. Как и в телевизионной камере, в глазу есть три типа цветowych «датчиков», поэтому считается, что цвет в каждой точке воспринимается на основе ощущения красноты, зелени и голубизны данного элемента изображения. Для исследователей зрительного восприятия это общепринятое толкование послужило толчком к созданию различных цветowych «иллюзий». В основе их «конструирования» лежит тот факт, что испытуемый видит цвет, отличный от цвета, который ему предъявляют. Обычно с помощью таких «иллюзий» демонстрируют погрешности органов чувств, показывая, что глаз работает не так уж безупречно. Согласно альтернативной точке зрения, общепринятое представление о цветовом зрении, коль скоро они так легко и последовательно опровергаются, просто неверны. «Иллюзии» вскрывают не дефекты зрения. Они приоткрывают завесу над работой непривычных для нас механизмов цветового зрения.

Новые представления, которые будут развиты нами в этой статье и подкреплены экспериментально на основании анализа восприятия иллюстраций, сводятся к следующему. Восприятие цвета предметов в видимом нами мире не определяется однозначно одним лишь потоком света от каждого воспринимаемого по отдельности объекта, а зависит также от сравнения потоков света, идущих от объектов и их окружения. Такое утверждение звучит несколько загадочно. Ведь

в конце концов при восприятии мы явно предполагаем, что цвет объекта — это неотъемлемое свойство его поверхности. Красная роза при дневном освещении кажется просто красной, а не красной по отношению к чему-либо, что ее окружает. Но восприятие этой неотъемлемой красноты еще не означает, что она задается исключительно сенсорной информацией от образа розы. Мы будем анализировать не результат восприятия, каким он представляется воспринимающему, а процесс, с помощью которого сенсорная информация обрабатывается так, что восприятие становится возможным.

ЧТОБЫ понять, в чем состоит чувствительность общепринятых представлений о цветах вещей, достаточно рассмотреть одну цветovou «иллюзию» — «иллюзию» наиболее универсальную и настолько часто встречающуюся в нашем повседневном опыте, что мы ее даже не замечаем. Речь идет о постоянстве (константности) восприятия цвета при дневном освещении. Естественный свет всегда непостоянен. От рассвета к полудню и дальше к сумеркам изменяется не только его яркость, но и его спектр. На рассвете свет розоватый. Днем он имеет отчетливый желтый оттенок. Излюбленный художниками северный свет — это голубизна неба в отсутствие солнца. Свет, проникающий под полог листвы, выглядит явно зе-

ленным. И тем не менее в любом потоке дневного света белый лист бумаги всегда видится белым. На самом деле все поверхности сохраняют видимый цвет при любых оттенках дневного света.

В наше время константность восприятия цвета, если и упоминается вообще, то лишь в скептических примечаниях на страницах учебников по зрительному восприятию. Этот скептицизм нетрудно понять. Поскольку многие из нас буквально все время проводят в условиях искусственного освещения, мы привыкли, например, считать, что лицо человека меняет оттенок в зависимости от того, создается освещение лампами накаливания или люминесцентными лампами. Однако такой скептицизм ошибочен. Уже в прошлом столетии исследователи осознали, что константность восприятия цвета представляет собой серьезную проблему для понимания сущности восприятия. Константность восприятия цвета — это настолько надежная особенность нашего зрения, что мы привычно сравниваем по памяти цвет лица и губ человека, находящегося в данный момент при дневном освещении, с цветом, который заметили час назад, вчера, на прошлой неделе и в других условиях дневного освещения, и легко обнаруживаем изменения, вызванные тем, что человек краснеет или бледнеет, или такие изменения, которые являются признаком болезни: гепатита

ЦВЕТНЫЕ ТЕНИ составляют сущность «иллюзии», наводящей на мысль о необычности механизма восприятия цвета. На обеих фотографиях изображен бюст знаменитого естествоиспытателя и путешественника XIX в. Александра Гумбольдта, снятый на белом фоне. С одной стороны бюст был освещен пучком белого света, с другой — пучком окрашенного света. Бюст был повернут лицом к цветному пучку, поэтому тень за затылочной частью содержит только белый свет. Однако она кажется не бесцветной, а окрашенной в цвет, дополнительный к цвету противоположной, цветной тени. Поэтому на верхней фотографии тень со стороны затылка выглядит «теплее» соответствующей тени на нижней фотографии. Если закрыть все, что окружает тени, можно увидеть, что они одинаковы. Эта «иллюзия» показывает, что восприятие цвета опирается на сравнение, осуществляемое на границах окрашенных поверхностей.



(когда кожа желтеет) или кислородной недостаточности (когда кожа синет). Все эти изменения очень незначительны по сравнению с изменениями оттенка дневного света. Получается, говоря словами выдающегося естествоиспытателя XIX в. Г. Гельм-

гольца, что при восприятии цвета мы «исключаем источник света».

Гельмгольц предположил, что наш опыт «предписывает» глазу, какой цвет мы должны увидеть, и мы соответствующим образом приспособляем наше восприятие, «вычитая» ос-

вещение. Но эта идея не удовлетворяла и самого Гельмгольца — и не без основания. Возможность ее реализации граничит с чудом, поскольку любой сенсорный орган, который мы можем вообразить, вряд ли способен помочь нам определить, какой свет падает на что-то за исключением самого этого органа. Другими словами, мы не в состоянии точно определить, каким светом освещена поверхность, поскольку воспринимаем лишь часть этого света, а именно — ту, которую эта поверхность отражает в глаз. Как при этом «исключить источник света»?

В поисках ответа на этот вопрос мы должны принять во внимание одну трудность, на которую наталкиваются попытки объяснить природу видимого цвета. Существуют два различных способа интерпретации цветового зрения. Первый из них состоит в том, чтобы рассмотреть преобразование информации, содержащейся в зрительном образе, в сенсорную информацию. Другими словами, объяснению подлежит то, как колбочки (цветовые рецепторы глаза) реагируют на свет. Свет, приходящий в каждую колбочку, обесцвечивает светочувствительный пигмент, поэтому объяснение основывается на изменениях частоты событий обесцвечивания пигмента поступающими в глаз фотонами — корпускулами света.

Экспериментальное изучение законов этого преобразования восходит к Ньютону. Условия эксперимента таковы, что испытуемым приходится действовать наподобие так называемых нулевых измерительных приборов. Испытуемые могут регулировать световые потоки (например, потоки света трех разных цветов, смешивающихся в одно световое пятно), добиваясь того, чтобы исчезла граница между изменяемым пятном и соседним контрольным световым пятном, т. е. чтобы оба пятна стали совершенно одинаковыми. С помощью этих экспериментов удалось установить, что свет некоторых цветов действует на зрительные пигменты одинаково. Другими словами, результаты этих экспериментов позволяют описать реакции пигментов. Однако дальнейшая судьба сенсорной информации, переданной колбочками, на результатах экспериментов уже не отражается.

Второе объяснение полностью отличается от первого. Оно оперирует не с измеримыми величинами, такими, как яркость световых пятен, а с восприятием цвета. Все, что известно об аппарате глаза, и все, что можно сказать о мозге по данным физиологии и психологии, свидетельствует о том, что воспринимающий субъект



ДНЕВНОЙ СВЕТ может иметь различные физические свойства, что проявляется, в частности, в изменениях его спектра. Тем не менее, несмотря на изменчивое освещение, воспринимаемые цвета предметов при дневном свете удивительно постоянны. Это явление называется константностью восприятия цвета. Четыре кривые соответствуют спектрам рассеянного света на уровне земной поверхности, измеренным в четыре разных момента времени, когда солнце находилось на различной высоте над горизонтом: от 0° (у горизонта) до 90° (в зените). Кривая для солнца, стоящего на высоте 8°, получена за полчаса до заката. В это время пик спектра приходился на длины волн в окрестности 660 нм, т. е. глубоко в красной части спектра. Несколькими часами раньше, когда солнце стояло высоко в небе (70°), пик приходился на синюю часть спектра. Показанные на рисунке четыре кривые были впервые опубликованы С. Чендерсеном.

имеет дело не с «сырой» сенсорной информацией, а с продуктами ее переработки. Адекватная стратегия в разработке объяснения цветового зрения в данном случае состоит в том, чтобы принять законы накопления сенсорной информации как данные (с ними имеют дело теории первого типа) и искать правила преобразования этой информации.

Мы полагаем, что при таком поиске можно встать на позицию инженера, занятого не столько анализом окружающего мира, сколько конструированием системы, предназначенной для достижения определенной цели (инженер всегда строит согласно «техническому заданию»). Все искусство анализа в нашей области заключается в определении цели, которой служит цветовое зрение, и затем в конструировании системы, позволяющей достигнуть этой цели.

ЦВЕТОВОЕ зрение развивалось как полезное свойство в первобытном мире, где свет солнца — рассеянный, преломленный, отраженный — был основным источником освещения. Освещаемые им предметы представляли собой в основном твердые, непрозрачные, неметаллические объекты, отражавшие свет в зависимости от того, из какого вещества они были сделаны, а также от неправильностей, неровностей и шероховатостей поверхности. Объекты располагались на земле независимо друг от друга. Любое изображение такого мира представляет собой двумерную карту «устойчивого беспорядка»: всякая ограниченная область такого изображения практически всегда граничит со множеством других таких же областей и изменение освещения на одном участке такой границы мало что может дать в смысле предсказания возможных изменений на любом другом участке границы. Словом, дневной свет, различная отражающая способность объектов и разнообразие их расположений — вот три определяющих условия, в которых развивалось цветовое зрение.

Рассмотрим назначение цветового зрения в смысле облегчения видения. Цветовое зрение улучшает способность различать поверхности и запоминать эти различия, что позволяет надежно распознавать пищу и опасность. Поскольку цветовое зрение позволяет обнаруживать намного больше различий, чем монохроматическое черно-белое зрение, оно действительно дает определенное преимущество. В то же время избыточное различение для организма бесполезно и даже может оказаться помехой. Как таковое, оно создает информационный «шум». Именно этим и определяется

1



2



КОПИРОВАНИЕ ЗАПРЕЩЕНО

«ИЛЛЮЗИИ», возникающие при рассмотрении узора из цветных шестиугольников, построенного на экране компьютера. Каждый шестиугольник из первого узора присутствует также и на втором. Однако на первом изображении шестиугольники хроматически упорядочены, а на втором — расположены случайным образом. Пять шестиугольников окрашены одинаково и расположены на одних и тех же местах на обоих изображениях. На первом их цвета кажутся немного разными. На втором цвет всех пяти кажется одинаковым — серым.

ценность константности восприятия цвета. Способность к распознаванию объектов была бы меньше, если бы они воспринимались меняющимися цвет всего лишь из-за изменения их освещенности.

Что же тогда в рамках понятия «цвет» может служить «запоминаемым» качеством поверхности — качеством, свойственным самой поверхности и независимым от случайных условий солнечного освещения? Единственное качество, отвечающее таким требованиям, — это свойство поверхности отражать свет с определенной длиной волны. Коэффициент отражения всегда остается неизвестным: он представляет собой отношение потока света, отраженного поверхностью, к потоку падающего света, а глазу (что с сожалением признавал Гельмгольц) доступен только первый. Таким образом, представление о том, что цветовое зрение опирается на оценку отражающей способности, выглядит абсурдным. Но это лишь в случае, если считать само собой разумеющимся, что видимый цвет поверхности зависит только от света,

отраженного этой поверхностью.

Существуют и другие тактические возможности для теоретических построений. Так можно вместо измерения света, отражаемого отдельной поверхностью, сравнивать световые потоки, отражаемые двумя граничащими друг с другом поверхностями. Если последние находятся в одинаковых условиях освещения, то сравнение не зависит от падающего света. В результате сравнение отраженных световых потоков становится эквивалентным сравнению коэффициентов отражения (по-прежнему неизвестных). Итак, мы можем сформулировать следующую гипотезу: воспринимаемый цвет является качеством, которое определяется отражающей способностью поверхности в сравнении с отражающими способностями других поверхностей. Эту идею можно проверить: в согласии с ней, например, восприятие стабильного цвета некоторого элемента изображения возможно, если все области вблизи этого элемента существенно отличаются от него цветом. Проверим эту идею с помощью нескольких цвето-

вых «иллюзий». Они разработаны для дисплеев ЭВМ Э. Лэндом — основателем корпорации «Polaroid», посвятившим свою деятельность исследованию цветового зрения.

В СОВРЕМЕННУЮ эпоху персональных компьютеров с цветными экранами дисплеев манипуляции с цветом не представляют особых трудностей. Кроме того, «иллюзии», о которых пойдет речь, могут быть воспроизведены на обычном телевизионном экране. Фотографии экрана дисплея были сделаны в Массачусетском технологическом институте Б. Хаулендом и Д. Дентоном с использованием обычной фотоаппаратуры и цветной пленки. Единственная трудность возникла из-за того, что для журнальной публикации фотографии должны были пройти полиграфическую обработку.

Здесь возникли две проблемы. Во-первых, цветная полиграфия имеет динамический диапазон яркости менее 10:1 по спектру. Другими словами, наиболее яркие участки любого цвета в печати всего лишь в 10 раз ярче наиболее тусклых участков того же цвета. Даже черная краска, которой напечатан этот текст, имеет отражающую способность всего в 10 раз меньше, чем белая бумага, на которой он напечатан. Для сравнения цветные слайды имеют динамический диапазон, превышающий 100:1. Таким образом, полиграфическое производство резко ограничивает яркость изображения, чего не происходит на слайде. Чтобы сфотографированные нами изображения не сильно пострадали, мы ограничили динамический диапазон яркости отношением 3:1 и меньше. Иллюстрации, приведенные в этом журнале, представляют собой полиграфический вариант изображений, которые мы могли бы сделать более живыми, если бы речь шла не о публикации, а о демонстрации слайдов.

Вторую проблему представляло для нас то, что цветная полиграфия использует три краски (пурпурную, голубую и желтую), цвета которых сильно отличаются от красного, синего и зеленого цветов фосфоресцирующих соединений, используемых в экранах дисплеев. Вследствие этого в полиграфическом издании зеленый цвет не может быть передан с той же яркостью и насыщенностью, как на экране дисплея, — даже в выбранном нами ограниченном диапазоне яркостей. (Чтобы получить живой зеленый цвет в печатной рекламе, производители известных ментоловых сигарет часто платят дополнительные деньги за добавление зеленой краски

3



КОЛЬЦЕВАЯ ПЕРЕСТАНОВКА цветных шестиугольников, окружающих каждый из серых шестиугольников, в значительной мере помогает избавиться от «иллюзии» колебаний окраски серых шестиугольников, так что теперь они кажутся одинаково серыми. По сравнению с первым изображением перестановка — это единственное изменение в узоре: остальные шестиугольники сохраняют свой хроматический порядок. Это наблюдение говорит о том, что восприятие цвета опирается, в частности, на сравнения в области границ цветовых пятен.

при печати.) Эти ограничения мы приняли во внимание при создании наших изображений.

Рассмотрите два изображения на с. 53. Они состоят из одних и тех же элементов. На обеих фотографиях изображены узоры из цветных шестиугольников, причем всякий шестиугольник на одной фотографии есть в каком-либо месте и на другой. Каждый шестиугольник имеет свою «хроматическую метку», составленную из трех чисел: первое представляет собой интенсивность красного тона, второе — зеленого, третье — синего. Единственное, чем различаются фотографии, — это места расположения одинаковых шестиугольников — их «адреса» на экране.

На первом изображении шестиугольники упорядочены по своим трем цветовым параметрам. Интенсивность красного цвета возрастает сверху вниз, зеленого — снизу вверх, синего — слева направо. Степени возрастания интенсивности цветов от одного шестиугольника к другому выбраны такими, чтобы обеспечить немного больше, чем простое различие. Второй узор построен совершенно иначе. Кажется, что диапазон цветов шире и сами цвета представляются более живыми. И тем не менее единственное отличие состоит в том, что шестиугольники на этой фотографии перемешаны: им даны случайные, неупорядоченные адреса.

Попробуйте определить, как изменился адрес каждого цветного шестиугольника при переходе ко второму изображению. Новые места шестиугольников, расположенных по периферии первого изображения, найти довольно легко. Однако мы сомневаемся, что ваши глаза помогут вам найти новые положения других шестиугольников, если только, конечно, не закрывать рукой «мешающие» вам шестиугольники.

ПЯТЬ из представленных на обоих изображениях шестиугольников примечательны в двух отношениях. Во-первых, их адреса постоянны: это центральный шестиугольник и четыре шестиугольника ближе к углам фотографий. Во-вторых, они имеют одну и ту же хроматическую метку, между тем как остальные различаются по характеризующему их числовому триплету.

Попробуйте сравнить эти пятерки. На первой фотографии, несмотря на узкий цветовой диапазон иллюстрации, они явно различаются по цвету. (Чем больше диапазон — тем сильнее эффект.) Но если, держа страницу на обычном при чтении расстоянии, фиксировать взор на одном из этих

4



ДИАГОНАЛЬНАЯ ПЕРЕСТРОЙКА цветных шестиугольников также помогает уверенно воспринимать серые шестиугольники как действительно серые. При построении этого изображения один цветной шестиугольник из окружения каждого углового серого шестиугольника поменялся местом с шестиугольником, симметричным ему относительно центра. Во всем остальном сохранено расположение, представленное на первом изображении. Перестановка показывает, что присутствие в узоре небольшого элемента, выделяющегося своим цветом, служит достаточным основанием для константности восприятия цвета.

шестиугольников, его цвет станет неопределенным.

Маловероятно, чтобы вы смогли выделить центральный шестиугольник. Он помечен маленькой точкой в центре. Если, закрыв один глаз, зафиксировать взор на этой точке, цвета четырех угловых шестиугольников будут казаться поначалу насыщенными, но через несколько секунд шестиугольники пропадут. Более того, вся картинка потеряет свои черты, сохранив их только на периферии — вдоль границы с белой бумагой.

Второй узор и в этом отношении обладает совсем другими свойствами. Пять шестиугольников выглядят одинаково серыми, хотя и занимают те же самые места и имеют такие же хроматические метки, что и на первой фотографии. Если зафиксировать взор на любом шестиугольнике из пяти, можно обнаружить, что их цвет остается определенно серым. Более того, фиксация взора на центральной точке не вызовет ухудшения всего изображения, как это было с первой фотографией.

РЕЗУЛЬТАТЫ этих наблюдений легко обобщить. Случайное расположение цветных шестиугольников, окружающих пять серых шестиугольников, приводит каким-то образом к более живому восприятию цвета и одновременно стабилизирует восприятие самих серых шестиугольников. И наоборот, упорядоченное размещение цветных шестиугольников уменьшает живость их цветов и делает цвет серых шестиугольников непостоянным, т. е. разрушает константность восприятия цвета.

На третьем изображении, помещенном на с. 54, шестиугольники расположены по той же схеме, что и на первом, за исключением окрестности четырех серых шестиугольников. Кольцо шестиугольников, окружающее каждый из серых шестиугольников, перестроено: сами шестиугольники этого кольца остались прежними, но их порядок изменен. Средние уровни интенсивности красного, зеленого и синего тонов в окрестности серых шестиугольников, таким образом, остались прежними. Однако цве-

5



6



ТЕ ЖЕ ИЛЛЮЗИИ, что и на двух первых изображениях, но цвет шестиугольников подобран таким образом, чтобы соответствовать комбинациям красок, используемых в полиграфии. Шестиугольники варьируют по степеням яркости голубого, пурпурного и желтого тонов. Как и на предыдущих изображениях, серые шестиугольники кажутся разноцветными в окружении упорядоченных по хроматичности шестиугольников и серыми в рандомизированном окружении.

товые различия серых шестиугольников стали меньше.

Четвертое изображение, помещенное на с. 55, еще ближе к исходной схеме. Здесь попарно (по диагоналям) поменялись местами всего четыре шестиугольника, прилегающих к четырем серым шестиугольникам. Хотя в остальном изменений нет, серые шестиугольники практически не различаются по цвету.

Пятое и шестое изображения, помещенные на с. 56, построены в соответствии с первой и второй схемами. Однако в программу ЭВМ, порождающую изображения, были внесены изменения: хроматические метки определялись в терминах трех используемых в полиграфии цветных красок — пурпурной, голубой и желтой. (Экран дисплея фосфоресцировал, разумеется, красным, синим и зеленым цветом, как обычно, но пропорции интенсивностей свечения были подобраны так, что их комбинации имитировали цвета типографских красок.) Цветовые «иллюзии» сохраняются, хотя, как и можно было ожидать, видимые цвета отличаются от цветов первых изображений.

А теперь продемонстрируем еще одну «иллюзию». Это явление «цветных теней», которое в определенном смысле противостоит явлению константности восприятия цвета. В наиболее известной форме оно иллюстрируется рисунком на с. 51, где приведены две фотографии бюста известного естествоиспытателя XIX в. Александра Гумбольдта. В обоих случаях бюст, снятый на белом фоне, с одной стороны был освещен цветным светом, а с другой — белым. С какой стороны каким — определить трудно. Одна из теней на каждой фотографии имеет цвет окрашенного пучка света (в этом месте бюст экранирует белый свет). Однако и другая тень (там, где экранируется пучок цветного света) не выглядит бесцветной: она имеет цвет, дополнительный к цвету первой тени. (Цветной свет падал справа. Поток света отвечали ограничениям диапазона цветовой яркости. Более явный эффект наблюдается при демонстрации слайдов.)

Почему же «цветные тени» представляют собой явление, противоположное явлению константности восприятия цвета? В обоих случаях видимая окраска света отличается от той, которая есть «на самом деле», т. е. от той, которую можно предсказать, исходя из физических характеристик света. Явление «цветных теней» заключается в том, что одинаковые спектральные характеристики (один и тот же физический стимул) дают раз-

ные видимые цвета. В то же время константность восприятия цвета означает, что при разных спектральных характеристиках света человек видит один и тот же цвет.

Воспринимаемые цвета пяти серых шестиугольников на первом изображении по сути демонстрируют явление «цветных теней». Вообразите, что можно подстраивать отражающую способность каждого из четырех серых шестиугольников так, чтобы они были одинакового цвета с центральным (помеченным точкой). Все четыре «подстройки» были бы разными. Таким образом, явление «цветных теней» (одинаковые стимулы кажутся разными) превратилось бы в подобие модели константности восприятия цвета (разные стимулы кажутся одинаковыми). Если теперь перемешать оставшиеся шестиугольники, как это сделано на втором изображении, то наши пять шестиугольников окажутся явно различного цвета.

ОЧЕВИДНО, что переработка сенсорной информации о цвете не устанавливает однозначного соответствия воспринятого цвета спектру света. В нашем повседневном опыте видения при дневном свете, целиком определяемого константностью восприятия цвета и эффектом цветных теней, таких прямых соответствий нет. Поэтому правила переработки информации о цвете должны отличаться от законов, которым подчиняются реакции цветовых пигментов на свет.

Рассматривание приведенных в статье изображений наводит на некоторые догадки о природе таких правил. Во-первых, можно предположить, что цвета определяются на границах и в вершинах углов (где границы пересекаются). Это — единственные места на изображениях, где хроматические данные изменяются, и поэтому становится возможным сравнение отражающих способностей. В этом отношении особенно информативно первое изображение. Снова зафиксируйте взор (закрыв один глаз) на центральной точке рисунка. Наблюдайте, как через несколько секунд четыре угловых шестиугольника исчезнут, затем вновь появятся и снова исчезнут. Если следить за происходящим достаточно внимательно, то можно обнаружить, что шестиугольники появляются в тот момент, когда глаз совершает движение. Немного попрактиковавшись, вы научитесь полностью управлять исчезновением и появлением шестиугольников.

То, что вы наблюдаете, — достаточно простой пример явления, известного как стабилизация изображе-

ния на сетчатке. Уже в конце XIX в. было известно, что если изображение на сетчатке неподвижно, то глаз перестает его видеть: изображение как бы пропадает и возникает специфическое ощущение слепоты, или так называемое «пустое поле». «Исчезновение» изображения обусловлено, главным образом, тем обстоятельством, что каждый рецептор (колбочка) глаза адаптируется к падающему на него свету. Рецепторы сигнализируют нервной системе только об изменениях, а не об устойчивых состояниях. Поэтому зрение работает хорошо, пока глаз движется; при покоящемся глазе оно ухудшается. Этот факт подкрепляет предположение, что информация о границах и углах имеет решающее значение для зрения, т. е. то предположение, которое мы сделали, основываясь на явлении константности восприятия цвета. Глаз должен двигаться для того, чтобы отдельные рецепторы реагировали на пересечение границ.

ВТОРОЙ вывод, который можно сделать, — это то, что видимый цвет некоторой области зависит не только от окружения этой области, но и от «истории» участка сетчатки, на который проецируется изображение этой области. Другими словами, группа рецепторов, на которую последовательно падают различные пучки света, дает такой сигнал о каждом отдельном стимуле, который отличен от сигнала этих же рецепторов, когда история предъявлений более скудна. Это заключение также вытекает из анализа восприятия первого изображения. Вспомните, что когда вы фиксируете взор на одном из четырех угловых шестиугольников, его цвет быстро становится неопределенным. Если же вы рассматриваете изображение, позволяя своему взору «гулять» по нему, то впечатление, что вы рассматриваете четыре по-разному окрашенных шестиугольника, сохраняется.

Явление стабилизации изображения на сетчатке позволяет дать объяснение этим фактам. Поскольку неподвижное изображение перестает восприниматься, стратегия фиксации взора на каком-либо элементе поверхности с целью определения его цвета бесполезна. Однако, поскольку рецепторы адаптируются немедленно (с помощью современной аппаратуры установлено, что изображение, независимо от яркости и контрастности, «исчезает» за время около 2 с), обычные плавные смещения направления взора дают много разнообразной информации отдельным колбочкам.

Анализ восприятия второго и последующего изображений дает основание сделать аналогичные заключения. Он показывает, что при увеличении разнообразия в окружении некоторого элемента поверхности видимый цвет последнего становится более определенным и стабильным во времени и, кроме того, более надежным коррелятом отражающей способности данного участка. В реальном мире многообразие является правилом. Упорядоченность типа той, что изображена на первом рисунке, встречается редко — исключение составляет, пожалуй, покровительственная окраска некоторых животных. Это природное многообразие и непрерывные изменения направления взора обеспечивают такое варьирование пространственного окружения элемента поверхности и экспозиции колбочек в реальном времени, какого мог бы желать инженер для машинного цветового зрения.

ТЕПЕРЬ обратимся к инженерным проблемам конструирования системы цветового зрения. Одной из наиболее полезных особенностей любой сенсорной системы — природной или искусственной — является текущая нормализация, называемая в психологии адаптацией, а в инженерии — автоматической настройкой на входной сигнал. Идея заключается в подстройке чувствительности системы к среднему уровню входного сигнала, так чтобы все изменения лежали в пределах одного и того же ограниченного динамического диапазона. Эта задача реализуется путем определения текущей средней величины сигнала на входе с целью управления коэффициентом усиления. Представьте себе, например, объектив фотоаппарата, который темнеет при ярком свете и просветляется при тусклом освещении, причем эти изменения происходят настолько четко, что фотографии, отснятые с одинаковой выдержкой в дневное время и в сумерках, имеют одинаковое качество.

Стратегия автоматической настройки на входной сигнал применительно к чувствительности колбочек могла бы принять следующую форму. Обозначим интенсивность света, падающего в данный момент на колбочку, через L . История экспозиции колбочки в реальном времени описывается величиной A . Она является результатом осреднения интенсивности света, падавшего на колбочку до настоящего момента, и определена таким образом, что учитываемый вклад света тем меньше, чем дальше момент времени в прошлом. Гельмгольц называл эту величину «темным

светом» (dark light).

Исследуем отношение разности света и темного света к их сумме (т. е. $L - A$ к $L + A$). Учет этого отношения обеспечивает автоматическую настройку. При неизменном освещении, когда A (темный свет) равно L (свет), отношение равно нулю. Если L внезапно возрастает, отношение становится положительным. Если возросшее значение L сохраняется, то A возрастает до L и отношение опять стремится к нулю. Если L резко уменьшается, отношение становится отрицательным и затем, по мере уменьшения A и приближения его к L , опять приближается к нулю. Если L увеличивается или уменьшается на фиксированную часть своего значения, так же изменяется отношение. Увеличение L во много раз по отношению к A заставляет отношение приблизиться к 1. Наконец, если L уменьшается во много раз по сравнению с A , отношение приближается к -1 . Значение отношения не выходит за пределы интервала $(-1, +1)$ (так называемый предел компрессии).

ПРЕДСТАВИМ себе полосу колбочек, действие каждой из которых основано на описанной выше стратегии. Если бы они были независимы друг от друга, то любое изображение, неподвижное на такой полоске, в любой ее точке дало бы нулевой сигнал. Теперь предположим, что колбочки имеют латеральные связи и могут «сообщать» друг другу о величине A , причем сила такого сигнала обратно пропорциональна расстоянию между ними. Неподвижное изображение опять же создает нулевой сигнал по всей полоске. Однако теперь изменение величины L в любой колбочке будет оценено не только по отношению к уровню адаптации A данной колбочки, но также и по отношению ко всем значениям A окружающих колбочек. Другими словами, отдельные колбочки дают временное среднее темного света, а их связи друг с другом — пространственное. Три полоски таких колбочек — по одной для каждого пигмента (если колбочки всех полос взаимно соединены), обеспечивают трехцветное референтное поле для любых изменений L в любой точке изображения. Сигналы на выходе не несут информации о происшедших нормализациях; система автоматически настроилась и компенсирует изменяющиеся условия освещения. Она по-своему хорошо обеспечивает константность восприятия цвета.

С этого момента разнообразие как характеристика реального мира начинает играть важную роль. Оно обес-

печивает в целом весьма схожую текущую историю для каждого участка сетчатки движущегося глаза. Оно также дает хороший шанс для того, чтобы средняя интенсивность всех пучков света, падающих на любой узкий участок сетчатки, приблизилась к среднему значению интенсивности света для более широкого поля зрения. Более того, временные средние приближаются к пространственным. Таким образом, разнообразие окружающей среды позволяет благодаря местным сопоставлениям при пересечении границ получать надежную константность восприятия цвета всей наблюдаемой сцены.

Разнообразие имеет отношение не только к распределению отраженных пучков света, но и к распределению отражательных способностей в зонах границ и углов. Эти отношения в большой степени независимы от относительных размеров граничащих зон и дают основную информацию для зрения, а несоответствие соседних участков по величине становится незначимым в довольно широком диапазоне несоответствия. Действительно, как показывает четвертое изображение, наличие маленькой области, обладающей явным спектральным отличием от упорядоченного фона, оказывается достаточно, для того чтобы обеспечить константность восприятия цвета соседнего с ней серого шестиугольника.

В КАКОЙ степени эта теория цвета приложима к зрительной системе человека? Известно, что информация в зрительной системе перерабатывается на нескольких уровнях. Колбочки передают информацию по зрительному нерву в особый отдел мозга, называемый латеральным колленчатом телом, которое в свою очередь заставляет работать участок коры головного мозга, называемый первичной зрительной корой. Колбочки, таким образом, — это всего лишь первичные элементы сложной сенсорной системы, и может показаться удивительным, что мы приписываем им (и их связям) такую большую роль в восприятии цвета.

Согласно данным физиологии, однако, обнаружение границ и углов начинается с сетчатки. В то же время, поскольку каждая граница отмечает изменение качества (например, различие в цвете или яркости), обнаружение границы предполагает исходное опознание такого качества, иначе различие нельзя обнаружить. (Различные границы между красным и зеленым требуют существования априорного разделения красноты и зелени зрительной системой.) Было бы край-

не неэкономично и одновременно ненадежно, если бы сетчатка перекладывала задачу по переработке цветовой информации на другие уровни зрительной системы, передавая информацию о таких качествах, как цвет и границы, по отдельным каналам. Более того, такая передача потребовала бы слишком неумеренной загрузки каналов.

Простой принцип экономии приводит к выводу о том, что переработка основной информации о цвете колбочками и непосредственно примыкающей к ним ступенью сетчаточного уровня представляет собой достаточно надежную систему. Этот вывод, по нашему мнению, более предпочтителен, чем представление о переработке этой информации на более высоких уровнях типа зрительной коры. Однако предстоит еще выяснить, такую ли стратегию избрала природа.

Издательство
МИР
предлагает:

ТИИЭР
«Труды Института
инженеров
по электротехнике
и радиоэлектронике»

перевод журнала

Proceedings of the IEEE

Радиоизмерения:
методы и эталоны

Тематический выпуск.

1985 г., т. 74, № 1

В выпуск вошло более 40 обзорных и оригинальных работ по проблемам измерения частоты, времени, мощности, фазы, импеданса, характеристик электромагнитного поля и антенн. Значительная часть работ касается состояния национальных эталонов и их международных сличений.

Объем выпуска 35 л., цена 3 р. 30 к.

Выпуск высылается наложенным платежом Московским Домом книги (121 019, Москва, пр. Калинина, 26, п/я 42).



Самый далекий квазар

ГРУППА английских и американских астрономов обнаружила наиболее удаленный объект из всех, когда-либо наблюдавшихся во Вселенной. Они открыли квазар — галактику с плотным ядром, возможно представляющую собой черную дыру и находящуюся на расстоянии 12,4 млрд. световых лет от Земли. Объект, отстоящий на 10 млн. световых лет от квазара, считавшегося до последнего времени самым удаленным, находится на расстоянии, равном 90% расстояния от Земли до границы видимой Вселенной.

В статье, опубликованной в журнале «Nature», С. Хазард из Питтсбургского университета, Р. Макмагон из Кембриджского университета и У. Сарджент из Калифорнийского технологического института описали метод, с помощью которого они измерили расстояние до квазара. Метод основан на принятой модели Вселенной, в основе которой лежит предположение, что все галактики разбегаются в результате первоначального взрыва, произошедшего примерно 15—20 млрд. лет назад. В соответствии с этой теорией считается, что чем дальше объект Вселенной находится от Земли, тем больше его скорость. Другими словами, расстояние пропорционально скорости.

Если прямые измерения расстояния выполнить трудно, то оценить скорость относительно легко. Длина волны света, излучаемого удаляющимся объектом, увеличивается пропорционально скорости объекта, так же как падает высота гудка поезда, удаляющегося от наблюдателя. «Можно сказать, что при расширении Вселенной «расширяется» и свет», — поясняет Сарджент. Поскольку увеличение длины волны света соответствует сдвигу в красную область оптического диапазона, это явление получило название красного смещения. По величине красного смещения в излучении небесного объекта можно определить его скорость и расстояние до него.

Для измерения расстояния до квазара, обозначенного QSO1208 + 1011, Сарджент и его коллеги использовали специальную фотоэмульсию, чувствительную к инфракрасному излучению. Работая с 5-метровым телескопом, установленным в Паломарской обсерватории, ученые определили, что красное смещение в оптическом излучении квазара составляет 3,8, что

на 0,02 единицы больше, чем в излучении PKS2000 — 330, считавшегося ранее самым удаленным квазаром. С помощью той же аппаратуры астрономы надеются обнаружить еще более удаленные квазары, для которых величина красного смещения составляет 4,2.

Выводы подтверждаются

ТЕХ, КТО впервые начал рассматривать климатические последствия ядерной войны, обычно называемые ядерной зимой, критикуют за манипулирование неопределенными данными, приводящими к максимальным эффектам. Однако и последняя гипотеза «умеренной» ядерной зимы, недавно предложенная С. Томпсоном и С. Шнейдером из Национального центра атмосферных исследований, похоже, не слишком отличается от гипотезы, изложенной первоначально в так называемом докладе ТТАПС (получившем свое наименование по начальным буквам фамилий его авторов — Р. Турко, О. Тун, Т. Аккерман, Дж. Полак и К. Саган), опубликованном в журнале «Science» три года назад. (См. статью этих же авторов «Климатические последствия ядерной войны» в журнале «В мире науки», 1984, № 10. — *Ред.*)

В докладе ТТАПС утверждается, что дым и пыль, образованные в результате ядерных взрывов во время ширококомасштабной ядерной войны, могут экранировать солнечный свет и тем самым привести к уменьшению освещенности и понижению температуры на поверхности Земли в течение продолжительного времени. Такие глобальные воздействия на окружающую среду могли бы погубить растительную жизнь, которая является первым звеном в пищевой цепи человека, что поставило бы под угрозу цивилизацию и человека как биологический вид. В докладе также указывается, что небольшое ослабление солнечного света сменяется почти полным его экранированием при превышении довольно узкого «порога» в области значений, характеризующих количество материала, выброшенного в атмосферу, и что эта пороговая величина может быть достигнута при взрыве бомб общей мощностью 100 Мт над 100 городами.

Томпсон и Шнейдер в своей статье в журнале «Foreign Affairs» приходят к выводу, что климатические последствия ядерной войны, в частности гло-

бальное понижение температуры, будут менее значительными, чем предсказывают авторы упомянутого доклада. Хотя они и признают возможность климатических эффектов, могущих нарушить окружающую среду в глобальных масштабах, однако отказываются от понятия о численно определяемом «пороге» для ядерной зимы.

Авторы доклада ТТАПС указывают, что пересмотренные расчеты температуры не создают противоречий. Хотя в их докладе отмечалась возможность понижения температуры на 20—40 °С (при условии что война происходит летом и общая мощность бомб равна 5000 Мт), такое предсказание основывалось на одномерной атмосферной модели (в которой атмосферные условия усреднены по всем широтам и меридианам), примененной к условиям гипотетической планеты, целиком покрытой сушей. Океаны — это огромные резервуары тепла; поэтому их исключение из модели привело к преувеличению оценки понижения температуры. В самом докладе ТТАПС отмечается, что учет влияния океанов в более сложной модели привел бы к снижению величины падения температуры примерно в два раза.

Томпсон и Шнейдер основывают свои выводы именно на такой трехмерной модели атмосферы, учитывающей «смягчающий» эффект океанов, географическое распределение дыма в атмосфере и сезонные вариации климата. Оценки понижения температуры, приводимые Томпсоном и Шнейдером и лежащие в пределах от 5 до 15 °С, похоже, согласуются с предсказаниями авторов доклада ТТАПС.

Саган утверждает, что очень трудно установить связь между количеством атмосферного дыма и пыли и числом ядерных взрывов над определенными объектами. Тем не менее он считает, что имеет смысл хотя бы приблизительно выразить пороговую величину ослабления солнечного излучения через число ядерных зарядов при выработке ядерной политики или стратегии выбора целей. Саган считает также, что наряду с разрушительными «быстрыми» эффектами ядерных взрывов, вызванными ударной волной, проникающим излучением, тепловым излучением и радиоактивными осадками (которые, согласно данным Всемирной организации здравоохранения, могут привести к смерти миллиард человек во всем мире), климатические последствия могут привести к смерти еще миллиарды человек, что в сумме может составить почти всю численность населения Земли.

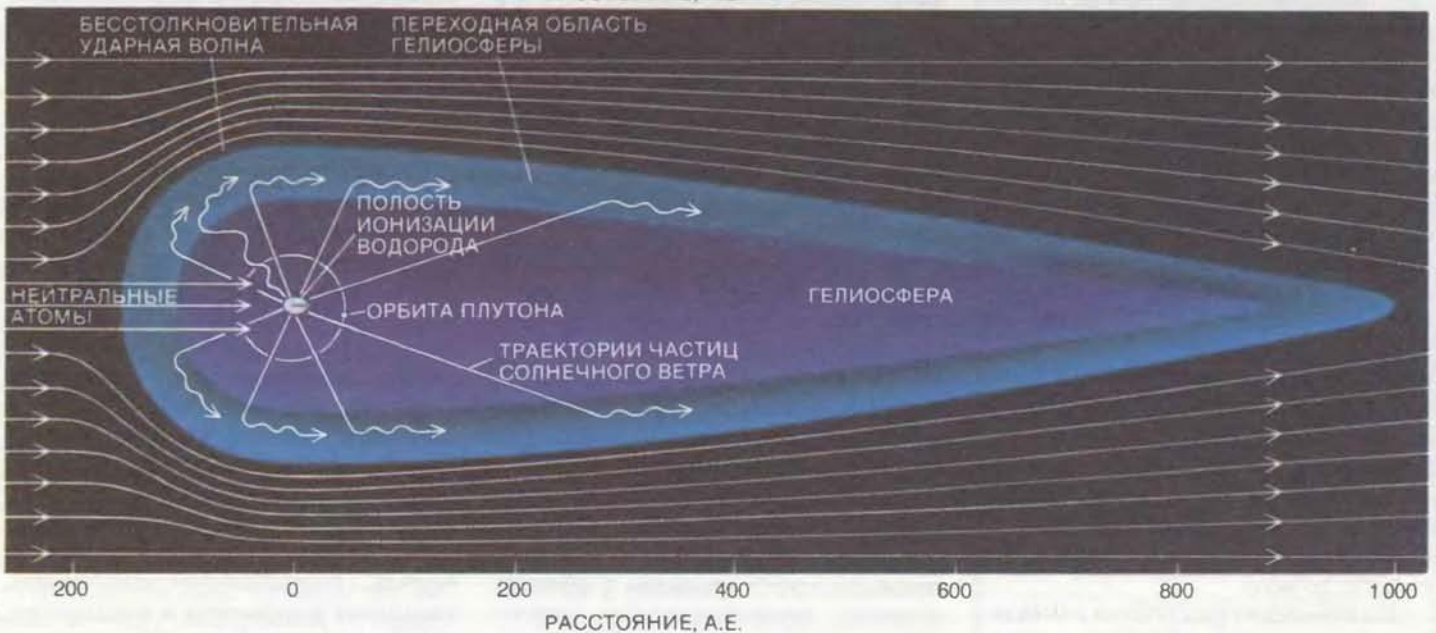
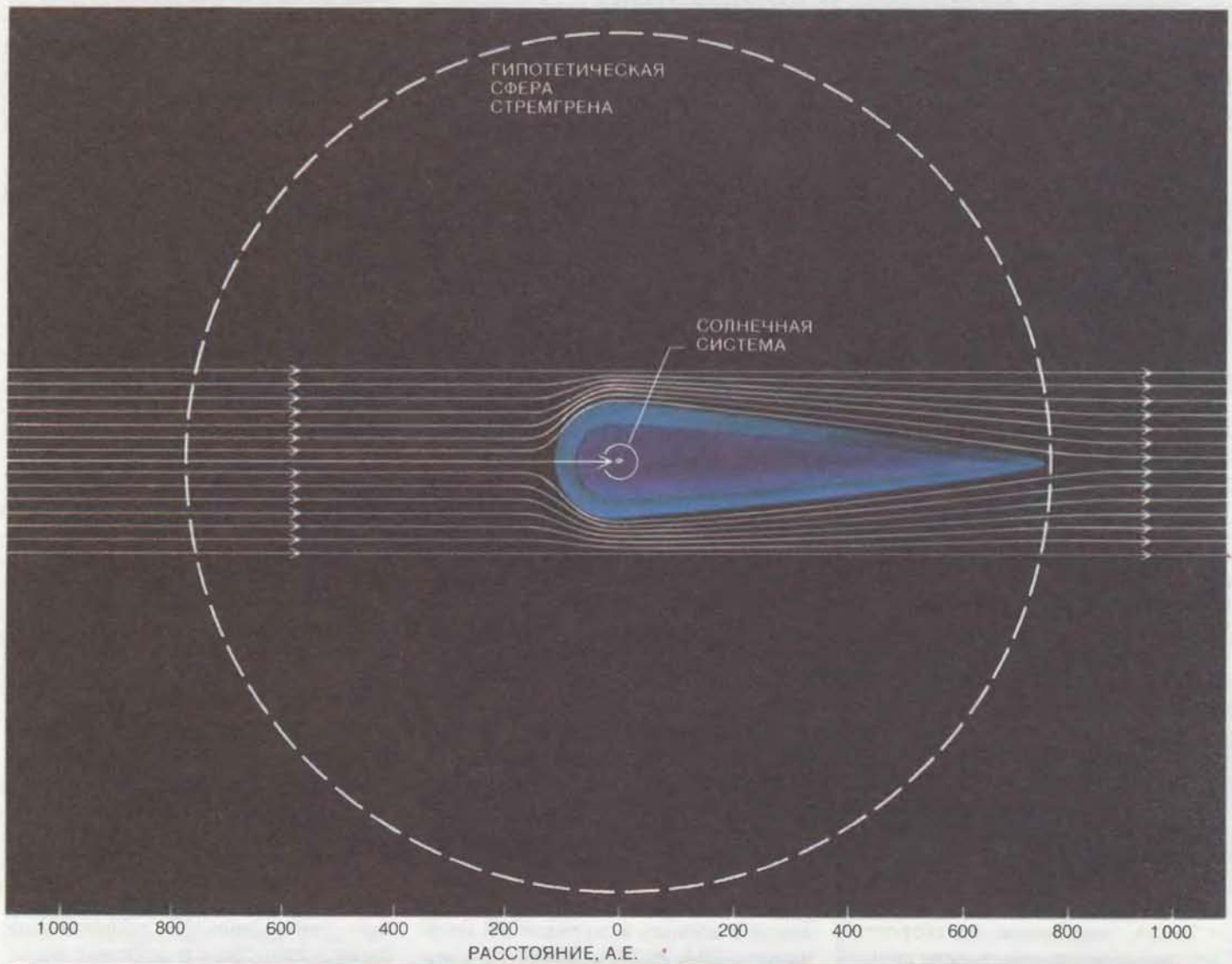


СХЕМА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СОЛНЦА с окружающей его межзвездной средой, состоящей в основном из водорода и гелия. В начале 60-годов астрофизики считали, что излучение Солнца ионизует межзвездный газ, в результате чего образуется гигантская область сильно ионизованной плазмы, простирающаяся далеко за пределы Солнечной системы (*вверху*). Эта область носит название зоны Стремгrena, или области III. Обнаружение значительного количества нейтрального водорода во внутренних областях Солнечной системы заставило отказаться от этой модели. Солнечная система действительно погружена в межзвездное

вещество, однако это вещество движется относительно Солнца и успевает покинуть ее пределы, не претерпев ионизации. При прохождении газа через Солнечную систему его частицы под действием гравитации собираются в длинный «хвост» с подветренной по отношению к движению межпланетного газа стороны Солнца (на верхнем рисунке эта область имеет форму вытянутой капли; на нижнем — она показана в увеличенном масштабе). При взаимодействии содержащихся в межзвездном облаке заряженных частиц с частицами солнечного ветра образуется бесстолкновительная ударная волна.

Взаимодействие Солнца с межзвездным веществом

В настоящее время через Солнечную систему проходит облако межзвездного газа. Возможно, в прошлом встречи с более плотными облаками оказывали заметное влияние на климат Земли

ФРАНЧЕСКО ПАРЕШ, СТЬЮАРТ БОЙЕР

ВСЕ ЗВЕЗДЫ образуются из плотных облаков газа и пыли и в начале своей эволюции окружены остатками этих облаков. Первичное облако постепенно рассеивается, оставляя звезду блистать в одиночестве, однако ее взаимодействие с межзвездным веществом не всегда на этом заканчивается. Одно из огромных облаков межзвездного газа, блуждающих по Галактике, может встретить эту звезду и поглотить ее.

В настоящее время Солнце окружено относительно разреженным по астрономическим масштабам и очень сильно разреженным по земным масштабам облаком газа, плотность которого составляет примерно 0,1 атом на 1 см^3 . Это межзвездное вещество состоит в основном из водорода и гелия и проходит через Солнечную систему с небольшой по астрономическим стандартам скоростью 20 км/с (примерно 75 000 км/ч). По-видимому, его источником является область в направлении созвездия Центавра и движется оно в направлении созвездия Кассиопеи.

Удивительно то, что достаточно полное понимание механизма взаимодействия Солнца с межзвездным веществом было достигнуто лишь в последние 15 лет. До этого большинство астрофизиков были уверены, что простая модель, успешно описывающая взаимодействие горячих массивных звезд с межзвездными облаками, может быть применена и для Солнца — сравнительно небольшой и холодной звезды. В результате серии работ многих исследователей, среди которых были и авторы статьи, появилась новая, более сложная модель, описывающая взаимодействие Солнца с межзвездной средой. Эта модель даже навела некоторых исследователей на мысль о том, что периоды охлаждения на Земле были результатом встречи Солнечной системы с плотными молекулярными облаками.

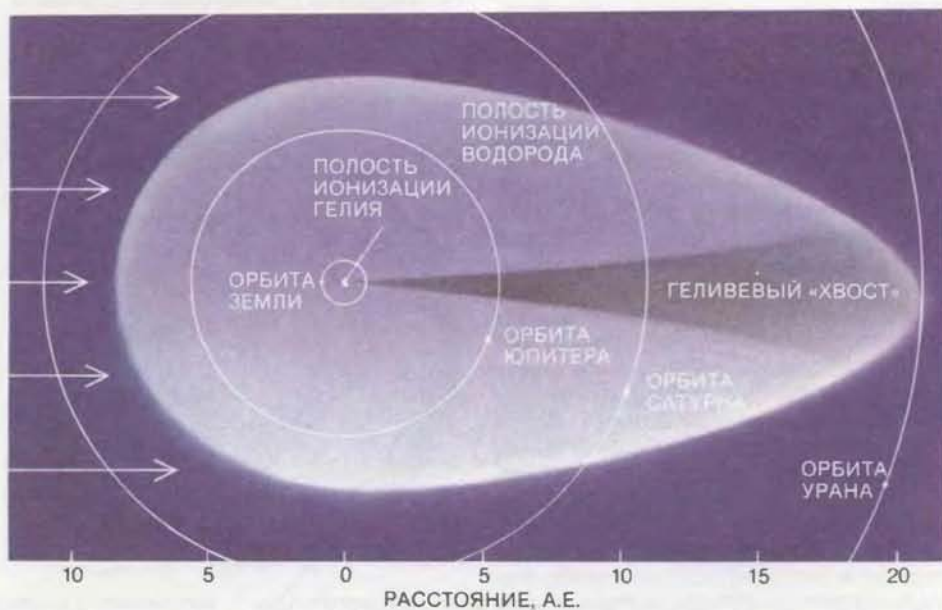
ОПИСАНИЕ взаимодействия Солнца с межзвездной средой удобно начать с простой модели взаи-

модействия с ней горячих массивных звезд спектральных классов О и В. Такие звезды приблизительно в 20 раз массивнее Солнца, а температура их поверхности достигает $30\,000\text{ }^\circ\text{C}$, что в пять раз больше температуры поверхности Солнца. Звезды спектральных классов О и В испускают огромное количество электромагнитного излучения с длинами волн меньше 912 \AA ($91,2 \times 10^{-9} \text{ м}$), вызывающего ионизацию атомов водорода. Ионизация представляет собой процесс, при котором от атома отрываются его валентные (внешние) электроны. Например, в результате ионизации атома водорода образуются отрицательно заряженный электрон и положительно заряженный протон.

Поэтому в облаке межзвездного вещества, окружающем звезду спектрального класса О или В, может образовываться гигантская область сильно ионизованной плазмы. Такая область носит название зоны (сферы)

Стремгрена, или области НII, и имеет радиус от 100 до 200 св. лет. Наиболее характерный пример подобного явления можно наблюдать в туманности Ориона, которая представляет собой относительно близкое к Земле скопление молодых горячих звезд и плотного межзвездного вещества. Межзвездное вещество в этой туманности сильно неоднородно, поэтому форма областей НII отличается от сферической, однако физический механизм их образования такой же. Происходящие в туманности Ориона процессы вызывают настолько сильные эффекты при наблюдениях, что ее изображения не сходят со страниц всевозможных изданий по астрономии.

Блестящий успех модели зоны Стремгрена в описании взаимодействия с межзвездной средой массивных звезд привел астрофизиков к уверенности, что она применима и для Солнца. Считалось, что сравнительно небольшого количества испускаемого



ПОЛОСТИ ИОНИЗОВАННОГО ВОДОРОДА И ГЕЛИЯ окружают Солнце, однако их размеры на несколько порядков меньше размеров гипотетической солнечной зоны Стремгрена. Обе эти полости не выходят за пределы гелиосферы. Внешние поверхности полостей, показанные на рисунке, расположены там, где половина атомов соответствующего элемента уже ионизована.

Солнцем жесткого электромагнитного излучения достаточно для образования зоны Стремгrena. Хотя рассчитанный на основании этой модели радиус ионизованной области был по галактическим масштабам невелик (0,02 св. года), он в 25 раз превышал среднее расстояние от Солнца до Плутона — самой внешней планеты Солнечной системы. На основании этих расчетов был сделан вывод о том, что в пределах указанной области нейтральные атомы могут присутствовать лишь в атмосферах некоторых планет; межпланетное пространство должно быть заполнено ионизованной плазмой.

Однако в начале 60-х годов Г. Фридман и его коллеги из Научно-исследовательской лаборатории ВМС США (NRL) сделали поразительное открытие, опровергшее концепцию солнечной зоны Стремгrena. Исследователи из NRL запустили за пределы земной атмосферы несколько ракет, оснащенных детекторами электромагнитного излучения. Приборы зарегистрировали интенсивный рассеянный фон ультрафиолетового излучения с длиной волны 1216 Å*. Излучение такой длины волны является характерным признаком присутствия нейтрального водорода. Атом водорода излучает квант с длиной волны 1216 Å при переходе электрона с первого возбужденного уровня на основной энергетический уровень, т.е. в со-

* В этом эксперименте Г. Фридман открыл атмосферное свечение водорода. Межпланетное излучение водорода было обнаружено в 1963 г. В.Г. Куртом из Института космических исследований АН СССР с помощью советского космического аппарата «Зонд-1». — Прим. ред.

стояние с наименьшей энергией. Интенсивность обнаруженного ультрафиолетового излучения свидетельствовала о присутствии в межпланетном пространстве большого количества нейтрального водорода.

ПОЛУЧЕННЫЕ Фридманом результаты поставили исследователей в тупик, поскольку, согласно модели солнечной зоны Стремгrena, в непосредственной близости от Солнца не может быть нейтрального водорода (за исключением содержащегося в атмосферах планет). Сначала некоторые теоретики высказывали предположение, что источником ультрафиолетового излучения с длиной волны 1216 Å является газ в удаленных областях нашей Галактики, однако полученные впоследствии данные заставили отказаться от этой гипотезы. В 1970 г. У. Чемберс и его коллеги из Лос-Аламосской национальной лаборатории обнаружили анизотропию ультрафиолетового фона, которую нельзя было объяснить в предположении, что его источником служит газ из удаленных областей Галактики. Кроме того, Ф. Манге и Р. Мейер из NRL установили, что интенсивность ультрафиолетового излучения меняется с изменением активности Солнца.

На основании этих немногочисленных фактов Г. Фар и П. Блюм из Боннского университета выдвинули смелую гипотезу. Они предположили, что источником ультрафиолетового излучения служит нейтральный межзвездный газ, находящийся в пределах Солнечной системы. Этот газ остается нейтральным, поскольку он движется относительно Солнца и успевает пройти через Солнечную си-

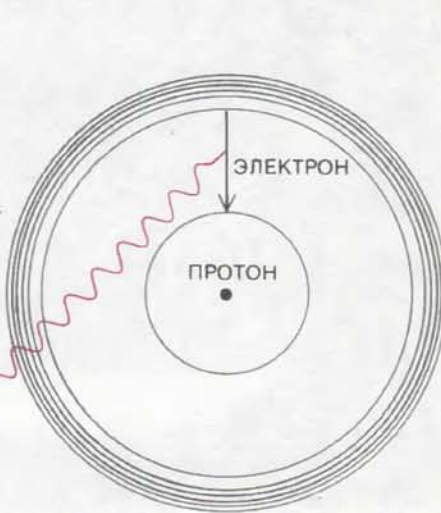
стему, прежде чем солнечное излучение ионизует его. Этот эффект должен быть особенно отчетливо выражен для Солнца, так как его излучение относительно слабое по сравнению с излучением массивных звезд.

В настоящее время выдвинутая Фаром и Блюмом гипотеза кажется достаточно очевидной, однако в то время она представлялась необычной и была встречена скептически. Хотя в современную эпоху научные исследования не ограничены никакими догмами, они ведутся обычными людьми, которым присущи все человеческие эмоции. В данном случае один американский ученый почувствовал себя столь уязвленным гипотезой Фара и Блюма, что пытался помешать публикации их работы. К счастью, он потерпел неудачу.

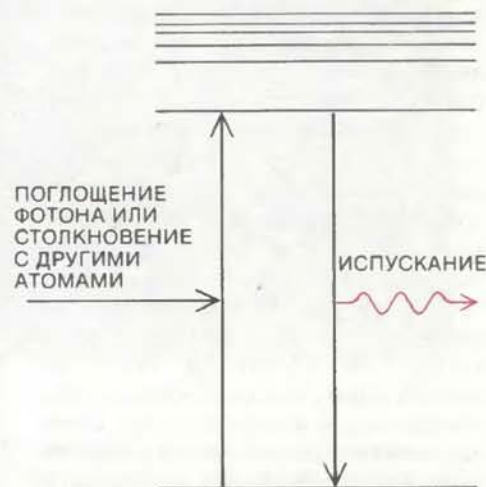
СУЩЕСТВУЕТ много фактов, подтверждающих гипотезу Фара и Блюма и свидетельствующих о том, что через Солнечную систему движется облако нейтрального межзвездного газа. В начале 70-х годов группа исследователей во главе с Ж. Берто и Ж. Бламоном из Службы Аэронавтики Французского национального центра научных исследований (CNRS) и Г. Томасом и Р. Крассой из Колорадского университета в Боулдере составила карту ультрафиолетового излучения неба на длине волны 1216 Å. Карта была составлена на основе данных, переданных приборами со спутника OGO-5 (Orbiting Geophysical Observatory). Ученые обнаружили, что основная доля ультрафиолетового излучения генерируется нейтральным водородом, находящимся в пределах 10 а. е. от Солнца, что составляет



ХАРАКТЕРНЫМ ПРИЗНАКОМ наличия нейтрального водорода служит ультрафиолетовое излучение с длиной волны 1216 Å ($121,6 \cdot 10^{-9}$ м). Атом водорода испускает излучение с такой длиной волны при переходе электрона из первого возбужденного энергетического уровня ($n = 2$) на основной уровень ($n = 1$), т.е. в состояние с наименьшей энергией. При столкновении с другими атомами или поглощении



излучения с длиной волны 1216 Å электрон может перейти на более высокий энергетический уровень (слева). Примерно через 10^{-8} с он возвращается на основной энергетический уровень, при этом в произвольном направлении испускается излучение с длиной волны 1216 Å (в середине). Обычно эти процессы изображают в виде диаграммы энергетических уровней (справа).

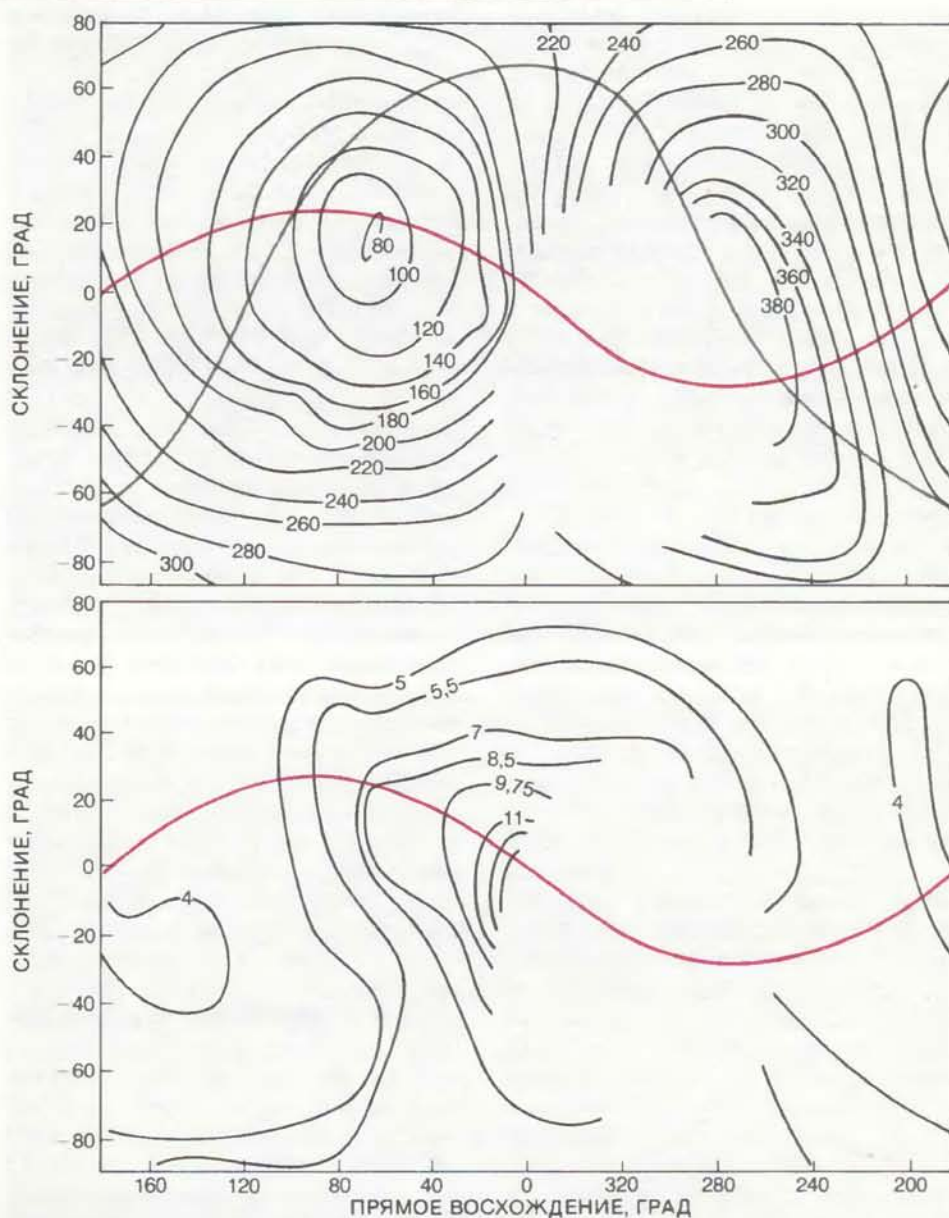


примерно 1/4 расстояния от Солнца до Плутона. (1 астрономическая единица, сокращенно а. е., равна среднему расстоянию от Земли до Солнца, т. е. 150 млн. км.).

Почти в это же время нами были проведены исследования, также подтвердившие гипотезу Фара и Блюма. Работая в Калифорнийском университете в Беркли, мы разработали детектор, предназначенный для регистрации ультрафиолетового излучения нейтрального гелия на длине волны 584 Å; излучение с такой длиной волны генерируется при переходе атома гелия из первого возбужденного состояния в основное состояние. В 1970 г. мы запустили ракету с установленным на ней детектором, который обнаружил слабое, но достаточно четко наблюдаемое свечение, свидетельствующее о наличии нейтрального гелия. Это открытие было подтверждено в 1972 г. другими учеными, составившими с помощью нескольких спутников и межпланетных зондов карту излучения гелия для обширных участков неба. Наиболее значительными из этой серии наблюдений были измерения, проведенные Майером и Ч. Веллером-младшим из NRL, которые в 1974 г. опубликовали данные, полученные с помощью детекторов, установленных на борту принадлежащего министерству обороны США спутника. В 1978 г. на основании данных, полученных с помощью межпланетной автоматической станции «Маринер-10», Л. Брэдфут, Ш. Кумар и Дж. Аджелло составили новую, более подробную карту.

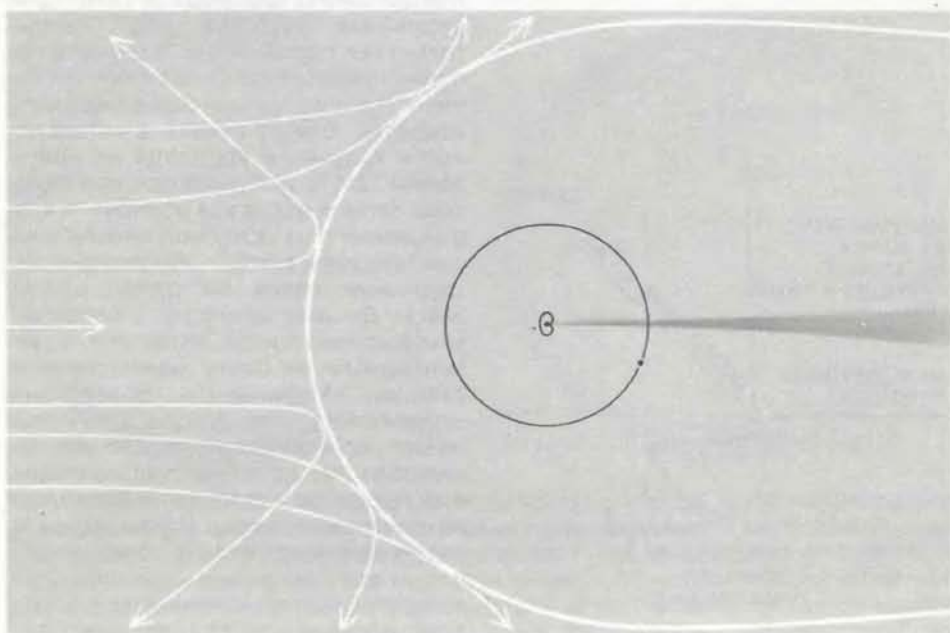
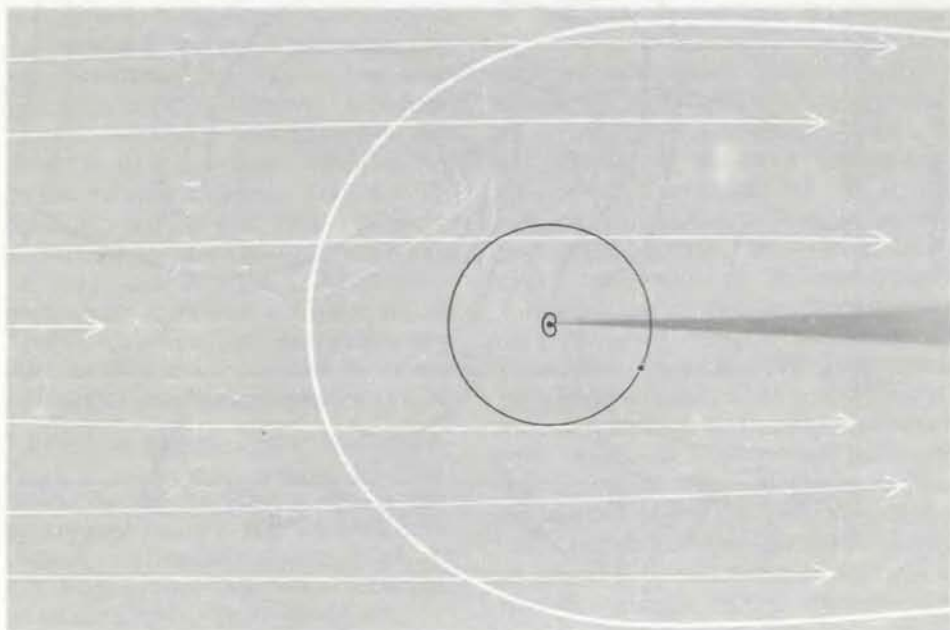
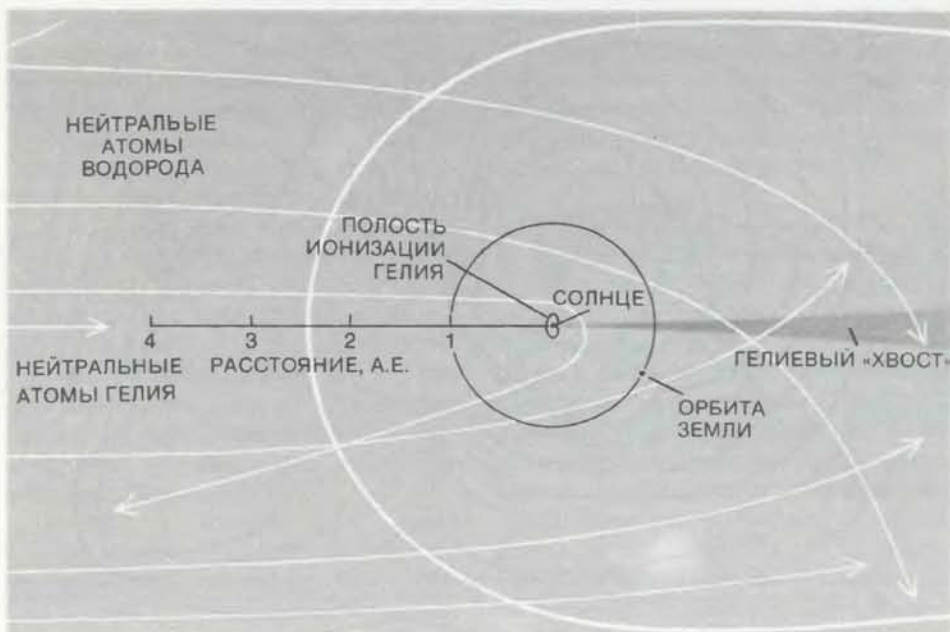
Результаты проведенных исследований подтверждают тот факт, что Солнечная система окружена облаком межзвездного вещества, состоящего в основном из атомарных водорода и гелия. Атомы водорода поглощают ультрафиолетовое излучение Солнца на длине волны 1216 Å и затем переизлучают его, но уже в другом произвольном направлении. Такие же процессы происходят и с атомами гелия, но на длине волны 584 Å. Другими словами, нейтральные атомы гелия и водорода рассеивают солнечное излучение. Наблюдатель, который не смотрит прямо на Солнце, будет видеть монохроматическое рассеянное излучение. Этот эффект напоминает рассеяние солнечного света туманом.

ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ вещества через Солнечную систему на нейтральные атомы действуют две силы: сила гравитационного притяжения Солнца и сила отталкивания, вызванная давлением солнечного излучения. В зависимости от стадии 11-лет-



КАРТЫ ИНТЕНСИВНОСТИ излучения нейтрального водорода и гелия для различных участков неба свидетельствуют о том, что в Солнечной системе присутствует значительное количество нейтрального межзвездного вещества. *Вверху* показана интенсивность излучения водорода на длине волны 1216 Å, испускаемого при переходе атомов водорода из первого возбужденного на основной энергетический уровень; *внизу* — интенсивность излучения гелия на длине волны 584 Å. Данные получены с помощью ультрафиолетового детектора, установленного на борту межпланетной станции «Маринер-10». Вследствие ограничения угла обзора детектора он мог регистрировать только излучение областей пространства, лежащих вне пределов секторов, показанных на диаграмме слева. Интенсивность излучения измерялась в рэлях; 1 рэлей — это такая интенсивность, при которой на 1 см² поверхности в 1 с со всех направлений падает миллион квантов (фотонов).





него цикла солнечной активности радиационное давление может ослаблять, нейтрализовать и даже превосходить силу гравитационного притяжения к Солнцу нейтральных атомов водорода. В период низкой солнечной активности гравитационное притяжение доминирует над радиационным давлением и притягивает атомы водорода к Солнцу. В периоды большей активности радиационное давление может уравнивать гравитационное притяжение. При этом атомы движутся сквозь Солнечную систему по прямолинейной траектории, параллельной направлению их первоначального движения.

В период высокой солнечной активности радиационное давление уносит атомы водорода от Солнца. Радиационное давление Солнца оказывает существенное влияние только на атомы водорода; поскольку атомы гелия в четыре раза тяжелее атомов водорода, они почти не подвержены его влиянию. Атомы гелия всегда движутся по изогнутым траекториям, сходящимся позади Солнца.

Атому нейтрального водорода, движущемуся со скоростью 10 км/с, потребуется примерно 50 лет для того, чтобы пройти расстояние в 100 а. е., в пределах которого он подвергается сильному воздействию солнечной радиации и гравитации. Поскольку продолжительность солнечного цикла составляет 11 лет, атом на различных участках своей траектории

ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ НЕЙТРАЛЬНЫХ АТОМОВ межзвездного вещества через Солнечную систему на них действуют две противоположно направленные силы: сила гравитационного притяжения Солнца и сила отталкивания, обусловленная давлением солнечного излучения. Последняя оказывает заметное влияние только на движение атомов водорода; на атомы гелия, которые в четыре раза тяжелее атомов водорода, она мало влияет. Поэтому атомы гелия всегда движутся по искривленным траекториям, сходящимся позади Солнца. В период низкой солнечной активности гравитация доминирует над силой радиационного давления и атомы водорода притягиваются к Солнцу (вверху). В период большей солнечной активности радиационное давление может уравнивать гравитационное притяжение; в этом случае атомы движутся сквозь Солнечную систему по прямолинейным траекториям, параллельным направлению их первоначального движения (в середине). В период высокой солнечной активности давление излучения «выталкивает» атомы водорода из параболической области вокруг Солнца (внизу).

может оказаться во всех трех описанных выше положениях. Однако в действительности соотношение между силами гравитационного притяжения и радиационного отталкивания колеблется случайным образом. Поэтому для моделирования полного эффекта применяется усредненное значение.

В любом случае существует значительная вероятность того, что на пути к Солнцу атом будет ионизован; эта вероятность обратно пропорциональна квадрату расстояния между атомом и Солнцем и радиальной скорости атома, направленной в сторону Солнца. Для атомов разных элементов скорости ионизации различны; например, водород ионизируется легче, чем гелий. В определенной точке вероятность ионизации становится столь высока, что фактически весь газ можно считать ионизованным. Следовательно, в потоке газа, прошедшем эту точку, нейтральные атомы отсутствуют. Геометрическое место таких точек вокруг Солнца определяет границу области, называемой полостью солнечной ионизации.

Каждый элемент, входящий в состав нейтрального межзвездного газа, имеет свою полость ионизации. Для водорода такая полость называется областью HII, для гелия — областью HeII. Следует отметить, что наблюдаемый размер области HII на два порядка меньше предполагаемого размера гипотетической солнечной зоны Стремгrena, равного 0,02 св. года, или 1000 а. е.; наблюдаемая область HeII еще на порядок величины меньше области HII. Основанные на простых моделях расчеты показывают, что на расстоянии 5 а. е. от Солнца в направлении, откуда движется облако межзвездного вещества, плотность нейтральных атомов водорода падает в два раза по сравнению с ее начальной величиной, а на расстоянии 1 а. е. — уже в 10 раз.

Если нейтральный водород начинает ионизоваться в пределах полости радиусом от 5 до 10 а. е., то ионизация гелия начинается гораздо ближе к Солнцу. Она становится заметной на расстояниях меньше 1 а. е. от Солнца, так что эту величину можно принять за радиус полости ионизации гелия. Поскольку радиус полости меньше расстояния от Земли до Солнца, можно считать, что Земля погружена в облако нейтрального межзвездного гелия. На расстоянии 10 а. е. от Солнца в подветренном направлении находится область, в которой плотность гелия в пять-шесть раз выше его плотности в межзвездном веществе. Причиной этого является фокусировка атомов гелия под действием гравита-

ционного поля Солнца; в результате образуется гелиевый «хвост».

ЧТОБЫ построить модель, более полно описывающую взаимодействие Солнца с окружающим его межзвездным веществом, необходимо учесть тот факт, что в нем присутствуют не только нейтральные атомы, но и заряженные частицы. Когда эти частицы и связанное с ними слабое магнитное поле движутся вместе с межзвездным веществом к Солнцу, они встречают на своем пути солнечный ветер — поток заряженных частиц, испускаемых солнечной короной, в результате чего образуется бесстолкновительная ударная волна. Местоположение ударной волны зависит в первую очередь от плотности электронов в облаке газа и напряженности связанного с ним магнитного поля. Величины этих параметров известны лишь приблизительно; тем не менее можно определить примерное местоположение ударной волны, поскольку оно не очень чувствительно к их изменению. В зависимости от выбора параметров ударная волна может быть расположена на расстоянии от 75 до 200 а. е. с наветренной по отношению к движению межзвездного вещества стороны Солнца.

Непосредственно за фронтом ударной волны в направлении к Солнцу расположена турбулентная плазменная «оболочка» протяженностью около 50 а. е. Это — переходная область гелиосферы; она имеет форму сильно вытянутой капли и простирается на расстояние примерно 1000 а. е. от Солнца в подветренном направлении (в направлении движения облака межзвездного газа), где исчезает под действием межзвездного магнитного поля. Внешняя поверхность этой области называется гелиопаузой; внутренняя поверхность является границей гелиосферы — области вокруг Солнца. Внутри переходной области гелиосферы частицы солнечного ветра отклоняются в подветренном направлении и образуют «след» движения Солнца через межзвездную среду.

В результате многих наблюдений, выполненных с помощью установленных на космических аппаратах приборов, удалось с достаточной степенью точности определить скорость, направление движения, температуру и плотность втекающего в Солнечную систему облака межзвездного вещества. Труднее всего было измерить скорость движения облака как единого целого. Наилучшие результаты были получены путем измерения спектрального смещения излучения водорода на длине волны 1216 Å. Длина волны света, излучаемого движущим-

ся атомом, изменяется подобно тому, как изменяется с низкого на более высокий тон гудок поезда, проносящегося мимо неподвижного наблюдателя. Такое изменение длины волны известно как эффект Доплера. В 1977 г. Т. Адамс и П. Фриш из Чикагского университета измерили доплеровское смещение излучения межзвездного водорода на длине волны 1216 Å с помощью спектрометра, установленного на борту спутника «Коперник». На основании полученных данных была рассчитана скорость движения межзвездного облака относительно Солнца; она оказалась равной 22 км/с (75 000 км/ч).

В 1984 г. Дж. Кларк из Калифорнского университета в Беркли и один из нас (Бойер) совместно с Фаром и Г. Лэйем из Боннского университета повторили эти измерения с помощью спектрометра, установленного на борту спутника IUE (International Ultraviolet Explorer). В результате было получено значение 26 км/с. Разница между этими двумя значениями может служить приближенной характеристикой неравномерности движения облака.

Ученые определяли также направление, в котором движется облако относительно Солнца, путем наблюдения изменения яркости ультрафиолетового свечения при движении Земли по орбите. Полученное распределение яркости позволяет однозначно определить направление движения облака; оно движется в направлении точки со следующими астрономическими координатами: прямое восхождение 72°, склонение + 15°. Как отмечалось выше, облако движется из созвездия Центавра в направлении созвездия Кассиопея.

ВСЕ БОЛЬШЕ данных свидетельствует о том, что направление движения межзвездного газа обусловлено крупномасштабными процессами, происходящими в нашей Галактике. Астрономы уже давно изучают расширяющееся облако газа, получившее название Северный Полярный Шпур, которое покрывает обширный участок неба, включающий созвездия Змееносца, Скорпиона и Центавра. Эти созвездия находятся на расстоянии 500 св. лет от Земли в направлении к центру Галактики. Наблюдения показывают, что центром расширения этого облака является точка, расположенная вблизи центра звездной ассоциации Скорпион — Центавр. Причиной образования расширяющегося облака считается взрыв, происшедший в этой ассоциации 1—10 млн. лет назад. Наблюдаемые эффекты могут быть результатом выброса

большого количества вещества горячими звездами или внезапного взрыва одной или нескольких сверхновых. В связи с этим можно предположить, что наблюдаемое движение окружающего Солнечную систему межзвездного газа обусловлено катаклизмом, происшедшим в ассоциации Скорпион — Центавр. Возможно, газ является частью оболочки межзвездного вещества, которая была выброшена при взрыве ударной волной, распространяющейся из этой области пространства.

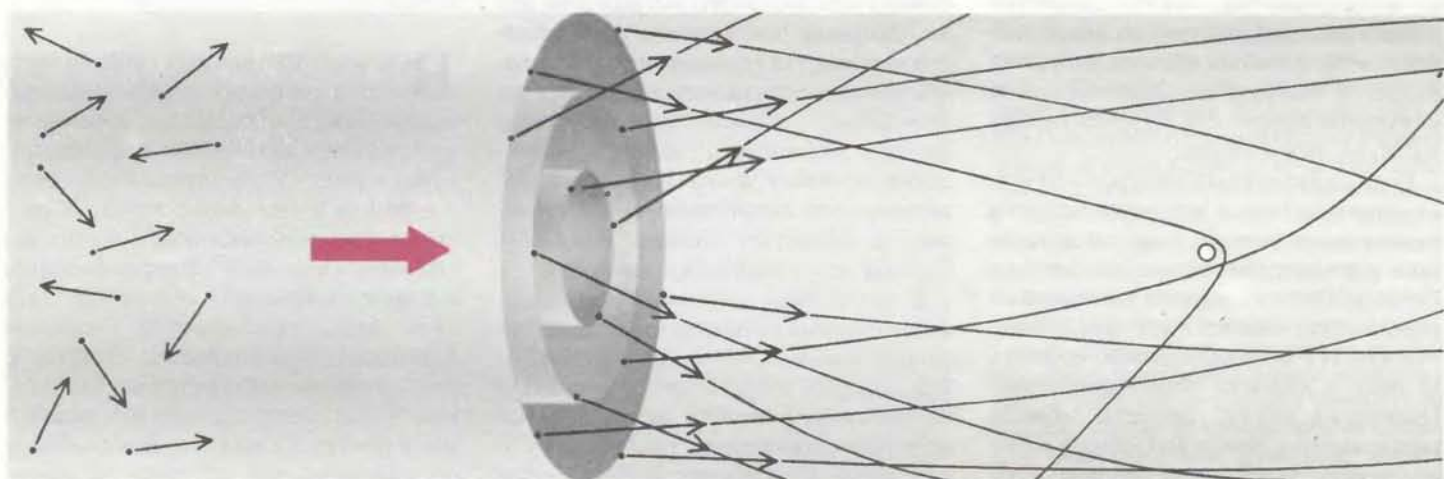
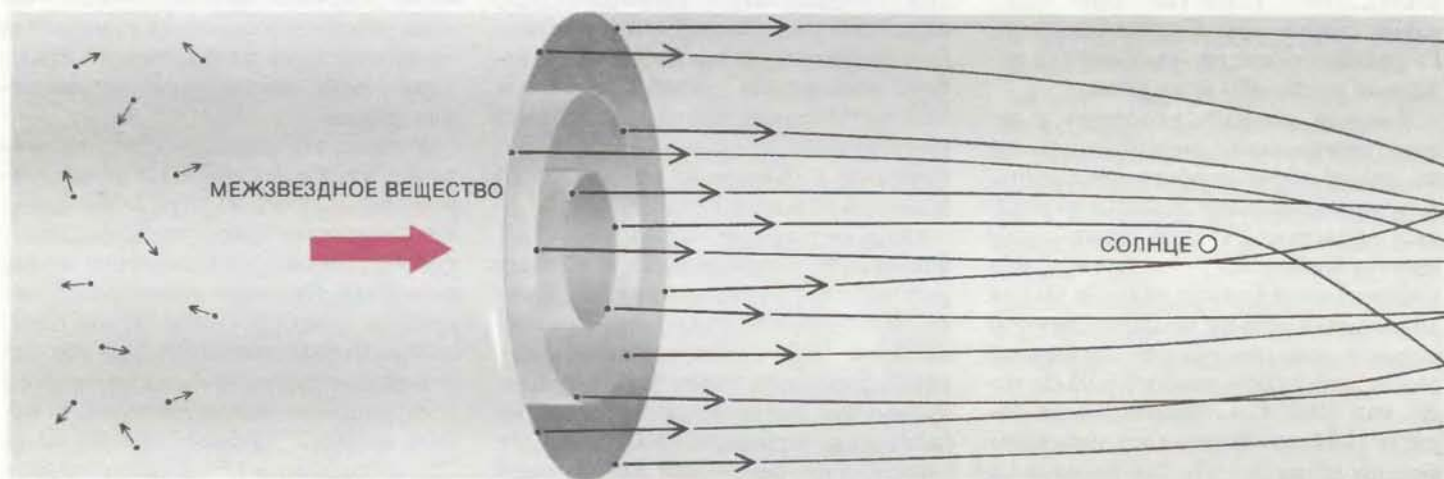
Определены также плотность и температура межзвездного газа; температура оказалась равной 15 000 К. Для определения температуры перед детектором, чувствительным к излучению водорода на длине волны 1216 Å и гелия на длине волны 584 Å, помещались поглощающие кюветы, наполненные соответственно водородом и гелием. Такие кюветы действуют как фильтры, задерживающие

определенную часть поступающего в детекторы излучения, что позволяет получить детальную информацию о ширине линии излучения. В 1977 г. группа французских и советских ученых во главе с Берто и В.Г. Куртом из Института космических исследований АН СССР в Москве с помощью водородных поглощающих кювет, установленных на борту советских спутников «Прогноз 5» и «Прогноз 6», измерила температуру приходящего в Солнечную систему водорода.

Аналогичный подход к измерению температуры гелия связан с определенными трудностями, поскольку единственным материалом, прозрачным для излучения гелия с длиной волны 584 Å (и, следовательно, пригодным для изготовления окон поглощающих кювет), служит металлическая фольга, толщина которой не должна превышать нескольких сотен ангстрем (более чем в 1000 раз тоньше человеческого волоса). При этом

фольга должна выдерживать значительный перепад давления: внутри детектора оно составляет примерно 1 мм ртутного столба, а снаружи, в вакууме, оно равно нулю. В начале 70-х годов нам совместно с Дж. Фриманом, бывшим тогда студентом-дипломником Калифорнийского университета в Беркли, удалось изготовить несколько гелиевых поглощающих кювет; в 1974 г. мы запустили их на ракете, а в 1975 г. — на корабле «Аполлон» во время совместного советско-американского полета по программе «Союз — Аполлон». В 1983 г. группа Курта — Берто опубликовала работу, в которой содержался тщательный анализ обширной информации, полученной с помощью водородных поглощающих кювет, установленных на двух советских спутниках.

ПЛОТНОСТЬ нейтральных атомов водорода и гелия на большом удалении от Солнца можно опреде-



НА ПРИМЕРЕ ГЕЛИЯ показана зависимость распределения нейтральных атомов межзвездного вещества вокруг Солнца от их температуры. При температурах, близких к абсолютному нулю ($-273\text{ }^{\circ}\text{C}$), характерные скорости теплового движения пренебрежимо малы по сравнению со скоростью движения всего облака и все атомы приходят к Солнцу с одного направления и с одинаковой скоростью

(вверху), поэтому их траектории сходятся и образуют узкий «след». При температурах порядка нескольких тысяч градусов скорости теплового движения сравнимы со скоростью движения облака как единого целого и ось «течения» атомов не видна так четко, как при более низких температурах (внизу); при этом их «след» становится размытым. (Для наглядности этот эффект несколько увеличен.)

лить путем измерения интенсивности излучения на длинах волн 1216 и 584 Å соответственно. С использованием этого метода для плотности водорода было получено значение 0,06 атома на 1 см³, а для плотности гелия — 0,014 атома на 1 см³.

Следовательно, содержание водорода примерно в пять раз выше содержания гелия, в то время как среднее отношение этих величин во Вселенной равно 10. Сначала, когда такое различие было обнаружено, оно поставило астрономов в тупик. В попытке найти объяснение Фар и Г. Рипкен из Боннского университета предположили, что только половина атомов нейтрального водорода преодолевает турбулентную переходную область гелиосферы; остальные атомы подвергаются в этой области ионизации. С учетом такой поправки плотность нейтрального межзвездного водорода составляет примерно 0,12 атома на 1 см³; в этом случае отношение содержания водорода к содержанию гелия близко к 10, т. е. к среднему отношению во Вселенной.

ОЧЕНЬ интересен вопрос о том, к каким последствиям могла бы привести встреча Солнечной системы со значительно более плотным облаком межзвездного вещества. Как известно, в нашей Галактике много облаков, плотность водорода в которых лежит в пределах от 10 до 1000 атомов на 1 см³. Разумные оценки показывают, что за время своего существования Солнце пересекло по крайней мере 100 облаков с плотностью выше 100 атомов на 1 см³ и по крайней мере 10 облаков с плотностью выше 1000 атомов на 1 см³.

Если Солнце встретится с таким плотным облаком межзвездного вещества, давление последнего должно отодвинуть фронт ударной волны (образующейся при столкновении вещества с солнечным ветром) ближе к Солнцу и сжать гелиосферу. До тех пор пока этот фронт расположен за пределами земной орбиты, солнечный ветер будет защищать Землю от непосредственного соприкосновения с межзвездным веществом. Однако при определенной плотности облака (в некоторых моделях предсказывается значение всего 150 атомов на 1 см³) фронт волны окажется ближе к Солнцу, чем орбита Земли. В этом случае Земля большую часть периода обращения вокруг Солнца будет находиться в «недружелюбном» окружении межзвездного вещества. В плотных межзвездных облаках большая часть водорода находится в виде молекул, а не отдельных атомов. За время прохождения через типичное плотное об-

лако, равное 100 000 лет, на Землю должно упасть молекулярного водорода в 2000 раз больше по сравнению с его современным содержанием.

Что же произойдет с таким количеством молекулярного водорода на Земле? Поискам ответа на этот вопрос посвящено много исследований, однако окончательного ответа пока не найдено. В настоящее время считают, что водород должен взаимодействовать в верхних слоях атмосферы с химическими радикалами, в результате чего могут образоваться водяные пары. Эти пары будут конденсироваться в облака, которые, по-видимому, должны отражать значительное количество солнечного излучения обратно в космос, что в свою

очередь приведет к понижению средней температуры поверхности Земли на несколько градусов. Такое изменение может показаться несущественным, однако если оно сохранится на протяжении нескольких тысяч лет, то вполне способно привести к новому оледенению. Даже если эта гипотеза кажется чересчур смелой, значительные изменения климата при встрече Земли с плотным молекулярным облаком весьма вероятны. Будущим поколениям, по-видимому, предстоит проверить возможность непосредственно проверить эту гипотезу, когда в какой-то момент на протяжении ближайших нескольких сотен тысяч лет Солнечная система встретится с таким облаком.

Наука и общество

Обратная генетика

МОЛЕКУЛЯРНАЯ генетика вносит большой вклад в изучение природы ряда наследственных заболеваний. Молекулярнобиологический подход дает хорошие результаты, когда исследование начинается с выявления дефектного белка, а в дальнейшем идентифицируется соответствующий ген. Однако многие наследственные болезни еще не настолько хорошо исследованы, чтобы можно было четко указать, в каком белке заключена причина патологии. Для таких случаев перспективным казался другой подход — так сказать, генетика наоборот: сначала найти дефектный ген, а затем уже белок — продукт этого гена. О первом удачном применении этого подхода сообщили недавно исследователи, работающие в Бостонской детской клинике под руководством С. Оркина. Не имея данных о соответствующем белке, им удалось выделить ген, с которым связано заболевание, называемое хроническим грануломатозом.

Хронический грануломатоз — довольно редкое наследственное заболевание, при котором нарушается деятельность иммунной системы вследствие «порчи» фагоцитов — белых кровяных клеток, уничтожающих микробы, вторгшиеся в организм. В ответ на повторяющиеся бактериальные инфекции дефектные фагоциты слипаются в опухолеподобные образования — грануломы (отсюда и название — грануломатоз). Биохимия этой болезни, открытой около двадцати лет назад, до сих пор до конца не выяснена, но не вызывает

сомнения, что генетическое нарушение каким-то образом затрагивает NADPH-оксидазную систему, которая представляет собой группу сопряженных ферментов. Эта система участвует в уничтожении фагоцитами микроорганизмов. Так как не было известно, какой из ферментов NADPH-оксидазной системы ответствен за развитие грануломатоза, Оркин и его коллеги прибегли к «обратной генетике».

Сначала следовало приблизительно определить, где в геноме имеется дефект. Чтобы упростить задачу, Оркин с сотрудниками исследовали такую форму хронического грануломатоза, которая сцеплена с полом, а именно передается с X-хромосомой (у мужчин одна X-хромосома, а у женщин две). В результате предварительной работы удалось сузить район поиска до участка длиной в несколько сот тысяч пар нуклеотидов. Так как участок такой величины может содержать не один, а множество генов, то следующим шагом было выявление собственно гена, имеющего отношение к грануломатозу.

Исследователи рассудили, что надо искать ген, экспрессирующийся в фагоцитах, но не в других клетках. Чтобы получить набор генов, экспрессирующихся только в фагоцитах, они применили остроумный подход, называемый субтрактивной гибридизацией. Из опухолевых клеток, происходящих от фагоцитов, выделили матричные РНК (мРНК) и получили их ДНК-копии. Эти ДНК смешали с мРНК из клеток нефагоцитарного происхождения. Те молекулы из разных

(продолжение см. на с. 75)

Плеченогие

Среди этих своеобразных животных одни обладают неизменной биологической организацией, но обитают лишь в подходящих условиях, другие же способны изменять свою структуру или поведение применительно к имеющимся условиям

ДЖОЙС Р. РИЧАРДСОН

ПАЛЕОНТОЛОГИ, изучая осадочные породы, относящиеся к палеозойской эре (600—220 млн. лет назад), часто находят окаменелые парные раковины, внешне похожие на остатки двустворчатых моллюсков (к которым относятся, например, беззубки, мидии и гребешки). Однако при ближайшем рассмотрении становится ясно, что эти ископаемые отличаются от моллюсков: их внутреннее строение совершенно иное, да и створки неодинаковы по размеру. И действительно, они являются представителями совсем другого типа животных — Brachiopoda (брахиоподы, или плеченогие)*. В доисторические времена плеченогие были одной из самых многочисленных и разнообразных групп живых существ на Земле — известно более 30 тыс. видов плеченогих, описанных по ископаемым остаткам.

Современные плеченогие далеко не многочисленны, а существующие виды слабо изучены — отчасти из-за того, что большинство из них обитает в морях на больших глубинах, отчасти же потому, что ни «мясо», ни раковины этих животных не имеют коммерческого значения. Кроме того, в отличие от многообразных вымерших видов дожившие до нашего времени около 300 видов внешне весьма сходны. Многие зоологи расценивают отсутствие разнообразия в строении у нынеживущих брахиопод как показатель их неспособности конкурировать с другими морскими животными в процессе эволюции. Согласно этой точке зрения, большинству современных плеченогих удастся выжить в основном благодаря тому, что они за-

нимают определенные прибрежные местообитания, где они существуют, прилепившись к подводным скалам — буквально припертые к стенке другими животными (например, моллюсками), обитающими в донных отложениях вдали от берега.

Но если длительность существования таксона может служить мериллом его эволюционного успеха, то плеченогие — наиболее удачливые из организмов, доживших до наших дней. Например, род *Lingula* представлен в палеонтологической летописи непрерывно на протяжении 0,5 млрд. лет вплоть до настоящего времени. Даже произошедшее в конце палеозоя катастрофическое изменение условий среды, которое унесло 90% видов морских животных, не причинило, по-видимому, этим плеченогим вреда.

Недавно проведенные исследования в океанических водах Южного полушария также заставляют пересмотреть традиционное представление о плеченогих как о эволюционно инертной группе, находящейся на грани вымирания. Некоторые брахиоподы, как, например, виды рода *Terebratella*, могут занимать самые разнообразные местообитания. Это обеспечивается в значительной степени специфическими свойствами ножки, или стебелька, который имеется почти у всех нынеживущих плеченогих. Именно благодаря свойствам стебелька брахиоподы обладают большой биологической пластичностью. Такие виды, как виды рода *Terebratella*, потенциально способны дать начало разнообразной фауне плеченогих подобно тому, как, вероятно, бывало в давние времена. И кто знает, может быть, в течение следующих нескольких миллионов лет мир увидит не уменьшение, а увеличение числа видов брахиопод.

НЕСМОТЯ на внешние различия между видами, всем представителям типа Brachiopoda свойственны одни и те же основные физиологические особенности, позволяющие им

жить в океанических водах на различных глубинах, при разной температуре и силе течения. И в мягкой тине на глубине 4 тыс. м, и на камнях в приливно-отливной зоне можно встретить одинаковые формы плеченогих. Диапазон местообитаний так широк благодаря тому, что все внутренние органы плеченогих — органы дыхания, захвата пищи, пищеварения, выделения и размножения — заключены между створками раковины и могут функционировать почти в любых условиях морской среды.

Плеченогие питаются теми крошечными частицами пищи (мелкими организмами, частицами органического вещества), которые взвешены в окружающей воде. Это требует поглощения большого объема воды, но общее количество пищи, необходимое для жизнедеятельности отдельной особи, невелико, поскольку уровень обменных процессов у брахиопод сравнительно низок. Они, например, могут свыше двух лет существовать в морской воде, из которой удалены все взвешенные частицы; правда, в таких трудных условиях они не размножаются.

Ряд жизненно важных процессов осуществляется у плеченогих лофофором — полифункциональным органом, отделенным специальной мембраной (мантией) от полости тела, в которой лежат внутренние органы. С помощью лофофора происходит поглощение пищи, дыхание и выделение; он также используется как «сумка», в которой выводятся личинки, и, возможно, как хранилище жировых запасов.

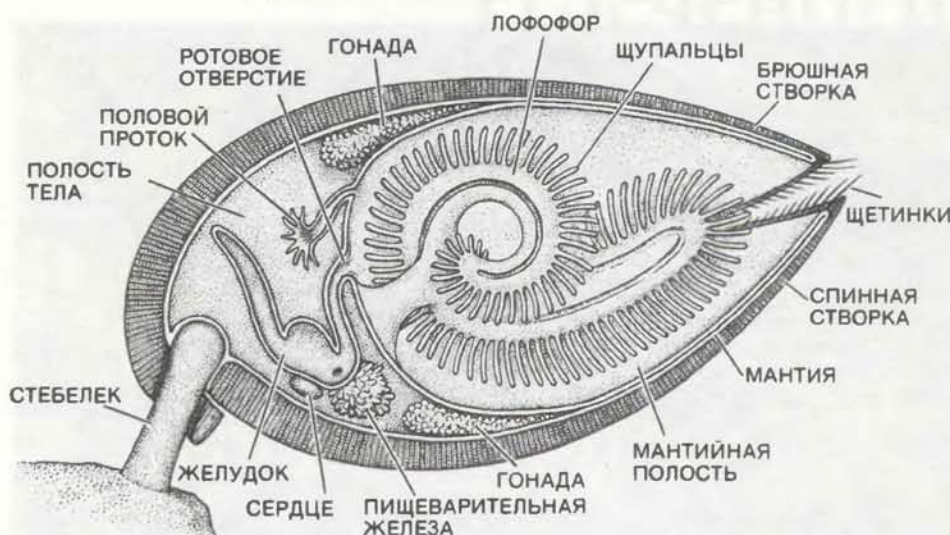
Мерцательные (покрытые ресничками) щупальца, которыми снабжены две «руки» лофофора, вызывают циркуляцию воды в окружающем их пространстве так называемой мантийной полости. Поток воды обеспечивает дыхание животного и направляет мелкие пищевые частицы к ротовому отверстию, находящемуся у основания лофофора. Поглощенные части-

* Согласно системе, принятой в отечественных пособиях по зоологии, плеченогие имеют ранг класса и вместе с мшанками (Bryozoa), форонидами (Phoronidea) и, возможно, внутривороничевыми (Kamptozoa) объединяются в тип щупальцевых (Tentaculata) (см., например, Догель В.А. Зоология беспозвоночных. — М.: «Высшая школа», 1981). — Прим. перев.



ПЛЕЧЕНОГИЕ считались ранее прежде всего обитателями каменистых обрывов в сублиторали, как, например, *Liothyrella uva*. Вверху показаны несколько особей этого вида, прикрепленные к каменистой поверхности на глубине 5 м у побережья острова Сигни (Южные Оркнейские острова,

близ Антарктики). Выяснилось, однако, что плеченогие могут жить в самых разнообразных условиях. Например, экземпляры *Neothyris lenticularis* (внизу) найдены среди обломков раковин на илистом дне на глубине 40 м в заливе Патерсон (остров Стюарт, Новая Зеландия).



ОБОБЩЕННАЯ СХЕМА АНАТОМИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ плеченого (изображен вертикальный срез в плоскости симметрии). Наиболее заметный орган брахиопод — это лофофор. Он лежит в мантийной полости и отделен от полости тела, в которой находятся все другие органы. Движения мерцательных щупалец лофофора создают ток воды в пространстве, заключенном между створками раковины. Благодаря этому частички пищи, взвешенные в воде, поступают к ротовому отверстию, а продукты жизнедеятельности удаляются из мантийной полости наружу. Лофофор служит также органом дыхания, «сумкой» для выведения личинок и, вероятно, хранилищем жировых запасов.

цы консолидируются в единую массу, которая беспрестанно совершает вращательные движения внутри просто устроенной короткой кишки. Заметного количества фекалий не образуется, что говорит о высокой эффективности пищеварительного процесса.

Из числа важных органов в полости тела, помимо кишки, у брахиопод находятся крошечное сердце и пара половых протоков, по которым сперматозоиды или яйца выводятся в мантийную полость. Зеленая кишка и темно-красные окаймленные отверстия половых протоков поддерживаются в нужном положении полупрозрачными мембранами. Полость тела заполнена жидкостью, которую пронизывают нежные серебристо-розовые мышцы. Сочетание цветов и вза-

имное расположение этих структур вместе с изящным завитком скрученного волокнистого лофофора создают картину неповторимой красоты, которая скрыта от постороннего взгляда внутри двустворчатой раковины.

Если створки закрыты, а стебелек втянут, мягкие ткани брахиопод недоступны для потенциальных хищников (за исключением, может быть, морских звезд). Отчасти поэтому на них редко нападают другие обитатели моря. Еще одна причина, по которой плеченогие не являются объектом охоты, — исключительно неприятный вкус их внутренностей. (Повидимому, для рыб они так же невкусны, как для меня и моих коллег: и в природных условиях, и в лаборато-

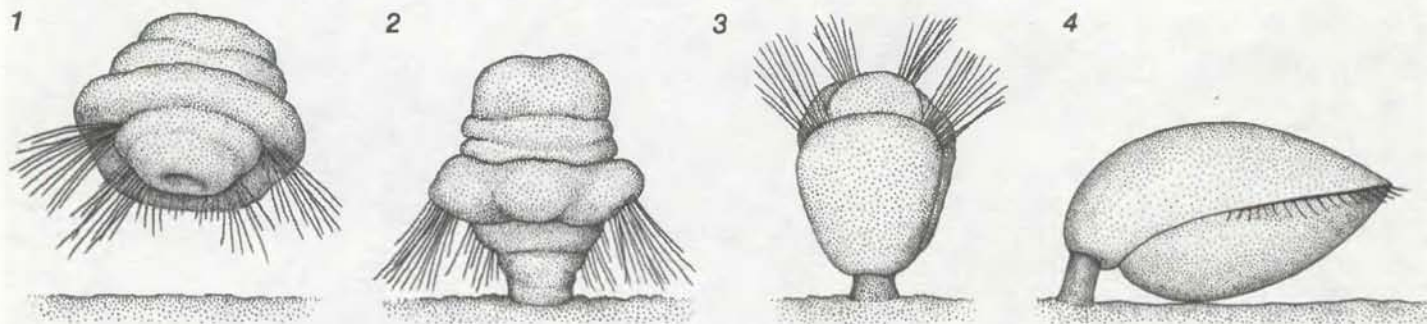
рии рыбы «отказывались» от свежего «мяса» брахиопод даже в отсутствие иной пищи.)

Плеченогие размножаются половым путем. Самцы выпускают сперматозоиды в окружающую среду, и те вместе с фильтруемой водой попадают в мантийную полость самки. Личинки развиваются в лофофоре, а затем выходят наружу, в воду. (Насколько нам известно, у брахиопод отсутствуют какие-либо проявления социального поведения. Все же, поскольку при расселении особей возможность передачи сперматозоидов самкам неизбежно так или иначе ограничивается, у брахиопод существует тенденция группироваться в «сообщества».)

НЕСМОТЯ на то что по основным анатомическим и физиологическим признакам все плеченогие сходны, этих животных можно разделить на два класса*: Articulata и Inarticulata. Класс Articulata объединяет виды, подобные представителям рода *Terebratella*, у которых створки соединены друг с другом посредством замка — своего рода шарнирного устройства в виде набора взаимно соответствующих зубцов и углублений. У членов класса Inarticulata (сюда относятся, например, виды рода *Lingula*) нет такого приспособления — у них створки удерживаются в нужном положении с помощью мышц. Между классами есть и другие характерные различия, прежде всего в поведении личинок и в строении стебелька.

Личинки Inarticulata могут в течение 6 недель и более вести свободноплавающий образ жизни и питаться, подыскивая место для прикрепления.

* В отечественной литературе эти группы имеют ранг подкласса и, кроме используемых здесь, носят названия соответственно Testicardines (замковые) и Ecardines (беззамковые). — Прим. перев.



ЖИЗНЕННЫЙ ЦИКЛ замкового плеченого. Из материнского лофофора выходит свободноплавающая личинка, состоящая из трех долей (1). Вскоре она поселяется на членах родительской популяции или рядом с ними (2); при этом из задней доли личинки развивается стебелек, которым животное прикрепляется к субстрату, возможно, при

участии щетинок, торчащих из нижней поверхности. Вслед за прикреплением происходит метаморфоз: из одной доли личинки развиваются внутренние органы и лофофор, а из другой — мантия и створки (3). У взрослой формы (4) стебелек и субстрат, с которым он скреплен, функционируют совместно как единый придаток.

Как только личинка находит подходящий субстрат, развивающийся стебелек раскручивается и высовывается между створками наружу, чтобы прикрепиться к поверхности субстрата. У *Articulata* личиночная жизнь, напротив, коротка и поселение (т. е. прикрепление стебельком) личинки на субстрате предшествует метаморфозу и развитию органов поглощения пищи, пищеварения и других жизненно важных систем. В обоих классах брахиопод прикрепление стебелька к субстрату является необходимым условием для превращения личинки во взрослую форму — если животному не удастся прикрепиться, оно погибает, оставаясь на стадии личинки.

Стебельки у представителей замковых брахиопод разнообразны по форме и строению. В противоположность этому у беззамковых плеченогих известны только два типа стебельков: короткие, характерные для видов, живущих на твердых субстратах (семейство *Acrotretidae*), и длинные, свойственные видам, живущим на рыхлых отложениях (семейство *Lingulidae*).

То, что в группе *Inarticulata* представлены только два типа стебельков, может быть связано с характером развития этого органа у личинки. Личинка беззамкового плеченогого состоит из двух долей, одна из которых развивается затем в тело взрослой особи и стебелек, а другая — в створки. Стебелек образуется из карманообразного выроста тела, когда животное еще находится на стадии свободноплавающей личинки. В отличие от этого в личинке замкового плеченогого имеются три доли. Одна из них превращается в стебелек при поселении личинки на субстрате, что происходит до того, как остальные две доли дифференцируются в створки, мантию и внутренние органы. Таким образом, у *Articulata* стебелек с его мускулатурой развивается как самостоятельное образование, отдельно от тела.

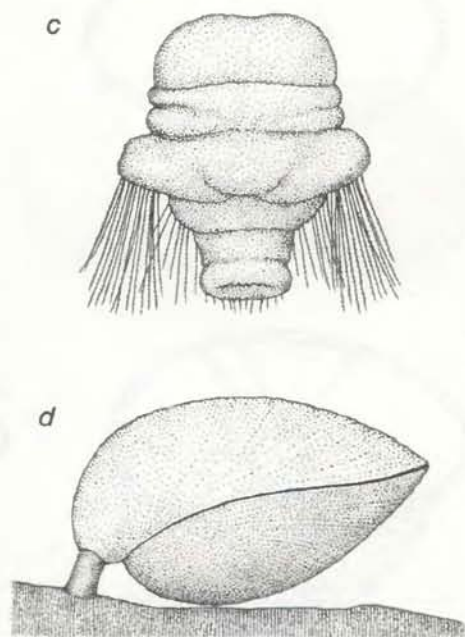
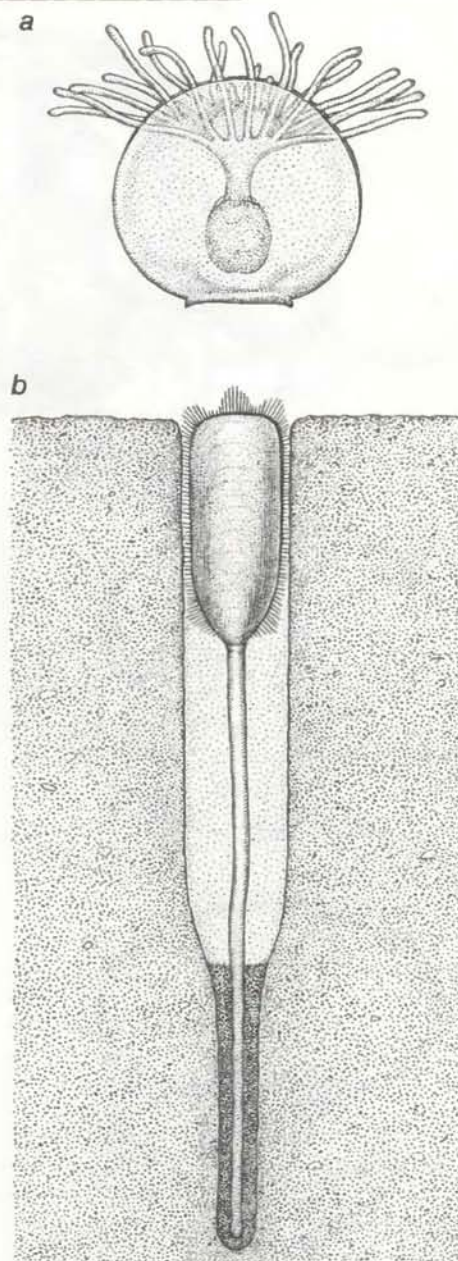
В НАЧАЛЕ считалось, что стебелек для прикрепления к субстрату. Такое неправильное представление возникло в связи с тем, что жизнь брахиопод в их естественных местообитаниях изучалась среди камней и рифов вблизи от берега. В этих местообитаниях плеченогие, по-видимому, действительно ведут прикрепленный образ жизни. Потому их и рассматривали как прибрежных животных, постоянно прикрепленных к каменистым скалам или обнажениям. Относительно же тех особей, которых находили не прикрепленными на морском дне, по-

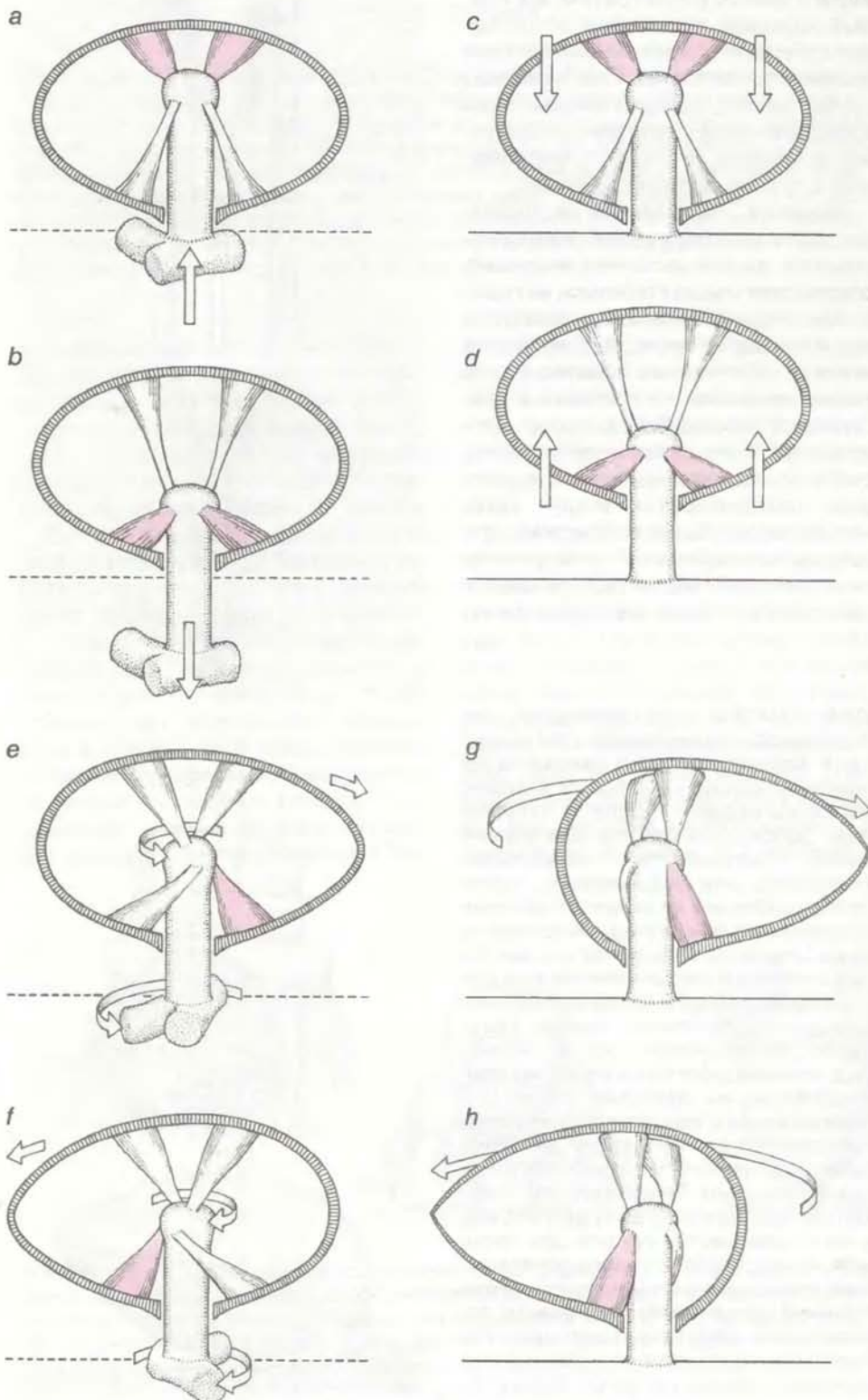
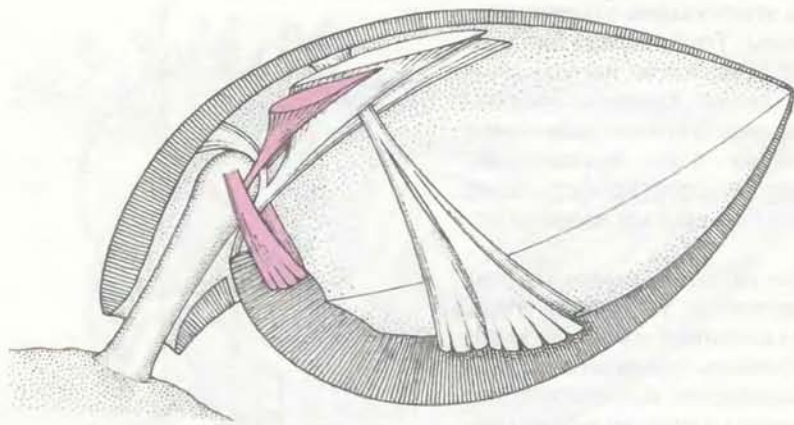
лагали, что это случайно оторвавшиеся экземпляры. Только когда биологи стали более пристально изучать донную фауну морей Южного полушария, выяснилось основное назначение стебелька — он дает брахиоподам возможность корректировать свое положение с учетом окружающих условий.

В отличие от более знакомых нам органов движения, таких, как ноги, крылья или плавники, стебелек не является свободным придатком. С момента прикрепления плеченогого (на стадии личинки) в течение всей его последующей жизни стебелек функционирует вместе с субстратом как единый комплекс независимо от размеров субстрата. Двигательная система плеченогих включает сам стебелек, группу мышц, прикрепляющих один конец стебелька к внутренней поверхности створок, и субстрат, соединенный с другим концом стебелька.

Давление, оказываемое на поверхность створок (например, накапливающимся на них осадком) вызывает сокращение мышц стебелька, которое в свою очередь приводит к движению или тела плеченогого, или стебелька вместе с субстратом в зависимости от соотношения масс животного и субстрата. У тех особей, которые прикреплены к массивным субстратам, стебелек действует как опора, а раковина поворачивается вокруг него. Когда масса субстрата невелика, при сокращении мышц стебелька движутся и сам стебелек, и скрепленный с ним субстрат. Если же массы плече-

ДВА КЛАССА, составляющие тип *Brachiopoda*, существенно различаются. У *Articulata* створки раковины соединены замком — набором взаимно соответствующих зубцов и углублений; потому эта группа плеченогих иначе называется «замковые». *Inarticulata*, или беззамковые, такого приспособления не имеют. У личинок беззамковых брахиопод, например из рода *Lingula* (a), есть щупальца для передвижения и внутренние органы для поглощения пищи и пищеварения; они довольно длительное время ведут свободноплавающий образ жизни, подыскивая субстрат, к которому приспособлена их взрослая форма (b); превращение в нее происходит после прикрепления к субстрату. Личинки замковых плеченогих, таких, как представители рода *Terebratella* (c), выходят из тела матери в воду до того, как у них развиваются органы для питания, и находятся в свободноплавающем состоянии очень недолго; скоро личинка прикрепляется к первому попавшему субстрату, после чего появляются необходимые органы и она превращается во взрослую форму (d).





ногого и субстрата примерно одинаковы, то могут двигаться и один из них, и оба вместе, что определяется конкретной ситуацией, в частности существенно, где скопилось больше осадка — на субстрате или на раковине. Так или иначе, достигается один и тот же результат: осадок сбрасывается с поверхности раковины.

У прикрепленных к скалам брахиопод и у обитающих на дне стебельковая система в целом действует одинаково; различия могут быть в том, как проявляются мышечные сокращения и какова амплитуда происходящих движений. У скальных плеченогих, для которых субстратом всегда служит устойчивая каменная поверхность, сокращение мышц стебелька заставляет животное поворачиваться из стороны в сторону. У донных же обитателей, обычно прикрепляющихся к небольшим камешкам или обломкам ракушек, система стебелек — субстрат совершает поворот в одном направлении, а тело животного при этом слегка поворачивается в противоположном. Эти вращательные движения могут быть слабыми и казаться ненаправленными, но они столь же эффективно предотвращают отложение осадка на раковине, как и более энергичные попеременные повороты, свойственные брахиоподам, прикрепленным к массивным субстратам.

По всей вероятности, единственная цель этих специфических движений — исключить опасность погребения под

МЫШЦЫ СТЕБЕЛЬКА (темно-розовые) располагаются среди мышц, открывающих и закрывающих створки раковины, в задней части плеченого (вверху; вид сбоку). На рисунках а — h, на которых изображен вид «сзади» (со стороны стебелька), показано, к каким движениям приводит сокращение мышц стебелька. Попарное сокращение вызывает движение вверх или вниз либо стебелька вместе с субстратом (а, б), либо створок с заключенным в них телом животного (с, d) в зависимости от размеров субстрата. Если стебелек прикреплен к субстрату небольшой массы, сокращение одной из мышц нижней пары поворачивает весь комплекс стебелек — субстрат, что вызывает слабое движение створок в противоположном направлении (е, f). Если стебелек прикреплен к массивному субстрату, при сокращении тех же мышц сильно поворачивается раковина с телом (g, h). И в том и в другом случае вращательное движение стряхивает осадок, который мог бы засыпать животное. Кроме того, эти простые движения автоматически обеспечивают наиболее удобное положение для питания — на границе воды и субстрата.

слоем осадка и в любых условиях сохранить доступ к воде. Это имеет для плеченогих жизненно важное значение, поскольку они потребляют взвешенную в воде пищу. Наблюдения за многими современными брахиоподами подтверждают, что движения, сбрасывающие осадок, автоматически обеспечивают и то, что животное оказывается в положении, наиболее благоприятном для захватывания взвешенных в воде пищевых частиц — на самой границе между массой воды и субстратом.

В этом смысле виды, способные занять удобное для питания положение на любом субстрате, называются генералистами. У таких животных поведение одной и той же особи на протяжении ее жизни может меняться так же сильно, как различается поведение разных особей в составе популяции. Виды, характеризующиеся однообразным поведением, обеспечивающим питание только на субстратах немногих типов, называются специалистами. Специалистов легко узнать по особенностям анатомии: в строении и функционировании створок, стебелька и мышц для них характерны различные приспособления, позволяющие добиваться большой эффективности движений на определенном субстрате, но бесполезные на иных субстратах.

Например, у некоторых замковых плеченогих центр тяжести створок сдвинут к основанию, как у ваньки-встаньки. Благодаря этому утолщению створки всегда занимают определенное положение в мягких субстратах, что облегчает движение животного в таких условиях. Однако на массивных твердых субстратах лишний вес ограничивал бы свободу движения. У других видов-специалистов можно проследить эволюционную тенденцию к тому, что стебелек объединяется со стебельковыми мышцами в один мощный сократимый орган, имеющий большую площадь для прикрепления. Такое приспособление делает движение невозможным без обширной твердой поверхности, предоставляющей опору для стебелька как для рычага. Особи этих видов, прикрепившиеся к рыхлым субстратам, обычно погибают, не достигнув взрослой стадии. Напротив, у видов-генералистов наблюдается меньшее разнообразие в форме створок и строении стебелька. Зато неспециализированная организация обеспечивает генералистам возможность занимать различные местообитания.

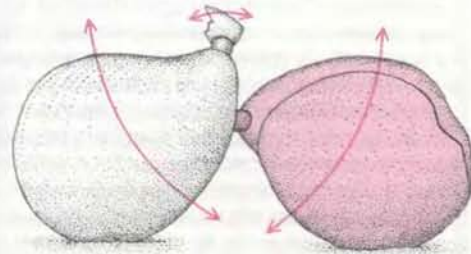
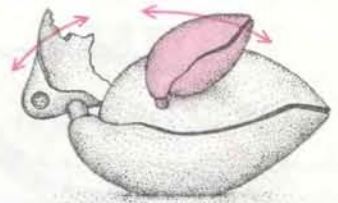
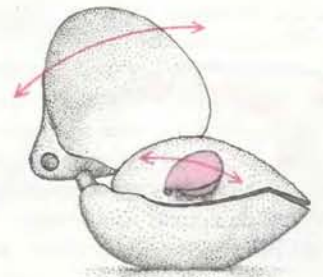
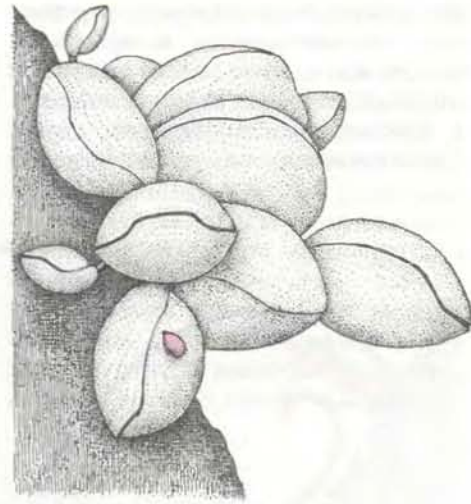
ПРИ АНАЛИЗЕ находок ископаемых брахиопод становится очевидным, что в большинстве линий

эволюционного развития этих животных имеет место тенденция к увеличению специализации, кульминацией которой является утрата стебелька. Взрослый организм плеченогого без стебельковой системы неподвижен и не способен корректировать свое положение относительно окружающей среды. В этом случае его устойчивость достигается с помощью особой формы створок и выростов на их поверхности.

Г. Артур Купер и Р. Грант из Национального музея США на фактическом материале описали разнообразие древних плеченогих. Они обнаружили в западной части штата Техас в Стеклянных горах ископаемые остатки богатейшей фауны плеченогих, которая включала многочисленные виды группы Articulata, утратившие стебелек и в связи с этим высоко специализированные. Некоторые из них обладали приспособлениями, которые давали возможность прочно укрепляться на твердом субстрате — опорные шипы и цементирующий секрет. Другим видам, жившим на мягких субстратах, устойчивость обеспечивали вес и ребристая форма створок, а также якоробразные шипы.

Однако все современные замковые плеченогие (за очень редким исключением) имеют стебельки. Что же случилось с многочисленными видами

СПОСОБНОСТЬ К АДАПТАЦИИ, свойственная некоторым видам замковых плеченогих, показана здесь на примере изменений в поведении, к которым отдельная особь (цветная) прибегает на протяжении своей жизни (сверху вниз). Молодое животное исходно прикреплено к раковине одной из особей родительской популяции, обитающей на поверхности подводной скалы. Когда его субстрат (т. е. та раковина, к которой оно прикреплено) отрывается и падает на дно, плеченогое быстро адаптируется к новым условиям и начинает «вести себя, как положено» донному обитателю. В дальнейшем положение животного меняется в связи с изменениями его собственных размеров (в результате роста) и размеров субстрата (в результате его разрушения). По мере того как соотношение размеров плеченогого и его субстрата меняется, растущее животное вынуждено изменять поведение: вначале, чтобы стряхивать осадок, оно поворачивается само, а позже для той же цели вращается субстрат. Когда плеченогое и субстрат, к которому оно прикреплено, примерно равны по массе, могут двигаться оба в зависимости от того, где накапливается больше осадка. (Длина стрелок соответствует относительному размаху движений животного и субстрата.)



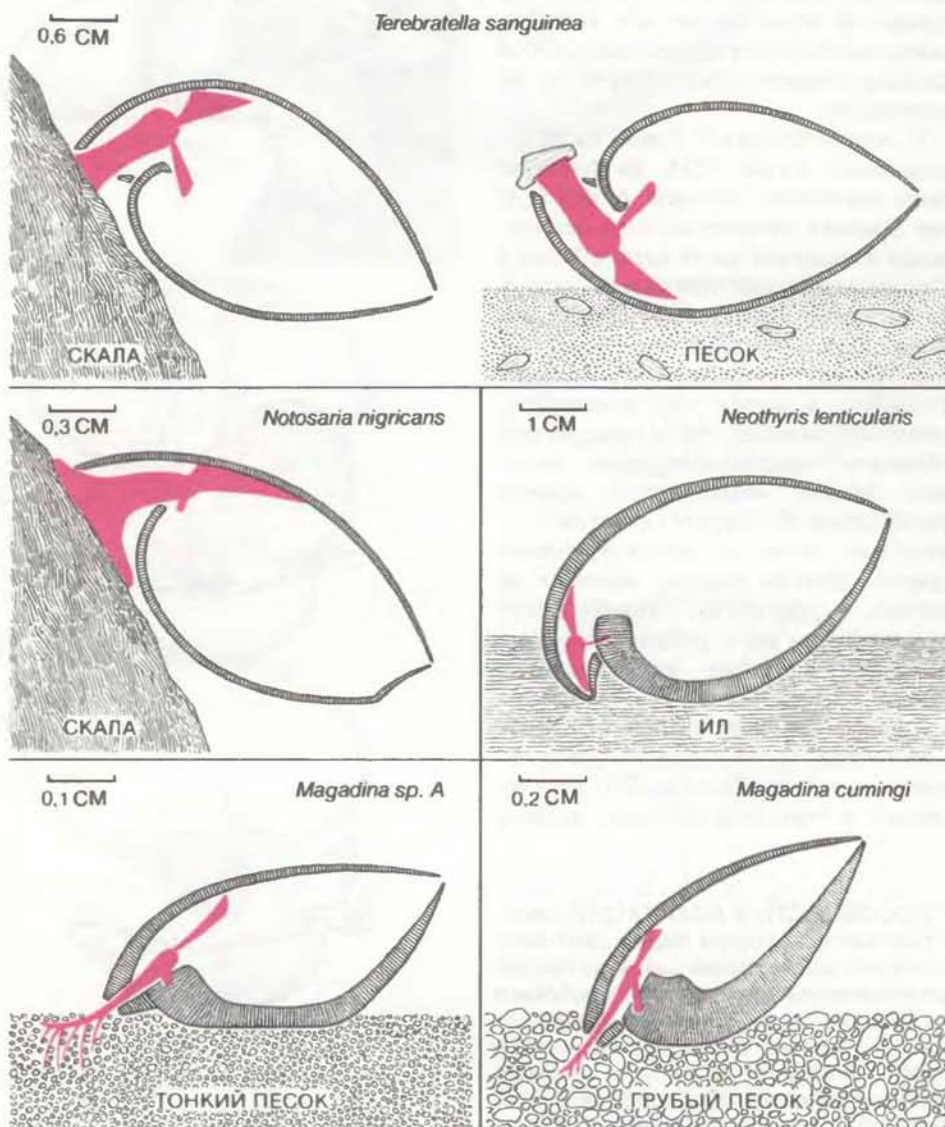
бесстебельковых замковых плеченогих, существовавших в прошлом? Скорее всего, из-за далеко зашедшей специализации они стали уязвимыми к изменениям окружающей среды. Специализация, развивающаяся по-

степенно в процессе длительной колонизации определенного субстрата, создает сильнейшую зависимость от этого субстрата. Поэтому в период нестабильности окружающей среды, когда тот субстрат, к которому при-

способился данный вид-специалист, оказывается вдруг недоступным для него, этот вид быстро вымирает. Виды-генералисты имеют больше возможностей справиться с изменениями условий существования, поскольку они не «привязаны» к какому-то одному субстрату. Скорость вымирания видов-специалистов обусловлена как размахом изменений, происходящих в окружающей среде, так и степенью специализации вида.

Для вымирания видов-специалистов совсем не обязательны глобальные катастрофические изменения условий существования, подобные случившемуся в конце палеозоя. Исследования отдельных географических районов показывают, что вымирания — обычное явление, и даже мелкомасштабные геологические события могут иметь весьма опустошительные последствия. Ф. Сарлик из Гренландской геологической службы и М. Йохансен из Института исторической геологии и палеонтологии в Копенгагене, проделав скрупулезнейшую работу, собрали свидетельства о локальном массовом вымирании, произошедшем в позднемерловое время в морских водах у берегов, ныне относящихся к Дании. Они показали, что множество видов плеченогих, приспособленных к известняковым субстратам, вымерли вследствие изменения в осадении пород: стратиграфические данные свидетельствуют, что известняк был покрыт слоем глины. Из 35 видов брахиопод, найденных в известняковых отложениях, в слое глины удалось обнаружить только 6 — и все они оказались генералистами.

ХОТЯ периодические вымирания замковых плеченогих можно объяснить уязвимостью специализированных видов, история видов группы Inarticulata выглядит противоречивей такой точке зрения. Нынеживущие беззамковые плеченогие являются специалистами: они приспособлены либо к твердым поверхностям, либо к мягким грунтам, но никогда к тем и другим сразу. Примером крайней специализации может служить род *Crania* (семейство Acrocretidae), у представителей которого отсутствует стебелек. Тем не менее беззамковые как таксон исключительно долговечны — в палеонтологической летописи они представлены непрерывно на протяжении очень долгого времени. В эволюционной истории замковых брахиопод периоды специализации, сопровождавшейся видообразованием, чередовались с вымираниями, а у беззамковых плеченогих сохраняются те же самые специализированные формы и, вероятно, те же типы поведения, которые были у них



ГЕНЕРАЛИСТЫ И СПЕЦИАЛИСТЫ среди замковых плеченогих различаются анатомически — формой створок и строением стебельковой системы (выделена цветом). Виды-генералисты, например *Terebratella sanguinea*, могут существовать и на подводных скалах, и на дне. В любой обстановке и независимо от положения особи стебельковая система обеспечивает сбрасывание накапливающегося осадка. У видов-специалистов стебельковая система и створки приспособлены к условиям того или иного определенного субстрата. Так, у *Notosaria nigricans* мышцы стебелька объединены со стебельком, формируя плотное сократимое образование с большой площадью прикрепления. Это приспособление позволяет *N. nigricans* жить на массивных каменных субстратах, но такой стебелек неэффективен на неустойчивых поверхностях небольшого размера. У *Neothyris lenticularis*, напротив, в ходе эволюции стебелек атрофировался, так что они не могут прикрепляться к твердым субстратам. Зато размеры, форма и толщина нижней створки таковы, что сами по себе дают возможность представителям этого вида занимать удобное для питания устойчивое положение в илстых донных отложениях. У видов-специалистов *Magadina sp. A* и *M. cumingi* тоже развились своеобразные створки и стебельки, позволяющие им успешно заселять морское дно, покрытое карбонатными песками. Животные этих двух видов интересны тем, что у них стебелек проталкивает их через откладывающийся осадок наподобие храповика. Личинки *Magadina* прикрепляются к крупным пескам или мелким обломкам раковин, но с помощью отростков, которые позднее развиваются на конце стебелька, взрослые особи освобождаются от субстрата. При изменении внешней среды у видов-генералистов вероятность выживания больше, чем у специалистов, поскольку их не ограничивает приспособленность к определенному типу субстрата.

еще в допалеозойские времена. Выжившие виды как Articulata, так и Inarticulata, должно быть, достигли неуязвимости по отношению к происходящим в окружающей среде переменам. Но, судя по их столь различной эволюции, в этих двух группах способность успешно переживать изменения условий развилась совершенно по-разному.

Беззамковые плеченогие, несмотря на свою специализированность, пережили длинный ряд эпох потому, что их личинки способны к самостоятельному существованию и, следовательно, их расселение не ограничено территорией в непосредственной близости от родительской популяции. Если местные условия становятся неблагоприятными, личинки Inarticulata могут перебираться в другие места в поисках субстрата, к которому приспособлены их специализированные взрослые формы.

Среди замковых плеченогих, как я уже отмечал, в ходе эволюции сохраняются именно генералисты, т. е. виды, которые могут жить на субстрате любого типа. В отличие от личинок беззамковых брахиопод личинки Articulata селятся наудачу непосредственно на оскобах родительской популяции или вблизи от них. Но благодаря своей способности к адаптации они переживают изменения в окружающей среде. Таким образом, длительность существования группы замковых плеченогих зависит в первую очередь от числа видов генералистов: их должно быть достаточно много. Для этого необходимо, чтобы в области распространения личинок имелись субстраты самого разного типа (именно такова обстановка в прибрежных местообитаниях). В такой ситуации исключено продолжительное заселение животными какого-то одного субстрата и специализация не происходит.

СУЧЕТОМ всего сказанного о факторах, определяющих продолжительность существования плеченогих, утверждение о том, что этот тип животных близок к вымиранию, представляется маловероятным. Исследование в антарктических и субантарктических водах, проведенное М. Фостером из Университета Брэдли, показало, что замковые плеченогие являются там обычными, а иногда и доминирующими членами сообществ морских обитателей. Они также многочисленны в морской фауне Южной Америки, Австралии и Новой Зеландии.

Некоторые брахиоподы, живущие в этих акваториях, принадлежат к генералистам, у других стебелек в той или иной степени модифицирован и

приспособлен для жизни на субстратах определенного типа — либо на мягких, либо на твердых. Принимая во внимание то, что местообитания, занимаемые ныне этими животными, достаточно долго остаются неизменными, можно думать, что должны появиться виды, более приспособленные к конкретным условиям окружающей среды. И действительно, в двух линиях эволюционного развития уже прослеживаются соответствующие тенденции: к потере стебелек у форм, обитающих в илистых отложениях, и к его превращению в свобод-

ный придаток у форм, обитающих на карбонатных песках. Но в большинстве своем виды плеченогих, живущих в морях Южного полушария, мало отмечены специализацией к определенным условиям существования. Большинство из них свойственны черты генералистов или «начинающих» специалистов, находящихся в процессе освоения новых местообитаний. Во всяком случае, нет никаких признаков того, что брахиоподы — это биологически однообразная группа, которую ожидает полное вымирание.

Наука и общество

(начало см. на с. 67)

клеточных линий, которые имели одинаковые нуклеотидные последовательности, гибридизовались (т. е. связывались) друг с другом, так что несвязанными оставались молекулы, синтезирующиеся только в фагоцитах.

Далее необходимо было выяснить, находится ли какой-нибудь из выявленных «фагоцитных» генов в том участке хромосомы, где должен располагаться ген, ответственный за развитие грануломатоза. По счастью стечению обстоятельств одновременно с Оркином его коллега Л. Кункель занимался исследованием другого наследственного заболевания — миодистрофии Дюшенна, — которое тоже обусловлено дефектом одного из генов X-хромосомы, причем находящегося где-то вблизи гипотетического гена, ассоциированного с грануломатозом. Кункель получил набор фрагментов ДНК, перекрывающих интересующую область X-хромосомы. Когда провели гибридизацию этих фрагментов с генами, специфичными для фагоцитов, было найдено только одно совпадение — ген, соответствующий белку длиной около 500 аминокислот. Оркин назвал этот ген X-CGD (от англ. X-chromosome chronic granulomatous disease).

Для доказательства того, что ген X-CGD действительно повинен в развитии хронического грануломатоза, сам ген и его белковый продукт были исследованы у здоровых людей и у больных грануломатозом. Оказалось, что у всех больных есть какие-нибудь аномалии в гене X-CGD: либо он отсутствует полностью, либо изменен так, что синтезируется дефектный белок. Эти данные явились решающим аргументом в пользу того, что найденный ген действительно связан

с данным наследственным заболеванием. Каковы потенциальные возможности подхода, примененного группой Оркина? Сами исследователи считают, что он пригодится для изучения болезней со сложной, с трудом поддающейся изучению биохимией, таких, как миодистрофия Дюшенна, кистозный фиброз и болезнь Хантингтона.

Издательство
МИР
предлагает:

К. Байерман
ОПРЕДЕЛЕНИЕ
СЛЕДОВЫХ КОЛИЧЕСТВ
ОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ

Перевод с английского

Книга посвящена физико-химическим методам обнаружения малых количеств различных органических соединений в пищевых, фармацевтических, нефтехимических продуктах, а также в объектах окружающей среды. Подробно рассмотрены методы разделения и концентрирования веществ и способы детектирования соединений.

Для химиков-органиков и аналитиков — работников научно-исследовательских институтов, заводских лабораторий, служб по охране окружающей среды.

1987, 28 л. Цена 4 р. 50 к.



Вклад Леонардо да Винчи в теоретическую механику

Тщательное изучение рисунков Леонардо да Винчи, в частности тех, на которых изображен арбалет, показывает, что его идеи имели отношение к эволюции четырех представлений в механике

ВЕРНАРД ФОЛИ, ВЕРНЕР СОДЭЛ

НЕКОТОРЫЕ историки, исследователи которых относятся к эпохе Возрождения, высказывали мнение, что, хотя Леонардо да Винчи был талантливым во многих областях, он тем не менее не внес значительного вклада в такую точную науку, как теоретическая механика. Однако тщательный анализ его недавно обнаруженных рукописей и в особенности имеющихся в них рисунков убеждает в обратном. Работы Леонардо да Винчи по изучению действия различных видов оружия, в частности арбалета, по-видимому, были одной из причин его интереса к механике. Предметами его интереса в этой области, говоря современным языком, были законы сложения скоростей и сложения сил, понятие нейтральной плоскости и положение центра тяжести при движении тела.

Спор о том, какой вклад внес Леонардо да Винчи в точные науки, частично связан с историей его записных книжек. После его смерти они попали в руки частных коллекционеров и в течение длительного времени доступ к ним был ограничен. Публиковать эти записные книжки начали лишь в конце XIX в. и вскоре стали считать, что Леонардо да Винчи на столетия опередил многие открытия.

Однако восхищение именем Леонардо да Винчи вызывало интерес и к трудам его предшественников и современников. Было установлено, что Леонардо да Винчи многое перенял из этих источников и иногда даже копировал имеющиеся в них рисунки. Поэтому стало распространяться мнение, что он вообще не создал что-либо оригинальное, заслуживающее внимания.

Две новые рукописи Леонардо да Винчи, обнаруженные около 20 лет назад в Мадриде и известные под названием «Мадридские рукописи», показывают, что это мнение необоснованно. Л. Рети из Калифорнийского университета в Лос-Анджелесе, пер-

вым изучавший рукописи (в этой работе ему большую помощь оказал Б. Дибнер), отмечал, что они должны сыграть важную роль в «восстановлении репутации» Леонардо да Винчи как исследователя природы. Следует иметь в виду, что Леонардо да Винчи обучался в мастерских живописцев и скульпторов, поэтому его основными «инструментами» в познании мира были глаза и руки. Мы считаем, что вклад Леонардо да Винчи в теоретическую механику может быть оценен в большей степени путем более внимательного изучения его рисунков, а не текстов рукописей и имеющихся в них математических выкладок.

НАЧНЕМ с примера, отражающего настойчивые попытки Леонардо да Винчи решить задачи, связанные с усовершенствованием конструкции оружия (никогда полностью не решенные), вызвавшие у него интерес к законам сложения скоростей и сложения сил. Несмотря на быстрое развитие порохового оружия в период жизни Леонардо да Винчи, лук, арбалет и копье еще продолжали оставаться распространенными видами оружия. Особенно много внимания Леонардо да Винчи уделял такому старинному оружию, как арбалет. Часто бывает, что конструкция той или иной системы достигает совершенства только после того, как ею заинтересуются потомки, причем процесс совершенствования этой системы может приводить к фундаментальным научным результатам.

Плодотворные экспериментальные работы по совершенствованию арбалетов проводились и раньше, до Леонардо да Винчи. Например, в арбалете стали использовать укороченные стрелы, которые имели примерно в 2 раза лучшие аэродинамические характеристики, чем обычные лучные стрелы. Кроме того, было положено начало изучению основных принципов,

лежащих в основе стрельбы из арбалета, о чем свидетельствует рисунок неизвестного художника, который обнаружен в рукописи, известной под названием «Гуситские войны». Этот рисунок отражает попытку представить арбалет на основе понятия круга: станок, или ложа, арбалета образует диаметр круга, его спусковой механизм находится в центре круга, дуга арбалета составляет треть дуги окружности, а тетива в ненапрянутом положении делит радиус пополам.

В определенном смысле этот рисунок отражает раннюю стадию инженерной теории, когда предпринимались попытки подчинить конструкцию устройства идеальной геометрической форме. Иногда такой подход оказывался плодотворным. В отношении арбалета целесообразность этого подхода состояла хотя бы в том, что дуга, имеющая постоянную кривизну, служит дольше. Если этого достичь невозможно, то изменение радиуса дуги должно быть как можно более плавным.

Стремясь не ограничиваться традиционными конструктивными решениями, Леонардо да Винчи обдумывал такую конструкцию арбалета, которая позволяла бы стрелять только кончиком стрелы, оставляя ее древно неподвижным. По-видимому, он понимал, что за счет уменьшения массы снаряда можно увеличить его начальную скорость.

В некоторых из своих конструкций арбалетов он предлагал использовать несколько дуг, действующих либо одновременно, либо последовательно. В последнем случае самая большая и массивная дуга приводила бы в действие меньшую по размерам и более легкую дугу, а та в свою очередь еще меньшую и т. д. Выстрел стрелой производился бы на последней дуге. Очевидно, что Леонардо да Винчи рассматривал этот процесс с точки зрения сложения скоростей. Например, он отмечает, что дальность

стрельбы из арбалета будет максимальной, если произвести выстрел на скаку с лошади, мчащейся галопом, и в момент выстрела податься вперед. В действительности это не привело бы к значительному увеличению скорости стрелы. Тем не менее идеи Леонардо да Винчи имели прямое отношение к разгоравшемуся спору относительно того, возможно ли бесконечное увеличение скорости. Позже ученые начали склоняться к выводу, что этот процесс не имеет предела. Такая точка зрения существовала до тех пор, пока Эйнштейн не выдвинул свой постулат, из которого следовало, что ни одно тело не может двигаться со скоростью, превышающей скорость света. Однако при скоростях, много меньших скорости света, закон сложения скоростей (на основе принципа относительности Галилея. — Ред.) остается справедливым.

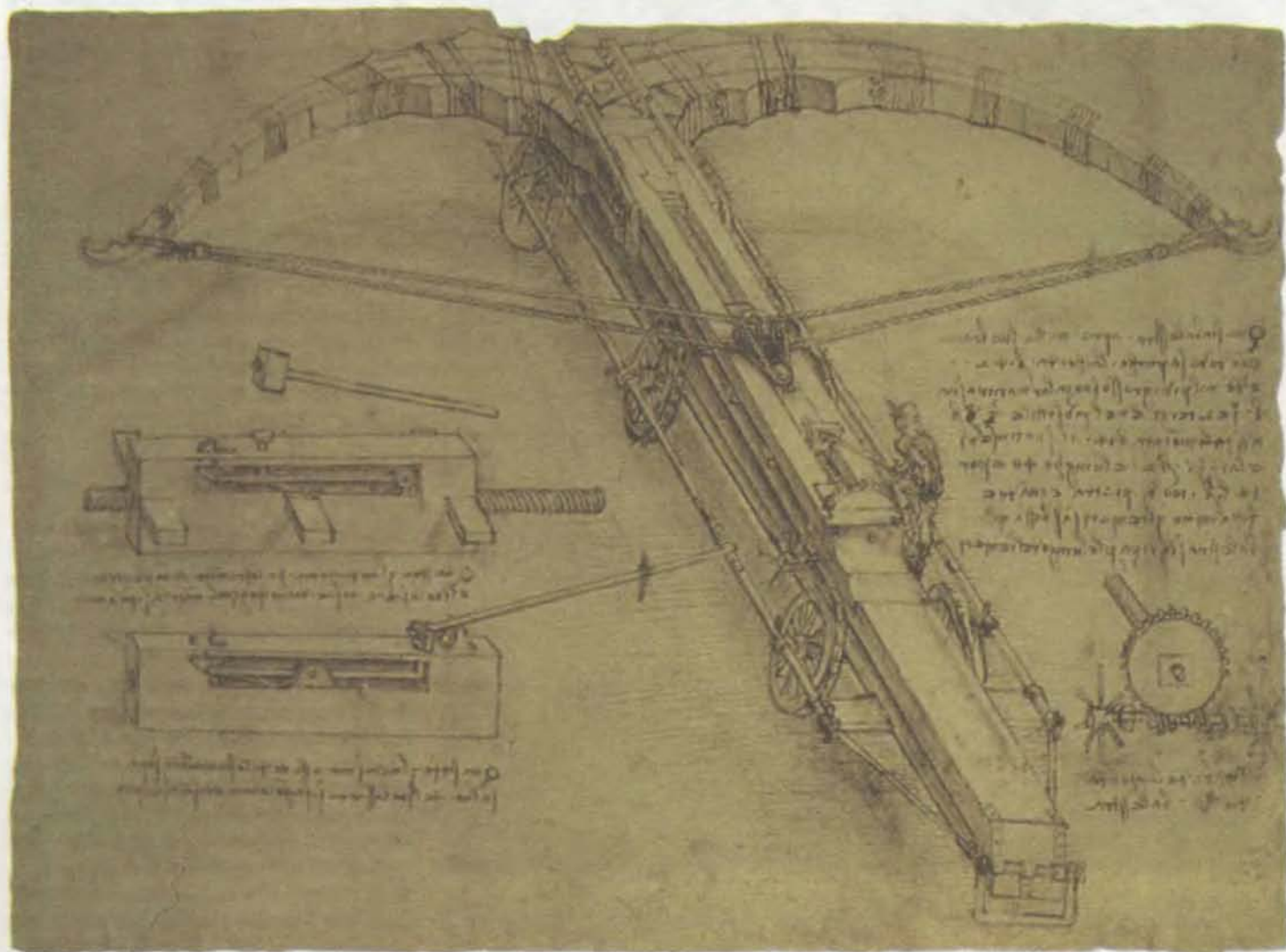
ЗАКОН сложения сил, или параллелограмм сил, был открыт уже после Леонардо да Винчи. Этот закон

рассматривается в том разделе механики, который позволяет ответить на вопрос, что происходит, когда две или более сил взаимодействуют под различными углами. Сегодня эта задача решается просто: чертят параллелограмм (или параллелограммы) сил и находят результирующую силу, направленную по диагонали. Возможно, что Леонардо да Винчи занимался, хотя и неосознанно, решением такой задачи, когда он анализировал действие арбалета, стремясь найти то или иное конструктивное решение. Силы, направленные под углом друг к другу, возникают, например, при натяжении тетивы.

При изготовлении арбалета важно добиться симметричности усилий, возникающих в каждом крыле. В противном случае стрела может сместиться при выстреле в сторону из своей канавки, и точность стрельбы тем самым будет нарушена. Обычно арбалетки, подготавливая свое оружие к стрельбе, проверяли, одинаковы ли изгиб крыльев его дуги. Сегодня

таким образом проверяются все луки и арбалеты. Оружие подвешивается на стене так, чтобы его тетива была горизонтальна, а дуга выпуклой частью обращена вверх. К середине тетивы подвешиваются различные грузы. Каждый груз вызывает определенный изгиб дуги, что позволяет проверить симметричность действия крыльев. Легче всего это сделать, наблюдая, опускается ли при увеличении груза центр тетивы по вертикали или отходит от нее.

Этот способ, возможно, навел Леонардо да Винчи на мысль использовать диаграммы (обнаружены в «Мадридских рукописях»), в которых смещение концов дуги (с учетом положения центра тетивы) представлено в зависимости от величины подвешенного груза. Он понимал, что сила, необходимая для того, чтобы дуга начала сгибаться, поначалу невелика и возрастает с увеличением смещения концов дуги. (В основе этого явления лежит закон, сформулированный гораздо позже Робертом Гуком: абсо-



ГИГАНТСКАЯ КАТАПУЛЬТА — рисунок Леонардо да Винчи, сделанный им, вероятно, в то время, когда он занимался изучением напряжений сжатия и растяжения в дуге арбалета. Катапульта предназначалась для метания камней. Как видно из рисунка, передняя (фронтальная) и задняя

(тыльная) части крыльев дуг различаются по своей конструкции. Задняя часть каждого крыла изготовлена из отдельных блоков, соприкасающихся друг с другом только при максимальном изгибе дуги.

лутная величина смещения в результате деформации тела пропорциональна приложенной силе.)

Зависимость между смещением концов дуги арбалета и величиной подвешенного к тетиве груза Леонардо да Винчи называл «пирамидальной», поскольку, как в пирамиде противоположные грани расходятся по мере удаления от точки пересечения, так и эта зависимость становится все более заметной по мере смещения концов дуги. Отмечая изменение положения тетивы в зависимости от величины груза, он, однако, заметил нелинейности. Одна из них состояла в том, что, хотя смещение концов дуги линейно зависело от величины груза, между смещением тетивы и величиной груза линейная зависимость отсутствовала. На основании этого наблюдения Леонардо да Винчи, по-

видимому, пытался найти объяснение тому факту, что в некоторых арбалетах тетива, отпущенная после приложения к ней силы определенной величины, движется сначала быстрее, чем в момент приближения к своему исходному положению.

Такая нелинейность, возможно, и наблюдалась при пользовании арбалетами с плохо изготовленными дугами. Вероятно, что выводы Леонардо да Винчи основаны на ошибочном рассуждении, а не на расчетах, хотя иногда он все же прибегал к вычислениям. Тем не менее эта задача вызвала у него глубокий интерес к анализу конструкции арбалета. Действительно ли стрела, быстро набравшая скорость в начале выстрела, начинает двигаться быстрее тетивы и оторвется от нее до того, как тетива возвратится в исходное положение?



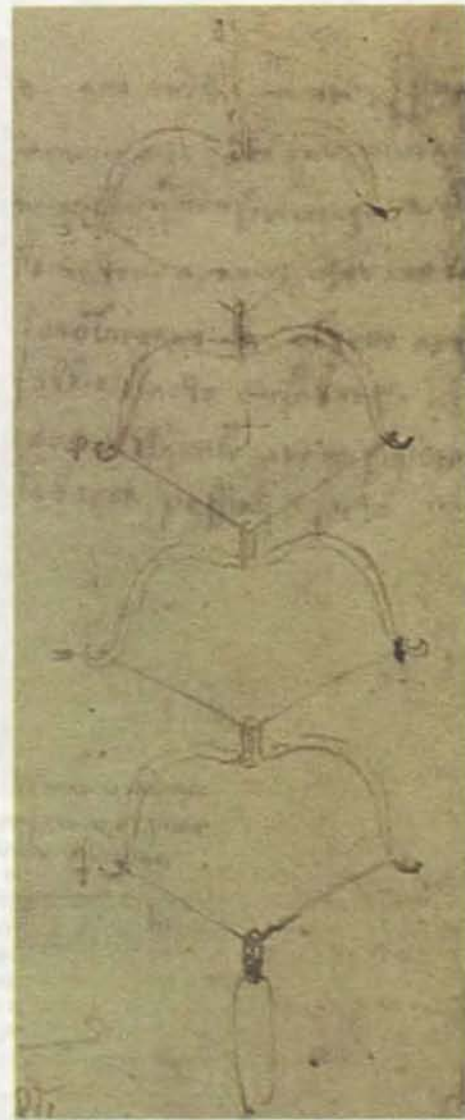
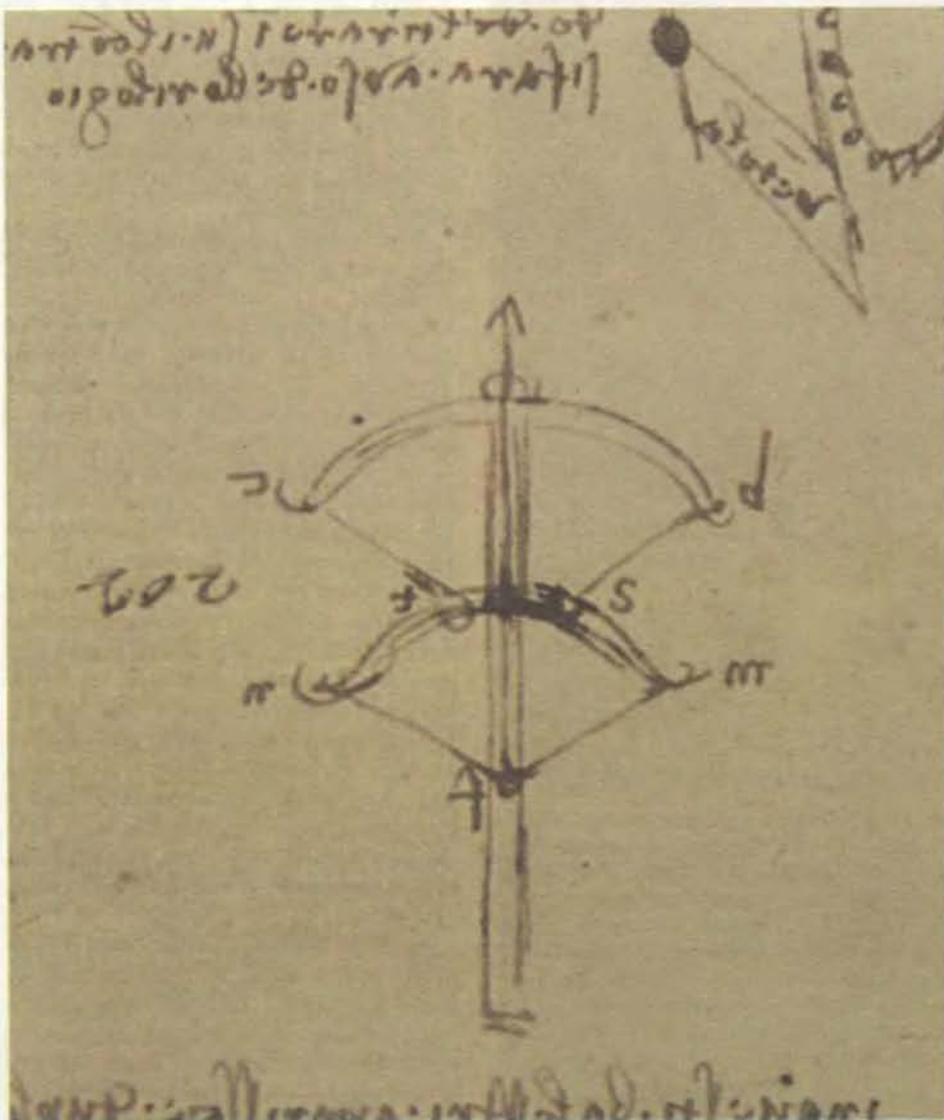
ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД к конструированию арбалета представлен на этом рисунке неизвестного автора, обнаруженном в рукописи, относящейся к позднему средневековью и известной под названием «Гуситские войны». Изображенный на рисунке арбалет имеет идеальную геометрическую форму. Спусковой механизм находится в центре круга, тетива (хорда) делит радиус пополам. Такой идеализированный подход к конструированию можно считать одной из отправных точек в дальнейших исследованиях Леонардо да Винчи по теоретической механике.

Не имея четкого представления о таких понятиях, как инерция, сила и ускорение, Леонардо да Винчи, естественно, не мог найти окончательного ответа на этот вопрос. На страницах его рукописи встречаются рассуждения противоположного характера: в некоторых из них он склонен ответить на этот вопрос положительно, в других — отрицательно. Интерес Леонардо да Винчи к этой проблеме привел его к дальнейшим попыткам усовершенствовать конструкцию арбалета. Это говорит о том, что интуитивно он догадывался о существовании закона, впоследствии получившего название «закон сложения сил».

ЛЕОНАРДО да Винчи не ограничился только проблемой скорости движения стрелы и действия сил натяжения в арбалете. Например, его интересовало также, увеличится ли дальность полета стрелы в два раза, если в два раза увеличить вес дуги арбалета. Если измерить суммарный вес всех стрел, расположенных одна за другой впритык и составляющих непрерывную линию, длина которой равна максимальной дальности полета, то будет ли этот вес равен силе, с которой тетива действует на стрелу? Иногда Леонардо да Винчи действительно смотрел глубоко, например в поисках ответа на вопрос, свидетельствует ли вибрация тетивы сразу после выстрела о потере энергии дугой?

В итоге в «Мадридской рукописи» I, касаясь соотношения между усилием на дуге и смещением тетивы, Леонардо да Винчи утверждает: «Сила, вынуждающая тетиву арбалета двигаться, увеличивается по мере уменьшения угла в центре тетивы». Тот факт, что это утверждение больше не встречается нигде в его записях, может означать, что такой вывод был сделан им окончательно. Несомненно, он применял его в многократных попытках усовершенствовать конструкцию арбалета с так называемыми блочными дугами.

Блочные дуги, в которых тетива пропущена через блоки, известны современным стрелкам из лука. Эти дуги позволяют достичь высокой скорости полета стрелы. Законы, лежащие в основе их действия, сейчас хорошо известны. Леонардо да Винчи не имел столь же полного представления о действии блочных дуг, однако он изобрел арбалеты, в которых тетива пропусклась через блоки. В его арбалетах блоки обычно имели жесткое крепление: они не перемещались вместе с концами дуги, как в современных арбалетах и луках. Поэтому дуга в конструкции арбалета Леонардо да



КОМБИНИРОВАННЫЕ ДУГИ Леонардо да Винчи представляют интерес с точки зрения того, что сейчас имеет название «сложение скоростей». На одном из его рисунков (слева) изображены четыре дуги; первая из них приводит в действие вторую, вторая — третью, третья — четвертую, которая и производит выстрел. Интуиция Леонардо да Винчи верно подсказывала ему, что увеличение энергии, накопленной в этой сложной системе, приведет к увеличению

скорости движения и дальности полета стрелы. Однако ему не был известен закон сохранения энергии и, следовательно, он не мог знать, какой величины достигают потери энергии в системе, состоящей из нескольких арбалетных дуг. Вряд ли этот замысел Леонардо да Винчи был когда-либо осуществлен и мог привести к значительному увеличению дальности стрельбы.

Винчи не оказывала такого же действия, как в современных блочных дугах. Так или иначе, Леонардо да Винчи, очевидно, намеревался изготовить дугу, конструкция которой позволяла бы решить проблему «тетива—угол», т. е. увеличение силы, действующей на стрелу, достигалось бы за счет уменьшения угла в центре тетивы. Кроме того, он пытался уменьшить потери энергии при стрельбе из арбалета.

В основной конструкции арбалета Леонардо да Винчи очень гибкая дуга укреплялась на станине. На некоторых рисунках видно, что при максимальном натяжении тетивы дуга изгибалась почти в окружность. От концов дуги тетива с каждой стороны пропусклась через пару блоков, укрепленных впереди станины рядом с на-

правляющей канавкой для стрелы, а затем шла к спусковому устройству.

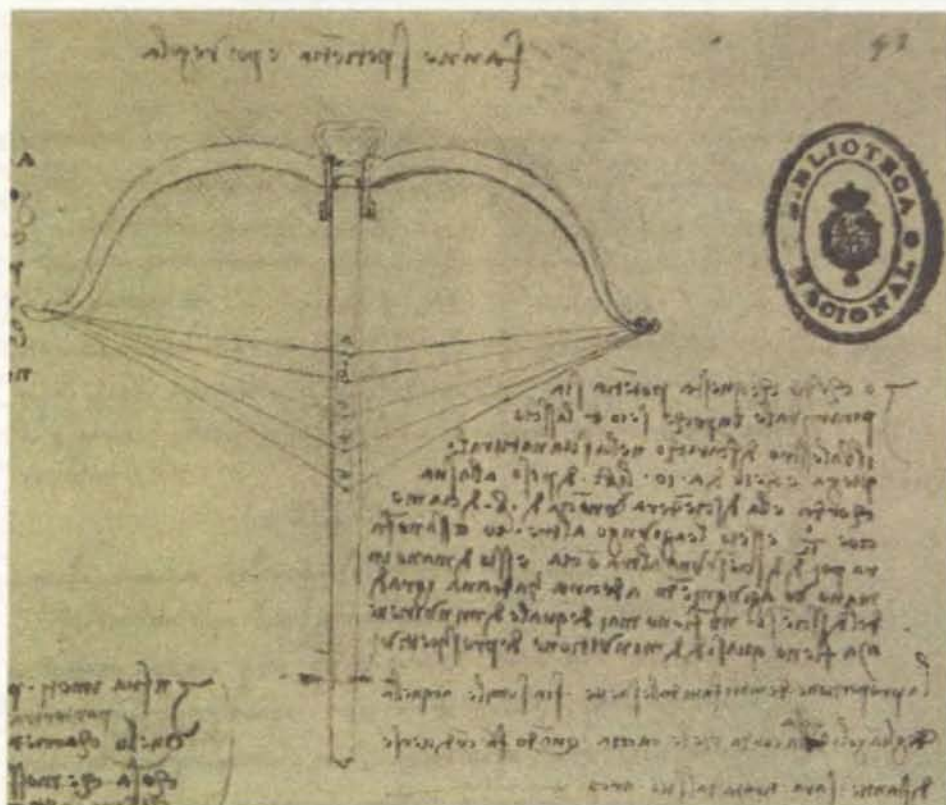
Леонардо да Винчи, по-видимому, нигде не дал объяснения своей конструкции, однако ее схема неоднократно встречается в его рисунках вместе с изображением арбалета (также с сильно изогнутой дугой), в котором натянутая тетива, идущая от концов дуги к спусковому устройству, имеет V-образную форму.

Представляется наиболее вероятным, что Леонардо да Винчи стремился максимально уменьшить угол в центре тетивы с тем, чтобы стрела при выстреле получала большее ускорение. Возможно, что и блоки он использовал для того, чтобы угол между тетивой и крыльями арбалета оставался как можно дольше близким к 90° . Интуитивное представление о

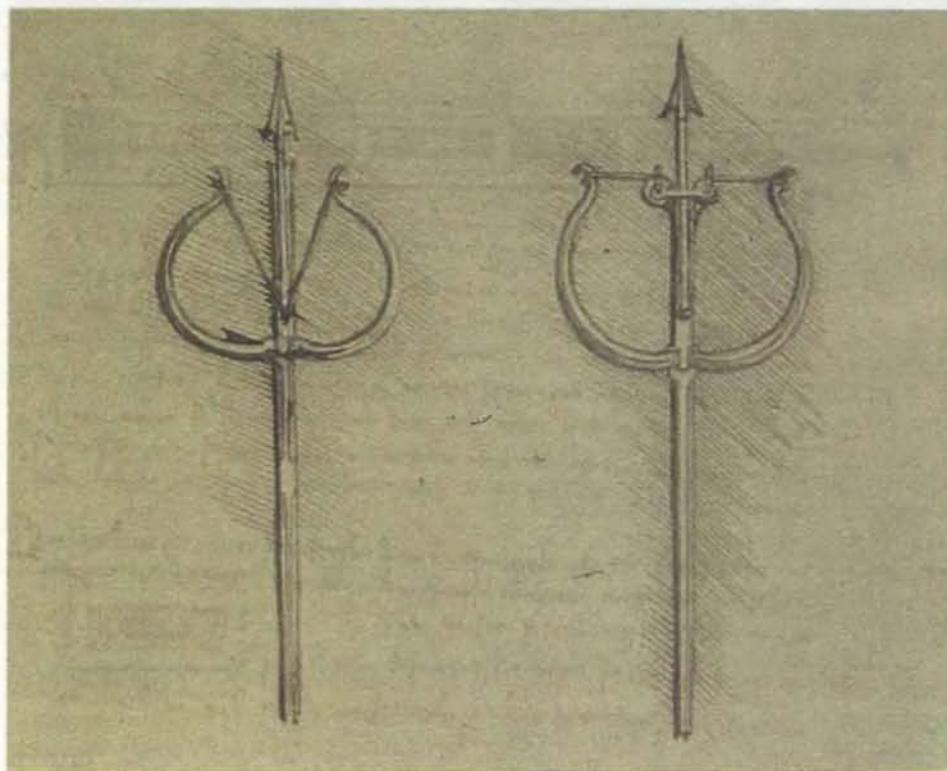
законе сложения сил помогло ему радикально изменить проверенную временем конструкцию арбалета на основе количественного соотношения между энергией, «запасенной» в дуге арбалета, и скоростью движения стрелы. Несомненно, он имел представление о механической эффективности своей конструкции и пытался дополнительно усовершенствовать ее.

Блочная дуга Леонардо да Винчи, видимо, была непрактичной, поскольку резкое натяжение тетивы приводило к значительному ее изгибу. Такую значительную деформацию могли выдержать лишь составные дуги, изготовленные особым образом.

СОСТАВНЫЕ дуги использовались при жизни Леонардо да Винчи и, возможно, именно они вызвали



ОТНОШЕНИЕ СИЛ в арбалете представляло собой одну из сложнейших задач для Леонардо да Винчи. Из этого рисунка видно, что он изучал отношение между смещением концов дуги и величиной силы, приложенной к тетиве. Леонардо да Винчи, видимо, понимал, что эти величины связаны прямой зависимостью. Поскольку максимально натянутая тетива обладает большей энергией, чем в других положениях, он считал, что стрела, вероятно, отрывается от тетивы до того, как та передаст ей всю свою энергию. Очевидно, он считал, что угол, образованный в центре тетивы, является главной мерой способности оружия передавать энергию, поэтому он пытался, прибегая к тем или иным конструктивным решениям, максимально увеличить этот угол.



АРБАЛЕТЫ с измененной конструкцией дуги, предложенные Леонардо да Винчи. Он, по-видимому, нигде не дал объяснения, почему в этих арбалетах используются обратные дуги, а угол тетивы столь мал, особенно у арбалета справа, в котором применены блоки. Исходя из тех рукописей Леонардо да Винчи, где говорится об арбалетах, можно предположить, что такая конструкция дуг позволяет передавать энергию от дуги к тетиве более эффективно.

у него интерес к той проблеме, попытки решить которую привели его к представлению о том, что именуется нейтральной плоскостью. Исследования этой проблемы было связано и с более глубоким изучением поведения материалов под действием механического напряжения.

В типичной составной дуге, применявшейся в эпоху Леонардо да Винчи, внешняя и внутренняя стороны крыльев арбалета изготавливались из различных материалов. Внутренняя сторона, испытывавшая сжатие, обычно изготавливалась из рога, а внешняя, работавшая на растяжение, — из сухожилий. Каждый из этих материалов прочнее дерева. Между внешней и внутренней сторонами дуги использовался деревянный слой, достаточно прочный, чтобы придать крыльям жесткость. Крылья такой дуги можно было сгибать более чем на 180° . Леонардо да Винчи имел некоторое представление о том, как изготавливали такую дугу, а проблема выбора материалов, которые могли бы выдерживать сильное натяжение и сжатие, возможно, привела его к глубокому пониманию того, как возникают напряжения в той или иной конструкции.

На двух небольших рисунках (обнаруженных в «Мадридской рукописи» I) он изобразил плоскую пружину в двух состояниях — деформированном и недеформированном. В центре деформированной пружины он начертил две параллельные линии, симметричные относительно центральной точки. При сгибании пружины эти линии расходятся с выпуклой стороны и сходятся — с вогнутой.

Эти рисунки сопровождается подпись, в которой Леонардо да Винчи отмечает, что при сгибании пружины выпуклая часть становится толще, а вогнутая — тоньше. «Такая модификация является пирамидальной и, следовательно, никогда не будет изменяться в центре пружины». Иными словами, расстояние между первоначально параллельными линиями будет возрастать в верхней части по мере его уменьшения в нижней. Центральная часть пружины служит своего рода балансом между двумя сторонами и представляет собой зону, где напряжение равно нулю, т. е. нейтральную плоскость. Леонардо да Винчи понимал также, что как натяжение, так и сжатие увеличиваются пропорционально расстоянию до нейтральной зоны.

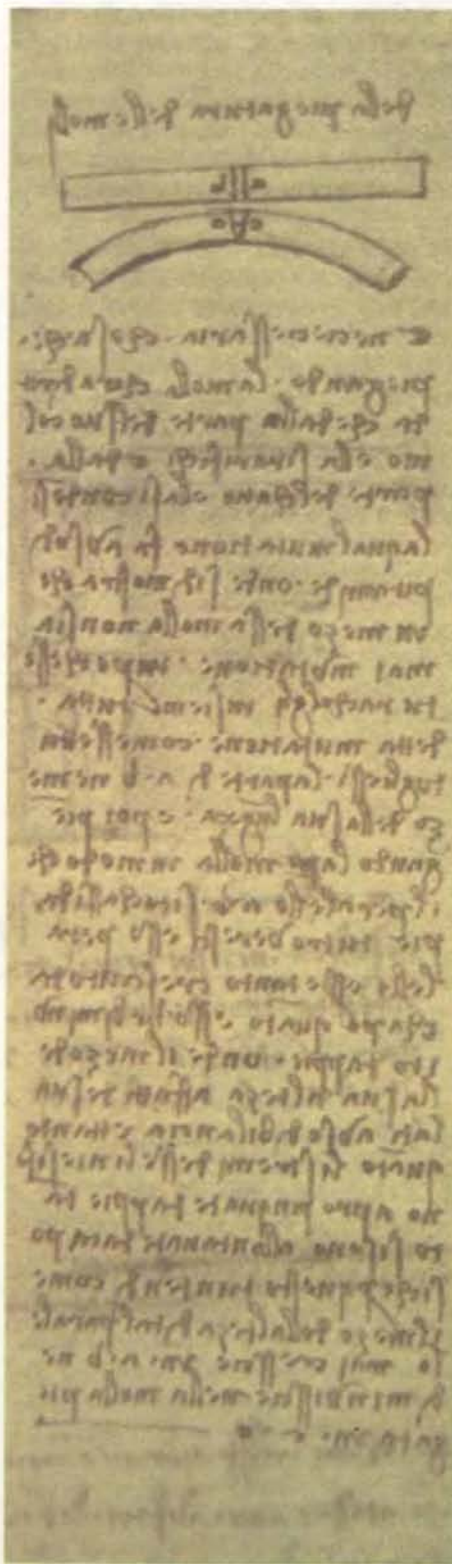
Если определить точки, где напряжения равны нулю, т. е. найти таким образом нейтральную плоскость, то можно проанализировать, как происходит возрастание нагрузок; нейтральная плоскость при этом будет

служить плоскостью отсчета. Не прибегая к связанным между собой понятиям нейтральной плоскости и пропорционального возрастания напряжений, трудно, а зачастую просто невозможно (особенно без помощи компьютера) правильно предсказать, как будут увеличиваться нагрузки, и проектировать надежный элемент конструкции, например, балку. Компьютер может разбить детали конструкции или машины на части и оценить напряжения в каждой из них, но даже и в этом случае обычно используется понятие нейтральной плоскости, поскольку это облегчает программирование. Итак, упомянутые выше два рисунка показывают, что Леонардо да Винчи имел дело с одним из основных понятий механики. (К. Замматтио, изучающий наследие Леонардо да Винчи, также отмечает, что эти рисунки имеют большое значение.)

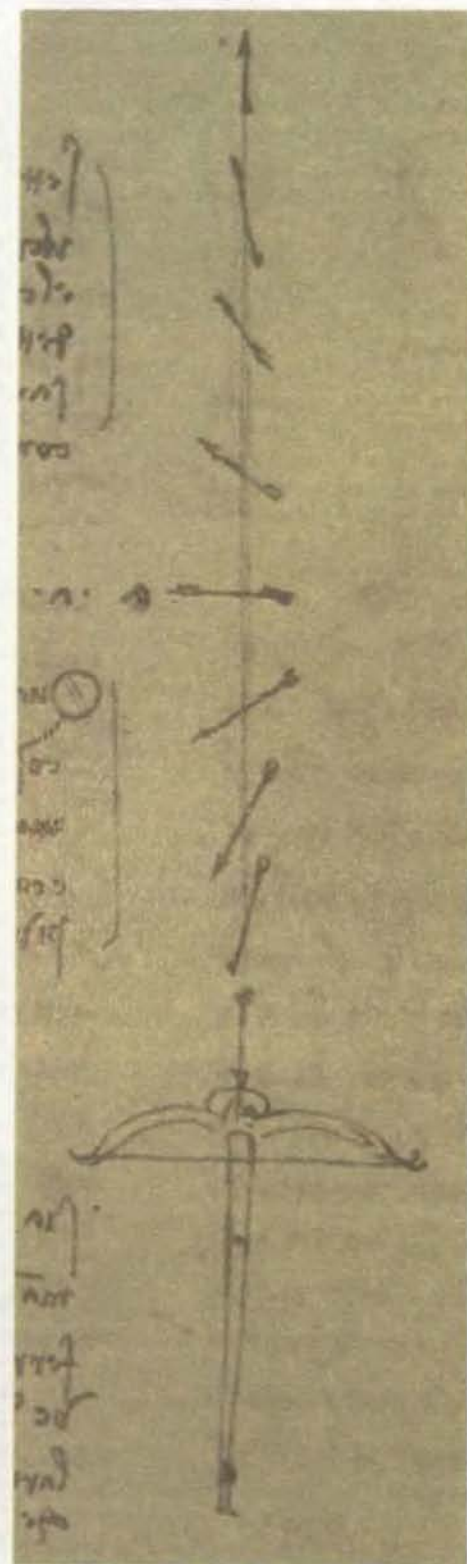
Из рисунков Леонардо да Винчи видно, что представление о нейтральной плоскости возникло у него и при изучении действия арбалета. Примером является его рисунок гигантской катапульты для стрельбы камнями. Сгибание дуги этого оружия производилось с помощью винтового ворота; камень вылетал из кармана, расположенного в центре сдвоенной тетивы. Как ворот, так и карман для камня нарисованы (в увеличенном масштабе) такими же, как и на рисунках арбалета. Однако Леонардо да Винчи, по-видимому, понимал, что увеличение размера дуги приведет к сложным проблемам.

Судя по рисункам Леонардо да Винчи, на которых изображена нейтральная зона, ему было известно, что (для данного угла сгибания) напряжения в дуге увеличиваются пропорционально ее толщине. Чтобы напряжения не достигали критической величины, он изменил конструкцию гигантской дуги. Передняя (фронтальная) ее часть, испытывавшая растяжение, по его представлениям, должна изготавливаться из цельного бревна, а задняя ее часть (тыльная), работающая на сжатие, — из отдельных блоков, закрепленных позади передней части. Форма этих блоков была такова, что они могли соприкоснуться друг с другом только при максимальном изгибе дуги. Эта конструкция, так же как и другие, показывает, что Леонардо да Винчи считал, что силы растяжения и сжатия следует рассматривать отдельно друг от друга.

ПОСЛЕДНИЙ пример, который мы рассмотрим, также служит подтверждением тому, что серьезный анализ даже простых проблем механики показывает, что в их основе ле-



ФАКТ СУЩЕСТВОВАНИЯ НЕЙТРАЛЬНОЙ ЗОНЫ в напряженном теле, по-видимому, впервые был открыт Леонардо да Винчи. На этом рисунке изображена пружина (или балка) в деформированном и недеформированном состояниях. Параллельные линии в центре пружины расходятся вверх при ее изгибании книзу. Из текста, сопровождающего рисунок, видно, что Леонардо да Винчи понимал, что в центре пружины напряжения нет, а сами напряжения возрастают пропорционально расстоянию от центра. Опираясь на эти представления, можно найти теоретический предел прочности конструкции.



ЗАДАЧА О ПОЛОЖЕНИИ ЦЕНТРА ТЯЖЕСТИ движущегося тела вызывала большой интерес у Леонардо да Винчи, что нашло отражение в этом рисунке, на котором изображена стрела, выпущенная из арбалета вертикально вверх древком вперед. Из рисунка видно, что Леонардо да Винчи догадывался, что стрела вращается вокруг своего центра тяжести, который перемещается по той же траектории, как и в случае, если бы она была выпущена правильно. Рисунок является, вероятно, первой попыткой применить понятие центра тяжести в динамике. Это было шагом вперед на пути к попытке Ньютона рассматривать планеты как движущиеся центры массы.

жат фундаментальные законы. Этот пример связан с вопросом о положении центра тяжести тела. Другой небольшой, но очень важный рисунок (также обнаруженный в «Мадридской рукописи» I) позволяет установить связь между размышлениями Леонардо да Винчи относительно действия арбалета и его более поздними работами по теории полета.

На этом рисунке изображен арбалет, выстрел из которого производится вертикально вверх. В начале полета стрела направлена острием вниз (Леонардо да Винчи, возможно, видел, как иногда шутки ради арбалетчики заряжали так свое оружие). По мере движения вверх стрела разворачивается острием вперед. При движении вниз процесс повторяется в обратном порядке. Леонардо да Винчи отмечает, что при движении как вверх, так и вниз стрела имеет одинаковую траекторию. «Центр естественного движения (под действием силы тяжести) и центр насильственного движения (вызванного другими силами) один и тот же. . . Центр тяжести стрелы находится в одной и той же ее точке на протяжении всего ее движения, будь оно насильственным или естественным». Таким образом, на рисунке стрела изображена вращающейся вокруг своего центра тяжести, который движется вдоль траектории полета.

Иными словами, Леонардо да Винчи начинал понимать, что движение стрелы можно рассматривать как движение ее центра тяжести с определенной скоростью вдоль данной траектории. Поэтому его рисунок имеет значение и для истории развития теории вращения твердого тела, поскольку такой подход позволял упростить задачу настолько, что движение тела можно было анализировать математически. Более важным, однако, является то, что рисунок, на наш взгляд, представляет собой первую попытку применить понятие центра тяжести в динамике. (Архимед пользовался этим понятием в статике.) М. Кладжет из Института высших исследований в Принстоне, известный своими работами по истории механики в средние века, разделяет эту точку зрения.

Один рисунок Леонардо да Винчи, где изображен центр тяжести движущегося тела, был известен еще до открытия «Мадридских рукописей». На этом рисунке, обнаруженном в записной книжке, известной под названием «Кодекс Форетера» II, изображен падающий и переворачивающийся кубик. В подписи к этому рисунку отмечается, что центр тяжести кубика все время остается на траектории, по ко-

торой он движется вниз. Рисунок стрелы арбалета, обнаруженный в «Мадридской рукописи», очевидно, был сделан раньше этих двух рисунков, и его можно рассматривать как исходную точку исследований Леонардо да Винчи в области теории полета.

В рукописи «Sul Volo» и других своих записях Леонардо да Винчи отмечает, что устойчивость полета птицы достигается только тогда, когда ее центр тяжести находится впереди центра сопротивления (точки, в которой давление спереди и сзади одинаково). Этот функциональный принцип, использовавшийся Леонардо да Винчи в теории полета птиц, и сейчас имеет важное значение в теории полета самолетов и ракет.

Справедливость заключения Леонардо да Винчи относительно условия

устойчивости полета несложно проверить экспериментально. Мы выбрали слабую дугу и тяжелую стрелу (чтобы ее скорость была относительно низкой) и то место древка стрелы, где находился центр тяжести, обернули яркой оранжевой лентой. К переднему концу стрелы была приделана тяжелая насадка с выемкой для тетивы, что облегчало наблюдения за стрелой. Полет стрелы наблюдался на темном фоне, например на фоне деревьев. Несмотря на то что стрелки мы неважные, нам удалось установить, что положение центра тяжести всегда имело важное значение; во многих случаях стрела переворачивалась вокруг своего центра тяжести, оранжевая метка при этом продолжала перемещаться вдоль неизменной траектории.

Наука и общество

Следы преступления?

БЫЛО ли когда-нибудь для человека поедание своих сородичей способом пропитания? Этот вопрос всегда вызывал большие споры среди антропологов. Большинство сообщений о таком «пищевом» каннибализме у современных примитивных племен не принимаются во внимание как малодостоверные и сомнительные. Археологические данные о том, что в обычный рацион доисторических людей входило человеческое мясо, тоже неубедительны. Недавние раскопки в пещерах Фонтбрегуа на юго-востоке Франции принесли наиболее серьезные на сегодняшний день свидетельства общепринятого регулярного каннибализма у людей каменного века.

Работавшая в этой местности международная группа археологов под руководством П. Вилла из Колорадского университета в Боулдере обнаружила скопления костей человека и животных. Анализ их показал, что все кости, в том числе человеческие, были отделены от тканей, рассечены и раздроблены практически одинаковым образом. Так как туши животных, скорее всего, использовались для приготовления пищи, Вилла и ее коллеги

считают, что та же участь постигла и людей.

В сообщении, опубликованном в журнале "Science", говорится, что кости людей и животных относились в основном к одним и тем же частям тела, а значит, туши разделялись одинаково и из них отбирались аналогичные куски. На всех костях было множество отметин, которые могли быть сделаны только каменными орудиями, но не зубами; следовательно, ткани были удалены с костей искусственно, а не были обглоданы стервятниками или другими падальщиками. Кроме того, большие кости и людей и животных были раздроблены — вероятно, для того, чтобы извлечь костный мозг.

Следует заметить, что не впервые вывод о каннибализме древних людей делается на основании того, что остатки людей и животных выглядят обработанными одинаково. Однако предыдущие находки были чаще всего в таком состоянии, что не позволяли утверждать что-либо однозначно. Кроме того, всегда не просто доказать, что отметины на костях человека не связаны с какими-нибудь воздействиями, не имеющими отношения к процессу приготовления пищи; например, высказывалось предположение о погребальной церемонии, в ходе которой, быть может, кости отделя-

ли от тканей. В отличие от других скопление костей в Фонтбрегау очень хорошо сохранилось и, вероятно, пролежало в неизменном состоянии около 6000 лет. Вилла и ее коллегам кажется маловероятным, что извлечение костного мозга из костей являлось составной частью погребального ритуала.

Антропологи, которые ранее выступали против гипотезы о регулярном каннибализме древних людей, в том числе У. Аренс из Университета шт. Нью-Йорк в Стони-Брук, считают, что исследование, проведенное группой Вилла, выполнено вполне аккуратно, однако не исключают возможности другой интерпретации полученных данных. Так, по мнению Аренса, доводы в пользу каннибализма были бы более убедительны, если бы на человеческих костях удалось обнаружить явные следы приготовления пищи. Самым сильным возражением против выводов Вилла является то, что нет подтверждающих их независимых данных. До тех пор пока в других местах не будут обнаружены аналогичные скопления костей, подчеркивает Аренс, находку в Фонтбрегау следует рассматривать только как курьез.

Биотехнология: новые успехи

ТРИ первых препарата, полученных с помощью биотехнологических методов, допущены к производству Управлением по контролю за качеством пищевых продуктов и косметических средств США (FDA): вакцина против вируса гепатита В, человеческий α -интерферон для лечения одного из редких видов лейкоза и моноклональные антитела, предотвращающие отторжение пересаженной почки.

Гепатит В — это тяжелое инфекционное заболевание печени. Его возбудитель — вирус, передающийся преимущественно с кровью, в связи с чем опасность заразиться велика для медицинских работников и людей, применяющих внутривенные инъекции, в частности наркоманов; группой риска являются также гомосексуалисты. Вакцина на основе вирусного белка, выделенного из крови переболевших людей, вполне эффективна, но она не получила широкого распространения, так как пациенты опасаются, что такой препарат может быть загрязнен вирулентным вирусом гепатита В, вирусом синдрома приобретенного иммунного дефицита или другими инфекционными агентами.

Эти, хотя и необоснованные, пре-

тензии в принципе не могут быть предъявлены к новой вакцине, которую получают не из крови человека. Фрагмент ДНК, содержащий ген белка оболочки вирусной частицы, был введен вместе с соответствующими регуляторными последовательностями в культивируемые клетки дрожжей. В результате дрожжевые клетки стали синтезировать белок, который и служит антигенным компонентом вакцины. Он стимулирует у человека образование антител против вируса гепатита В. Вакцина разработана фирмой Chiron Corporation, а производить и продавать ее будет компания Merck Sharp & Dome.

Как и вакцина против гепатита В, α -интерферон также получен с помощью методов генной инженерии. Этот белок используется для лечения волосноклеточного лейкоза — редкого вида рака крови, которым на сегодняшний день болеет около 1000 американцев. Своим названием заболевание обязано тому, что определенные клетки иммунной системы, а именно В-лимфоциты, претерпевая злокачественную трансформацию, приобретают характерную форму. При волосноклеточном лейкозе наблюдаются увеличение селезенки и подавление развития красных и белых кровяных клеток. В результате организм больного ослаблен и легко восприимчив к различным инфекциям; смерть наступает через 1—5 лет после начала заболевания.

У пациентов, получавших α -интерферон, специфические раковые В-клетки исчезают, а количество нормальных кровяных клеток достигает приемлемого уровня. Более 90% больных волосноклеточным лейкозом после лечения α -интерфероном жили более двух лет, а у 75-90% произошла частичная или полная ремиссия. Интерферон, который является естественным продуктом деятельности определенных клеток, уже давно считается эффективным противовирусным и, предположительно, противораковым препаратом. Но выделить его из белых кровяных клеток исключительно сложно, поэтому не было возможности накопить его в количестве, достаточном даже для клинических исследований. Принятый к производству α -интерферон — первый интерферон, который одобрен для лечения рака. Он получен не из белых кровяных клеток, а путем генной инженерии. Ген, кодирующий α -интерферон, ввели в бактерии *Escherichia coli*, которые в результате начали синтезировать этот белок в большом количестве. FDA допущены к производству два интерферонных препарата. Один разработан фирмой Biogen

Research; лицензию на его производство и продажу приобрела компания Schering-Plough Corporation. Другой создан совместно фирмой Genentech, Inc. и компанией Hoffmann — La Roche, Inc., которая его производит и продает.

Совершенно иной биотехнологический подход применяется для получения моноклональных антител. Проводят слияние мышинных клеток двух типов — одна синтезирует нужные антитела, а другая способна неограниченно размножаться в культуре. Получающаяся в результате клетка (так называемая гибридома) дает начало клону — линии идентичных клеток, культура которых растет неограниченно и продуцирует в большом количестве антитела одного определенного вида. До сих пор моноклональные антитела использовались в медицине лишь в диагностических целях. Компания Ortho Pharmaceutical Corporation разработала и намерена выпустить в продажу препарат моноклональных антител, который имеет терапевтическое назначение. FDA одобрило его для пересадки почек. Мишенью новых антител являются Т-лимфоциты. Эти клетки выполняют в иммунной системе различные функции, в том числе распознают чужеродные клетки, что приводит к отторжению пересаженной ткани. В 1984 г. в США было сделано 7000 операций по пересадке почек и более чем в половине случаев произошло отторжение трансплантата. Есть много препаратов, препятствующих отторжению, и часто с их помощью удается спасти трансплантат. Однако действие таких препаратов основано на подавлении всей иммунной системы и пациент остается беззащитным перед различными инфекциями. Полученные антитела связываются с поверхностью Т-лимфоцитов. Т-клетки, присоединившие антитела, расцениваются иммунной системой как чужеродные и в течение часа уничтожаются. В отсутствие Т-клеток отторжение трансплантата прекращается. Во время клинических испытаний с помощью антител удалось прекратить отторжение у 94% пациентов, тогда как с обычными препаратами успех достигается в 75% случаев. Среди пациентов, которым не помогали никакие другие средства, у двух третей антитела позволили сохранить пересаженные почки. Эффективен сравнительно короткий курс лечения антителами. По окончании его Т-клетки вновь появляются на вторые сутки. Так как антитела не действуют на остальные клетки иммунной системы, способность к иммунному ответу не подрывается даже временно.

Радужные голограммы в отличие от обычных можно наблюдать при белом свете

ДЖИРЛ УОЛКЕР

КОГДА голограммы стали доступны для рядового любителя, возникли определенные трудности работы с ними: для того чтобы увидеть изображение, голограмму требовалось освещать монохроматическим светом, например лучом лазера. В белом свете голограммы расплываются, так как лучи одного цвета формируют собственное изображение, несколько сдвинутое относительно изображений, создаваемых другими лучами. Радужные голограммы, способ получения которых был разработан в 1969 г. С. Бентоном

из корпорации Polaroid, предназначались для того, чтобы уменьшить расплывчатость и получать цветные изображения, видимые в белом свете*. Они используются, например, для рекламы модных товаров, а также в качестве мер предосторожности в кредитных карточках.

Я познакомился с этим изобретением

* Метод одноступенчатого получения радужных голограмм, отличный от двухступенчатого метода Бентона, был предложен советскими исследователями (см. библиографию). — Прим. ред.

ем благодаря Д. Хоббсу, который изучал радужные голограммы под руководством Р. Генри из Университета Бакнелла. Полезными оказались также две превосходные книги. Одна из них — «Свет: оптика в природе, фотография, цвет, зрение и голография» (D. Falk, D. Brill, D. Stork «Seeing the Light: Optics in Nature, Photography, Color, Vision and Holography») — рассматривает оптические свойства голограмм и устройства, использующие это явление. Другая — «Руководство по голографии: простые способы изготовления голограмм» (F. Untertseher, J. Hansen, B. Schlesinger "Holography Handbook: Making Holograms the Easy Way») — дает много сведений о том, как изготовить недорогие голограммы разных типов.

Поскольку радужная голограмма, как правило, получается из обычной, разберемся вначале в некоторых важных принципах голографии вообще. Голограмма — это не просто фотография, которая получается с помощью линзы, фокусирующей изо-

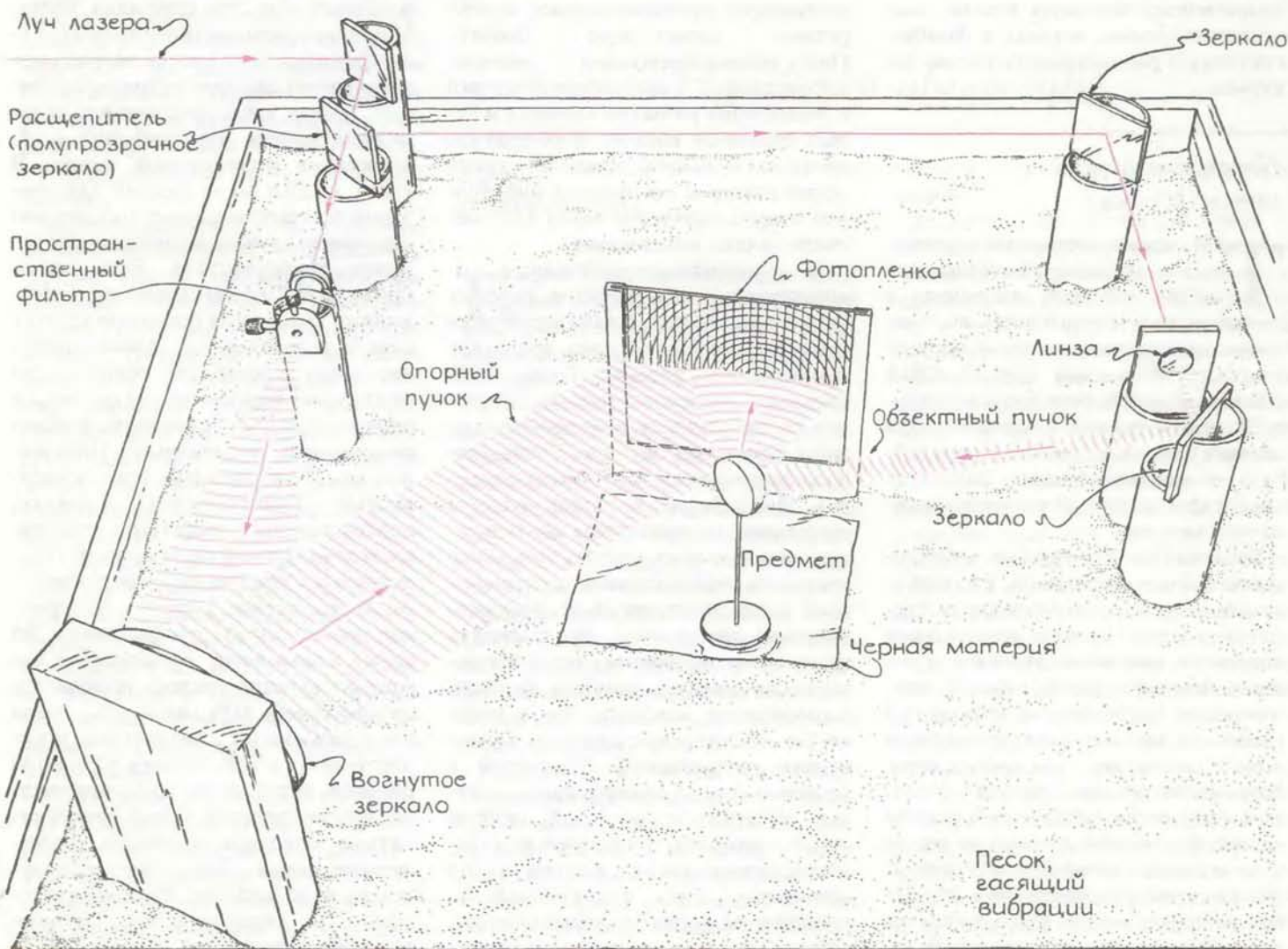


Схема установки для изготовления голограмм

бражение предмета на фотопленку, а фотографическая запись интерференционной картины, создаваемой двумя пучками света, один из которых является отраженным от предмета.

В одном из способов получения голограммы луч лазера расщепляется полупрозрачным зеркалом. Пучок света, прошедший через зеркало, следует далее через пространственный фильтр, который состоит из линзы, фокусирующей свет на маленькое отверстие. Само это отверстие находится в фокусе вогнутого зеркала. В результате отражения луча лазера от зеркала формируется пучок света, называемый опорным. Световые волны в нем плоские: их фронты имеют вид плоскостей, а лучи перпендикулярны волновым фронтам и параллельны друг другу.

Пучок света, отразившийся от частично отражающего зеркала, с помощью системы зеркал направляется на линзу, расширяется и затем отражается от предмета. Этот пучок, называемый объектным, состоит из волн с изогнутыми волновыми фронтами и расходящимися лучами. Если считать для простоты, что предмет представляет собой точку, то отраженные лучи расходятся из этой точки, а волновые фронты представляют собой части сфер, центры которых лежат в этой точке.

Опорный и объектный пучки проходят через фотопленку, где они интерферируют друг с другом. Там, где световые волны усиливают друг друга (ребры и впадины одной волны совпадают соответственно с гребнями и впадинами другой), результирующий яркий свет засвечивает частицы серебра в чувствительном покрытии пленки. Эти участки имеют вид тонких линий. Между ними располагаются другие тонкие линии, где волны ослабляют друг друга (т.е. гребни одной волны совпадают со впадинами другой) и где в результате образуются зоны затемнения. После проявления пленки незасвеченные участки становятся прозрачными, а засвеченные — непрозрачными. Теперь пленка представляет собой голограмму — носитель записи интерференционной картины двух пучков света.

Такую запись можно получить лишь в том случае, если в каждой точке на пленке разность фаз волн в объектном и в опорном пучках постоянна. Если это условие не выполняется, то за время экспозиции падающие на пленку волны попеременно усиливаются и ослабляются друг друга, в результате чего вся пленка оказывается однородно засвеченной и устойчивый рисунок не образуется.

Для того чтобы фазовый сдвиг

между двумя пучками света был постоянным, необходимо использовать когерентное излучение, например излучение лазера. Можно считать, что лазер испускает последовательность длинных волновых пакетов. Каждый из них представляет собой непрерывную волну с регулярным временным ходом и имеет длину, называемую длиной когерентности, обычно равную длине трубки лазера. Когда объектный и опорный пучки достигают пленки, они имеют фиксированный фазовый сдвиг, если являются частями одного и того же пакета волн. Этому условию можно удовлетворить, сделав примерно равными расстояния, которые два пучка проходят до пленки. В таком случае на каждом участке тип интерференции остается постоянным и на пленке записывается единая интерференционная картина.

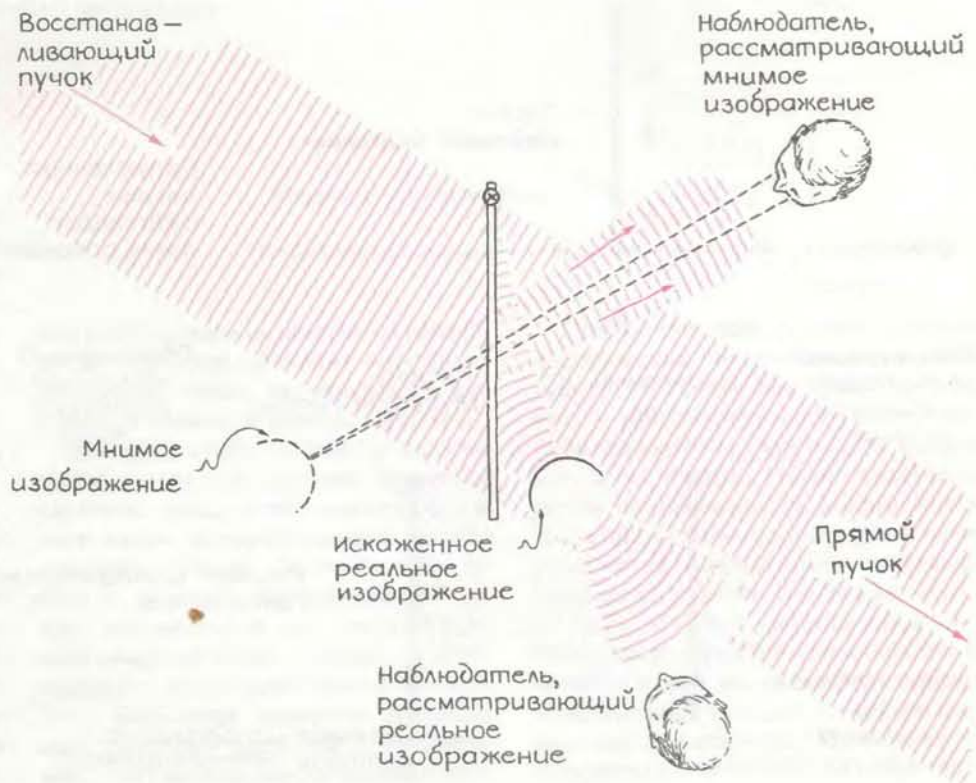
Полученный узор слишком мелок, чтобы его можно было увидеть. Если рассматривать голограмму при комнатном освещении, изображение предмета вы не увидите. И тем не менее особенности предмета на пленке «записаны». Чтобы изображение «проявилось», голограмму освещают лучом лазера (восстанавливающим пучком), идентичным первоначальному опорному пучку. Свет от лазера, проходя через узор линий на голограмме, испытывает дифракцию. В основном свет проходит через пленку, не отклоняясь, но некоторая его часть



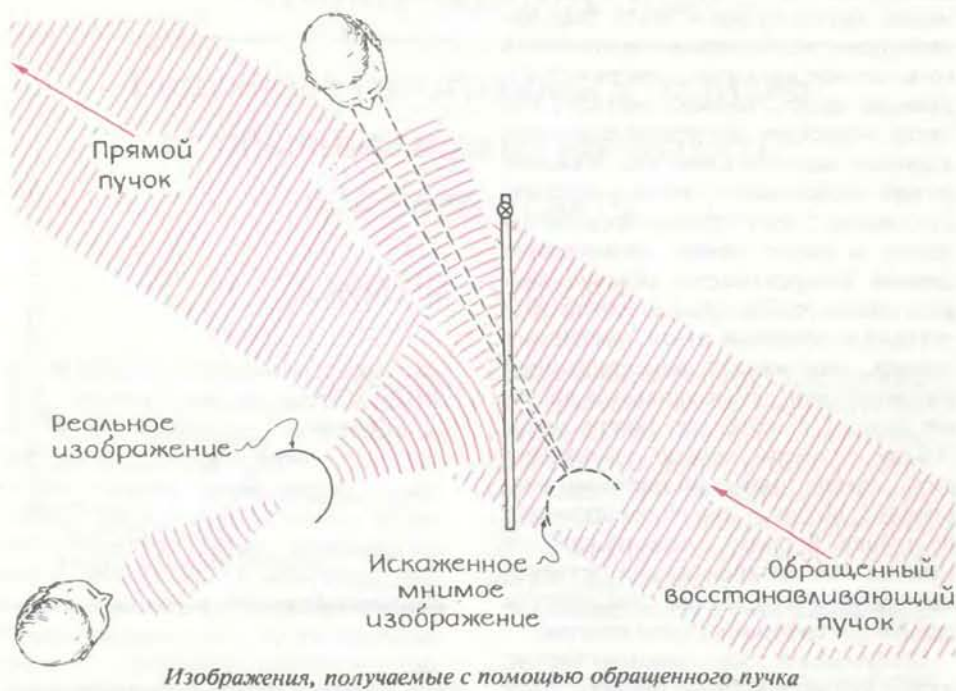
Как интерферируют световые волны

отклоняется в результате дифракции и формирует два новых пучка по обе стороны от прямого пучка.

Если взглянуть на голограмму под таким углом, чтобы в глаза попал любой из этих боковых пучков, можно увидеть изображение предмета. В одном из боковых пучков волны идут от голограммы в тех же направлениях, что и в первоначальном объектном пучке. Проходя через хрусталики, они фокусируются на сетчатке глаз. Поскольку глаза разнесены и воспринимают разные части расходящихся волн,



Что получается, когда восстанавливающий и опорный пучки одинаковы



Изображения, получаемые с помощью обращенного пучка

положения изображений на сетчатке глаз также оказываются разными. Этот эффект называется параллаксом. Зрительная система интерпретирует разницу в положениях изображений предмета как свидетельство того, что источник света лежит по другую сторону голограммы в том месте, где первоначально находился предмет. Зрительная система «экстраполирует» лучи света назад до точки пересечения

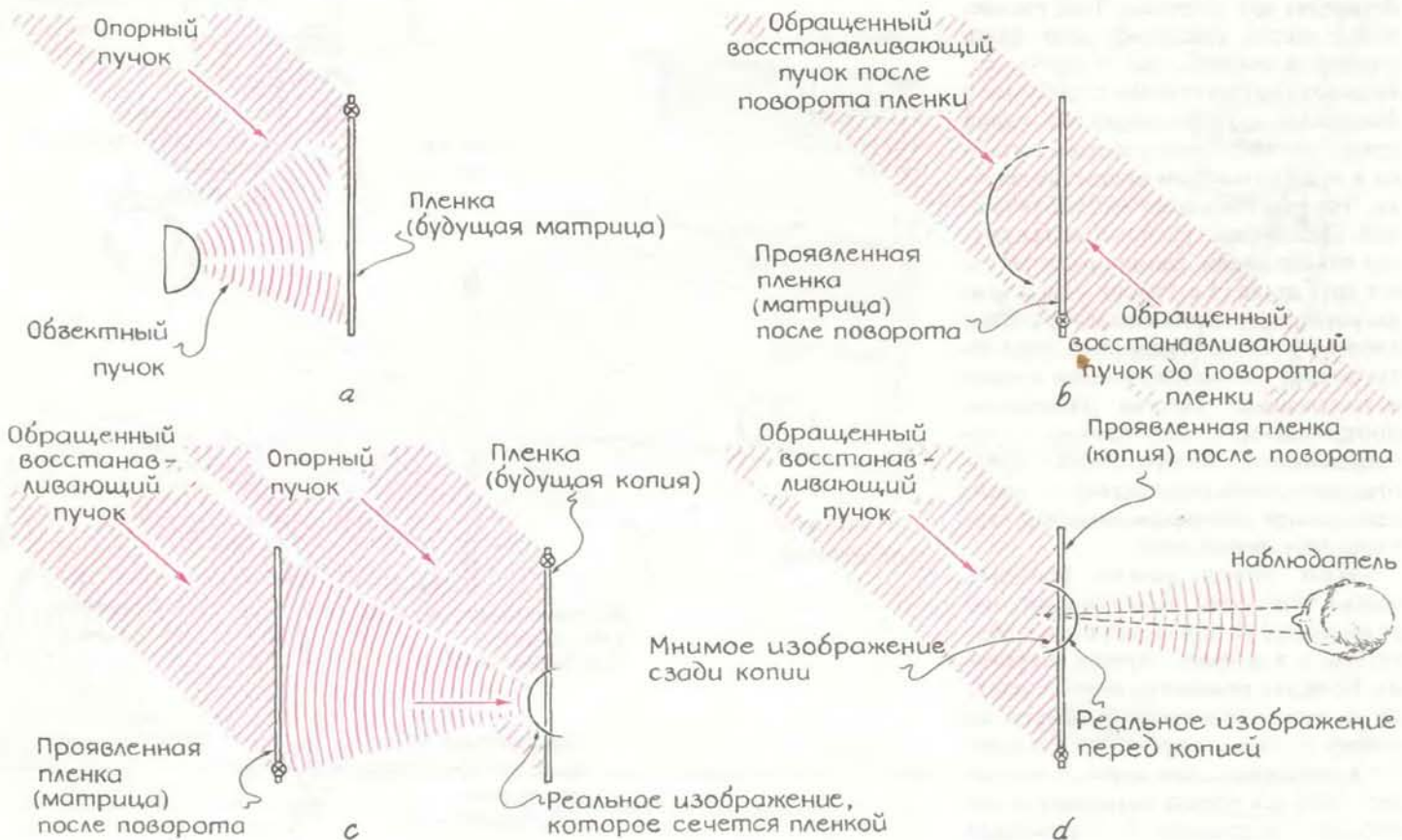
в месте воспринимаемого изображения. Благодаря этому мы воспринимаем глубину сцены. Соответствующее изображение называется мнимым, так как, если поместить белый лист в том месте, где оно, казалось бы, должно находиться, на бумаге ничего не появится. Это изображение — лишь продукт деятельности вашей зрительной системы.

Другой пучок дифрагированного

света состоит из волн, которые сначала сходятся, а затем расходятся. Если в точке схождения лучей поместить лист бумаги, на нем появится изображение предмета. Изображение можно увидеть и в том случае, если свет, расходящийся из этой точки, попадает прямо в глаза. Благодаря параллаксу вы также воспримете изображение как находящееся в определенном месте, на этот раз перед плоскостью голограммы. Как правило, однако, оно сильно искажено и узнать его трудно; более того, при некоторых условиях оно вообще не появляется.

Неискаженное реальное изображение предмета можно получить, если посылать пучок света через голограмму в направлении, обратном направлению первоначального опорного пучка. Говорят, что этот восстанавливающий луч является обращенным по отношению к опорному пучку. Как и прежде, часть света отклоняется за счет дифракции, формируя два боковых пучка, причем один пучок создает реальное, а другой — мнимое изображение предмета. Но на этот раз искажится или пропадет мнимое изображение.

По сути дела, голограмма представляет собой дифракционную решетку. Но если обычная дифракционная решетка состоит из тонких, равноотстоящих параллельных линий, то в голограмме, из-за того что объ-



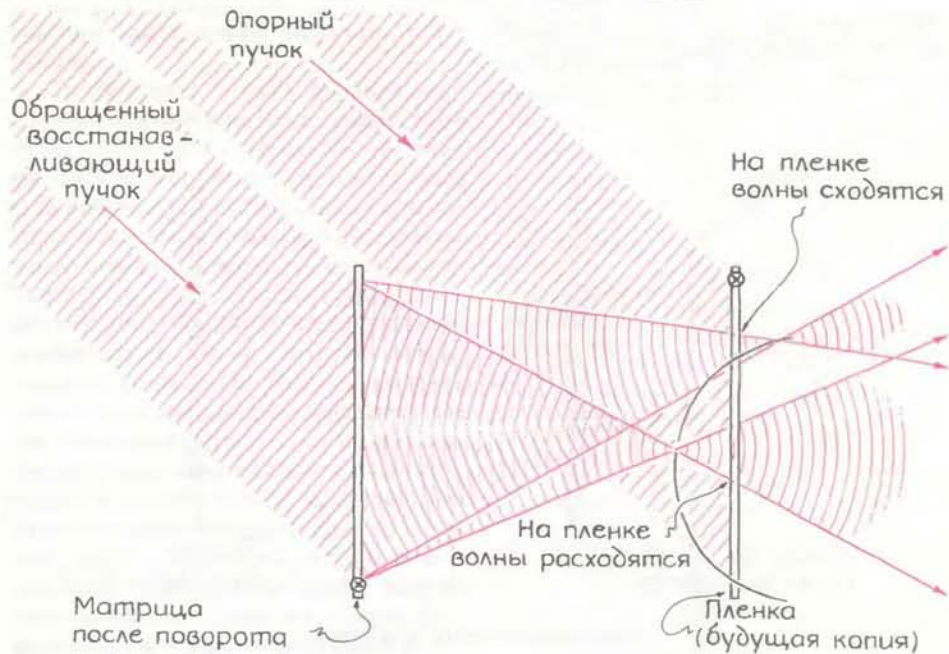
Как изготовить копию матрицы

ектный пучок расходится, расстояние между линиями не постоянно: в данном месте на пленке оно зависит от углов вхождения объектного и опорного пучков, падающих на это место. Если угол мал, линии отстоят друг от друга далеко, и наоборот. Изменение расстояний между линиями является тем фактором, который определяет схождение или расхождение пучков, отклоняющихся в результате дифракции от прямолинейной траектории, когда голограмма освещается восстанавливающим пучком.

Пусть теперь предмет имеет некоторую протяженность, а не является точкой. Каждый элемент его поверхности отражает расходящийся пучок света в направлении пленки и все они интерферируют на пленке с опорным пучком. Интерференционная картина, регистрируемая теперь на пленке, очень сложна. И тем не менее, когда восстанавливающий пучок посылается через проявленную пленку вдоль траектории опорного пучка или обращенного по отношению к опорному, в результате дифракции образуются боковые пучки. Два из них обеспечивают неискаженные изображения предмета. Если один из пучков попадает в глаза, то благодаря параллаксу вы видите трехмерное изображение предмета. Если менять угол зрения, оставаясь в пределах пучка, в глаза будут попадать различные участки волн и предмет будет видим как бы с разных сторон. Эта особенность позволяет наблюдать предмет спереди и сбоку (при изменении угла зрения) так, как если бы вы рассматривали реальный объект. (В этом варианте опыта не удастся увидеть заднюю сторону предмета, так как лучи с задней стороны на пленку не попадают.)

Неискаженное реальное изображение, создаваемое обращенным восстанавливающим пучком, можно получить на листе бумаги. Правда, оно размыто, так как в каждом месте на листе лишь отдельные части изображения находятся в фокусе. Если направить лучи в глаза, изображение будет воспринято в обратной перспективе. Например, передняя поверхность предмета кажется более далекой, чем боковые, как будто предмет «вывернут наизнанку».

Это изображение, называемое псевдоскопическим, представляет интерес для эксперимента, в котором из первой голограммы изготавливается вторая. Такая техника называется голографией сфокусированных изображений или голографией в плоскости изображения, так как голограмма-копия помещается в то место, где первая голограмма (матрица) создает реальное изображение. Напомним, что реаль-



Картина волн в случае, когда пленка попадает на реальное изображение

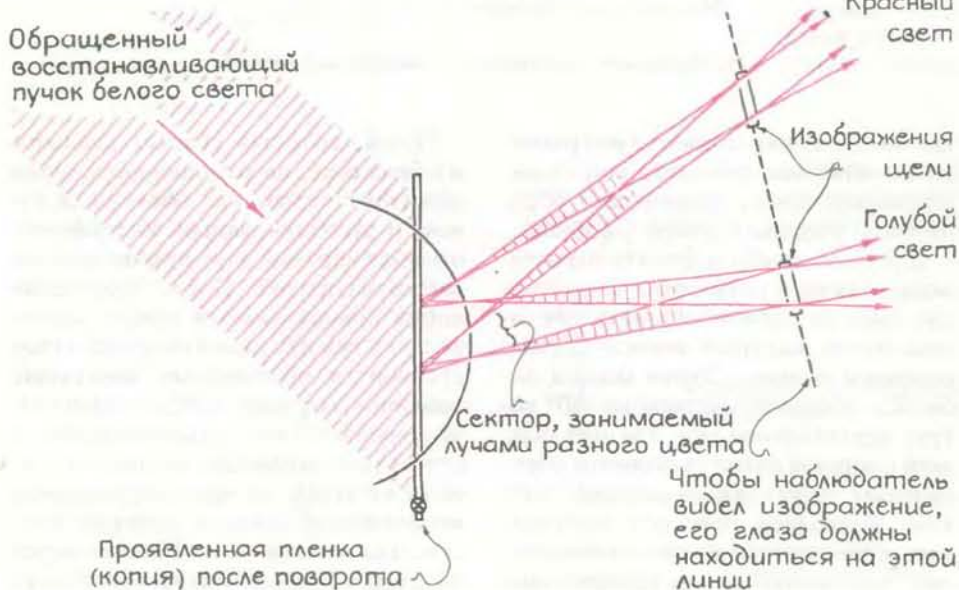
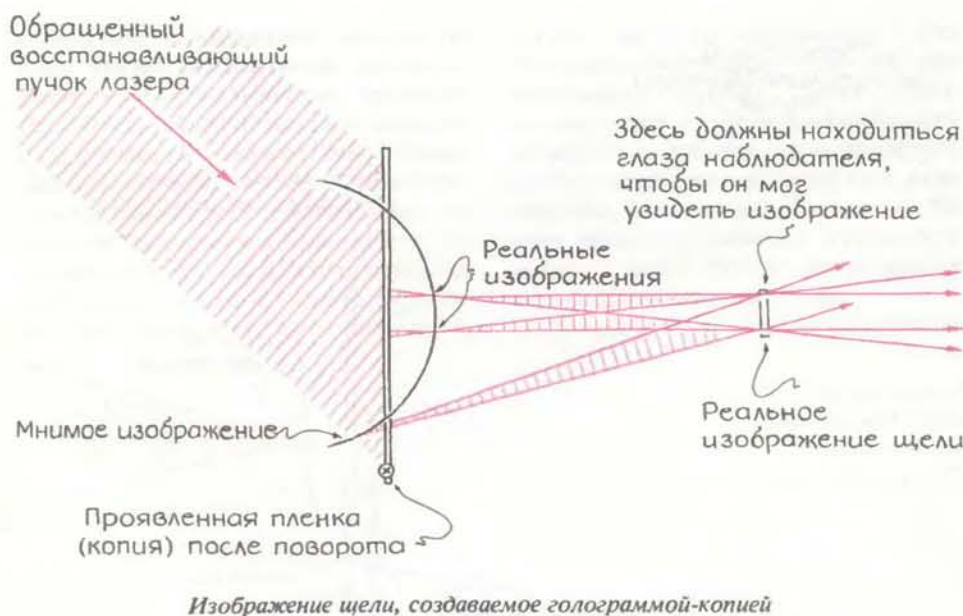
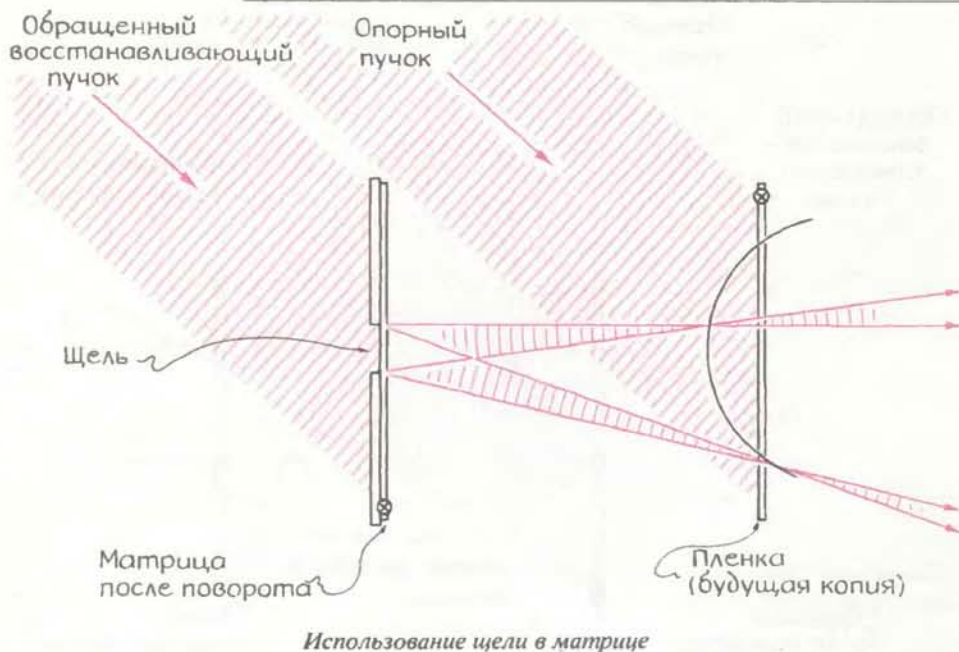


Изображение, создаваемое голограммой-копией

ное изображение создается матрицей, когда через нее проходит восстанавливающий пучок, являющийся обращенным опорным пучком матрицы.

Для того чтобы избежать перестановки лазера и оптических элементов системы, лучше использовать тот самый пучок, который вначале служил опорным пучком. Этого можно добиться, повернув матрицу на 180° вокруг вертикальной оси, так что бывший опорный пучок становится обращенным восстанавливающим пучком. Благодаря повороту матрицы свет проходит через нее в направлении, противоположном направлению распространения первоначального опорного пучка.

Пучок, который создает реальное изображение, по отношению к копии действует теперь как объектный пучок, и результирующая интерференционная картина двух пучков записывается на пленке. После проявления копия поворачивается вокруг вертикальной оси и бывший опорный пучок становится обращенным восстанавливающим пучком. Когда в ваши глаза попадает свет, отклонившийся в результате дифракции на копии от основного пучка, вы видите трехмерное изображение, которое «сечется» плоскостью голограммы. Причем перед плоскостью находится реальная часть изображения, а за плоскостью — мнимая.



Изображение формируется следующим образом. Свет, идущий от матрицы к копии, сходится и создает реальное трехмерное изображение, в котором пленка-копия делает двумерный «срез». Лучи, которые создают изображение передней поверхности предмета, сходятся перед пленкой. Пройдя через пленку, они расходятся. Лучи, которые создают изображения боковых сторон предмета, сходятся за пленкой. Интерференция между этими двумя группами лучей и опорным пучком несет запись о схождении и расхождении лучей.

После проявления пленки-копии через нее нужно пропустить обращенный пучок, и тогда в результате дифракции распространение лучей во время экспозиции изменится на обратное: там, где лучи сошлись, они будут расходиться, и наоборот. Когда эти лучи попадают в глаза, реальное изображение передней поверхности предмета вы видите перед копией, а мнимые изображения его сторон — сзади копии. Хотя реальное изображение, создаваемое матрицей, является псевдоскопическим, результирующее изображение имеет нормальную перспективу.

Если вместо монохроматического света лазера через копию проходит белый свет, составляющие его лучи разного цвета отклоняются в результате дифракции на разные углы, так что каждый из них создает свое изображение. Наложение многих окрашенных изображений приводит к расплыванию составного изображения. Бентон нашел способ, как наблюдать четкие изображения при освещении копии белым светом. То, что получается, называется радужной голограммой из-за яркой окраски изображений.

Для получения радужной голограммы, восстанавливающим пучком надо освещать лишь узкую полоску матрицы. Хотя информация о глубине пространства в направлении, перпендикулярном полоске, теряется, информация о глубине в направлении, параллельном полоске, сохраняется. Итак, радужная голограмма представляет своего рода компромисс: в одном направлении параллакс устраняется и изображение можно видеть в белом свете без искажений.

В одном варианте опыта закрывается вся матрица, за исключением пересекающей ее узкой полоски (в голограмме как бы оставляется щель). Верхний рисунок слева соответствует случаю, когда щель вертикальна. Информация о предмете, обеспечиваемая параллаксом, сохраняется в вертикальном направлении, но теряется в горизонтальном. Информация о

Издательство МИР предлагает:

ХРОМАТОГРАФИЯ

Практическое приложение
метода.

В двух частях.

Под редакцией Э. Хефтмана
Перевод с английского

Книга посвящена хроматографии — важнейшему современному аналитическому методу, который широко используется в научных исследованиях и в промышленности для контроля и управления технологическими процессами. В практическом аспекте рассматриваются все основные хроматографические методы: жидкостная, плоскостная, газовая, ионообменная хроматография, гель-хроматография, электрофорез.

Книге предпослано предисловие-рекомендация лауреата Нобелевской премии Г. Сиборга.

Для специалистов в области химии, биохимии, медицины, фармацевтической промышленности, для служб по охране окружающей среды.

Из отзыва профессора В.Г. Березкина: «Быстрое развитие хроматографических методов приводит к существенному изменению используемых на практике методов и к изменению методик, применяемых в анализе химических соединений определенного класса. Поэтому для аналитика-хроматографиста, пожалуй, в большей мере, чем для работающего в другой области аналитической химии, необходимо внимательно следить за появлением и практическим использованием новых методов и аналитических приемов в хроматографии. Ценную помощь в этом направлении хроматографисту могут оказать монографии, в которых рассматривается как современное состояние метода, так и его приложение к важнейшим классам химических соединений. Данная монография, вышедшая в издательстве «Эльзевир» четвертым изданием, полностью отвечает этим задачам».

1986, 54 л. Цена комплекта 3 р.60 к.



ширине щели также записывается в копии.

Проявленная пленка рассматривается в отраженном луче лазера. (И в этом случае, для того чтобы луч лазера, который служил опорным пучком для копии, стал отраженным восстанавливающим пучком, копию необходимо повернуть вокруг вертикальной оси.) Лучи света, распространяющиеся от копии, проходят через реальное изображение щели, которое лежит впереди копии. (На среднем рисунке слева реальное изображение щели как бы протыкает страницу.) Изображение предмета можно видеть, если хрусталики глаз попадают на любой участок изображения щели. Двигая головой так, чтобы глаза оставались в пределах изображения щели, можно видеть предмет с разных сторон. Информация о глубине пространства сохраняется в направлении вдоль изображения щели (в данном случае в вертикальном направлении). Если вывести глаза из области этого изображения, изображение предмета исчезнет. Информация о глубине пространства теряется вдоль направления, перпендикулярного изображению щели.

Когда белый свет проходит через проявленную фотопленку-копию, лучи разных цветов благодаря дифракции отклоняются на разные углы, так что каждый из них создает изображение щели в определенном месте перед голограммой. Если встать так, чтобы глаза находились в том же месте, что и изображение щели, создаваемое красным светом, изображение предмета окажется красным. Движения головы, при которых глаза пересекают другие окрашенные изображения щели, приводят к тому, что изображение предмета непрерывно меняет свой цвет. Отойдя слишком далеко или подойдя слишком близко к голограмме, вы увидите, что изображение предмета расплывается: этот эффект вызывается наложением лучей, прошедших через разные участки изображения щели.

Хоббс испробовал несколько способов получения и рассматривания радужной голограммы. Предполагая, что она будет стоять вертикально в падающем сверху под углом свете, он решил при изготовлении матрицы положить предмет на бок. Проявив копию, он повернул ее так, чтобы падающий сверху под углом свет оказался отраженным по отношению к опорному пучку, который падал на копию во время экспозиции пленки. Благодаря этой процедуре вершина предмета появилась на вершине голограммы.

Хоббс так организовал опыт, что

Опорный пучок падает под наклоном сверху на заднюю сторону копии

При смещении глаз изображение меняет окраску



Смещая глаза, можно видеть изображение как бы с разных сторон

Где появляются цветные изображения

нии, примерно перпендикулярной плоскости копии. Поскольку зеленый свет приходится на среднюю часть видимого спектра, лучи, формирующие зеленое изображение щели, и должны представлять эту перпендикулярную линию. Смещая глаза вверх и одновременно приближая их к голограмме, можно видеть, как появляется красное изображение. Смещение глаз вниз и одновременно дальше от голограммы приводит к появлению голубого изображения.

Хоббс рассчитал, что если зеленые лучи выходят из копии под прямым углом после падения на нее под углом 45° , расстояние между линиями на голограмме должно составлять около $0,78 \text{ мкм}$. (Это число и другие числа, приведенные ниже, носят лишь прикладной характер. На самом же деле в сложном узоре линий расстояния между ними образуют целый спектр значений.) При таком расстоянии между линиями красные лучи (с длиной волны $0,7 \text{ мкм}$) в результате дифракции отклоняются на 11° от зеленых лучей в одну сторону, а голубые (с длиной волны $0,4 \text{ мкм}$) — на 11° в другую сторону. Лучи промежуточных цветов отклоняются на углы, значения которых заключены между этими крайними значениями. Всевозможные изображения щели заполняют сектор с углом около 22° .

Хоббс оценил и расстояние между копией и глазами наблюдателя. Если зеленое изображение щели находится на расстоянии 35 см от копии, то красное изображение удалено на 28 см , а голубое — на 48 см . При таких рас-

стояниях рассматривать изображение довольно удобно.

Интервалы между линиями на копии зависят от длины волны света, использованного при изготовлении копии, и от угла между опорным пучком и объектным пучком (идушим от щели на матрице), который освещает копию. Если для создания копии с характерным расстоянием между линиями 0,78 мкм используется гелий-неоновый лазер (с длиной волны 0,63 мкм), угол между пучками должен быть равен около 54°.

Хоббс размышлял также над тем, какой источник света мог бы создавать восстанавливающий пучок. Если этот источник — солнце, то пучок состоит из почти плоских волн. Поскольку он должен быть обращен по отношению к опорному пучку, ис-

пользуемому при изготовлении копии, последний также должен состоять из плоских волн. Если же в качестве источника берется лампа накаливания, восстанавливающий пучок состоит из расходящихся лучей. Образующий пучок состоит из сходящихся лучей, поэтому из таких же лучей должен состоять и опорный пучок.

Целый ряд советов по созданию радужных голограмм можно найти в книге «Руководство по голографии». В ней описано, например, как сконцентрировать свет на щель в матрице. Для этого надо использовать цилиндрическую линзу, сделанную из пробырки, наполненной глицерином. С помощью такой линзы можно обойтись без матрицы: линза фокусирует узкое реальное изображение предмета прямо на копию.

Единственная отрадная тенденция — на 10% сократилось курение. Почти во всех обследованных группах населения стали курить меньше, чем в 1977 г. Но это сокращение четко коррелирует с уровнем жизни (доходами и образованием) и, кроме того, для женщин оно меньше, чем для мужчин.

Наиболее печальное явление — рост потребления алкоголя. По данным опроса, число тех, кто «опрокидывает стаканчик» в среднем 5 и более раз за день, увеличилось на 28%. В 1983 г. потребление алкоголя оказалось больше в группах населения с высокими доходами и высоким уровнем образования.

Из числа людей, охваченных обследованием 1983 г., 16% сообщили, что их вес на 30% и более превышает общепринятую норму. Отсюда следует, что распространенность тучности возросла на 10%. В группах населения с самыми низкими доходами и уровнем образования вероятность чрезмерной упитанности вдвое выше, чем в группах наивысшего уровня жизни.

Как ни странно, число тех, кто считает себя физически менее активным, чем окружающие, возросло на 12%. Особенно эта тенденция выражена среди женщин, среди людей возрастом 20-34 года и в группах с высокими доходами и уровнем образования. Возможно, на мнение опрошенных повлияло то, что сейчас в последнее время появляется все больше клубов здоровья и на улицах можно видеть все больше любителей бега трусцой.

Недосыпание также увеличивается: на 17% больше женщин и на 7% больше мужчин спят менее 6 ч в сутки. Сколько спит человек, тоже зависит от уровня жизни: среди людей с высокими доходами и высоким уровнем образования гораздо меньшая доля недосыпает.

Золушкин труд автоматизирован

БИОТЕХНОЛОГИЯ получила новое автоматизированное «средство производства» — снабженный ЭВМ прибор для определения нуклеотидной последовательности клонированных генов. Он разработан в лаборатории Л. Худа в Калифорнийском технологическом институте, а его производство и продажу осуществляет компания Applied Biosystems Inc.

Генетическая информация закодирована в ДНК в виде последовательности нуклеотидов; ясно, что освоение методов быстрого секвенирования (т. е. определения последовательности нуклеотидов) — одна из важ-

Наука и общество

Новые весы

МАССА — это фундаментальное свойство вещества. Обычно масса объекта определяется путем взвешивания его в гравитационном поле, для чего используются аналитические весы или безмен. Для вычисления массы измеренный вес делят на напряженность гравитационного поля. Недавно разработан прибор, который позволяет определять массы мельчайших частиц, не обращая за помощью к гравитации. Он особенно полезен для измерения масс газообразных частиц.

Прибор состоит из конусообразной трубки, сделанной из специального стекла. Широкий конец трубки подсоединен к вакуумному насосу, на узкий конец надет фильтр. Узкий конец трубки заставляют колебаться. Эти колебания, подобно колебаниям камертона, имеют вполне определенную частоту. При включении вакуумного насоса частицы, массу которых надо измерить, засасываются в фильтр и задерживаются в нем. По мере накопления частиц колебания изменяются. Определив изменение частоты колебаний, можно рассчитать массу накопленных частиц.

Прибор изобретен Г. Паташником и Г. Рупрехтом и поставляется на рынок принадлежащей изобретателям компанией. Ожидается, что новое устройство найдет многочисленные

применения. Его уже используют для проверки выхлопов дизелей и турбин, а также для контроля дыма, выделяемого горящими материалами. В будущем с помощью новых весов можно будет измерять содержание углерода в выбросах тепловых электростанций и с беспрецедентной точностью определять массы частиц, из которых состоят хвосты комет.

Нездоровые привычки

ХОРОШЕЕ здоровье и низкая смертность населения непосредственно связаны с семью добрыми правилами образа жизни: не курить, не злоупотреблять спиртными напитками, следить за своим весом, заниматься физкультурой, спать по 7-8 ч в сутки, завтракать и не перекусывать между основными приемами пищи. Это со всей очевидностью явствовало из результатов проведенного несколько лет назад обследования постоянных жителей графства Аламеда, шт. Калифорния. Но американцы не вняли мудрым советам. И что же? Обследование в масштабах всей страны, осуществленное Национальным центром статистики здравоохранения, показало, что в США в 1983 г. по сравнению с 1977 г. пьют и весят больше, а сну и физическим упражнениям уделяют времени меньше.

нейших задач молекулярной биологии. За последние десять лет разработано два мощных метода секвенирования ДНК, однако они включают радиоавтографию и требуют немало времени и труда. Автоматический секвенатор продлевает анализ за гораздо более приемлемое время, освобождая при этом от необходимости использовать радиоактивные изотопы.

В основу работы автоматического секвенатора положен известный метод, предложенный Ф. Сэнгером из Кембриджского университета. Он состоит в следующем. ДНК представляет собой цепочку из нуклеотидов четырех видов (каждый нуклеотид содержит одно из четырех оснований — аденин [A], гуанин [G], цитозин [C] либо тимин [T]). Для секвенирования проводят репликацию анализируемой цепи ДНК таким образом, что получаются четыре набора фрагментов, меченных радиоактивным изотопом. В наборе все фрагменты оканчиваются одинаковым нуклеотидом и каждый следующий фрагмент на один нуклеотид длиннее предыдущего. Наборы фрагментов наносят по отдельности на четыре параллельные колонки, заполненные гелем, и помещают одновременно в электрическое поле. Под действием поля фрагменты движутся сквозь гель; чем короче фрагмент, тем скорее он перемещается, в результате чего фрагменты ДНК разделяются по размеру. Если на гель наложить рентгеновскую пленку, то на ней появятся темные полосы, соответствующие фрагментам различной длины. Порядок полос в четырех колонках геля несет информацию о последовательности исходной цепи ДНК.

В своей статье, опубликованной в журнале "Nature", исследователи из Калифорнийского технологического института описывают, как они модифицировали этот метод, приспособив его для автоматического секвенирования. Для этого наборы фрагментов ДНК подвергают химической обработке, в результате которой каждый из четырех наборов оказывается помеченным определенным флуоресцентным красителем: фрагменты, оканчивающиеся на А — зеленым, на С — желто-зеленым, на Т — красным и на G — оранжевым. Смесь всех фрагментов наносят на одну длинную колонку с гелем. Внизу колонка просвечивается лучом аргонового лазера, и излучение от каждой флуоресцирующей молекулы попадает на фотоумножитель, электрические сигналы с которого передаются в компьютер. Компьютер распознает «цвет» каждого сигнала и таким образом устанавливает последовательность ДНК.

Дентохронология и история Америки

КОГДА появились первые люди на американском континенте и откуда они пришли? К. Тёрнер II из Аризонского университета попытался найти ответ на эту давнюю загадку с помощью нового метода, называемого дентохронологией, который позволяет установить время, когда происходило генетическое разделение отдельных популяций людей на основе детального изучения формы их зубов. Метод заключается в статистическом анализе результатов нескольких тысяч измерений. Это один из новых методов антропологии, рассчитанных на использование ЭВМ.

Как сообщает Тёрнер в статье, опубликованной в журнале «Science», первый этап исследований заключался в составлении перечня особенностей, характерных для всех 34 зубов, (например, число острых выступов на коренных зубах), которые хорошо выражены у скелетов, доступны наблюдению и предположительно являются наследственными признаками. Затем он собрал данные об этих особенностях для более чем 10 тыс. остатков человеческого скелетов. Для каждой пары популяций, отличие которых предстояло изучить, все данные оценивались по одному усредненному показателю расхождений — MMD (mean measure of divergence).

Поскольку показатель MMD является мерой относительной схожести двух популяций, дентохронология позволяет получить сведения об их общих предках. Например, общепризнанным является факт, что американские индейцы пришли из Азии: так как MMD для пары «американские индейцы — северо-восточные азиаты» меньше, чем для пары «индейцы — юго-восточные азиаты», Тёрнеру удалось более точно доказать, что их родительская популяция населяла северную часть Китая и Монголию.

В результате непрерывной эволюции формы зубов у всех популяций наблюдается соответствие между величиной MMD той или иной пары и длительностью временных промежутков, независимые оценки которых указывают на то, что группы разделились. Американские индейцы, например, отделились от своей родительской популяции (MMD = 0,14) на протяжении более длительного времени, чем тихоокеанские полинезийцы от своих предков (MMD = 0,04).

Для того чтобы определить абсолютные даты этих генетических разделений, необходимо отыскать

средства калибровки, т. е. способ независимого отсчета времени. Тёрнер делает это путем расчета средней скорости, с которой характеристики зубов эволюционировали повсюду в мире, за исключением двух сравниваемых популяций. Затем он делит эту скорость изменения на величину MMD для двух данных популяций — меру различия особенностей формы их зубов. В результате получается число лет, в течение которых данная пара популяций эволюционировала независимо друг от друга.

Результаты своих дентохронологических исследований Тёрнер опубликовал в журнале «National Geographic Research». В статье сообщается, что американских индейцев можно разделить на три группы. Входящие в них индейцы произошли от предков, населявших когда-то северную часть Китая. Они ушли из Китая примерно 20 тыс. лет назад как географически изолированные группы охотников и рыболовов и продвигались различными путями к Аляске через Берингов пролив. Гонимые изменениями природных условий, некоторые группы продолжали двигаться дальше на юг; они-то и были первыми палеоиндейцами, поселившимися на юго-западе нынешней территории США около 12 тыс. лет назад — дата, сопоставимая со многими другими независимыми оценками.

Некоторые данные свидетельствуют о более ранних сроках появления первых поселений в Новом Свете. Совсем недавно группа французских ученых, проводившая раскопки в одной из пещер на территории Бразилии, сообщила в журнале «Nature», что радиоуглеродная датировка древесного угля, а также найденные каменные изделия указывают на то, что люди жили в Южной Америке по крайней мере 32 тыс. лет назад. Тёрнер подвергает сомнению этот вывод. Он считает, что, прежде чем согласиться с ним, необходимо установить, как предметы, обнаруженные французскими исследователями, оказались в пещере. «Археология пещер в действительности обманчива» — заявляет Тёрнер. Каменные изделия могут быть кусками породы, обтесанными потоком воды, а древесный уголь — остатками лесного пожара. Другими словами, найденный уголь действительно может иметь возраст 32 тыс. лет, но Тёрнер не видит оснований считать, что этот уголь и камни связаны с деятельностью людей.

Занимательный компьютер

Программы, генерирующие узоры для обоев

А. К. ДЬЮДНИ

ОБЫЧНЫЕ обои печатаются вращающимся цилиндром, на котором выгравирован узор. При каждом обороте цилиндра отпечатывается одно и то же изображение. А вот компьютер может воспроизводить затейливые узоры, которые я называю «обоями для ума» и которые, вообще говоря, не повторяются или во всяком случае повторяются не полностью. Изображение все время проявляется в новых конфигурациях, слева и справа, внизу и вверху. Интересно понаблюдать за тем, что изменяется и что сохраняется от одной картинки к другой.

Цветные образчики в моей коллекции демонстрируют результаты, полученные с использованием трех существенно различающихся методов. Компьютерные программы, при помощи которых были получены изображения, не одинаковы по сложности — среди них есть и простые, и не очень сложные. Они принадлежат трем нашим читателям: Дж. Коннету из Миннесотского университета, Б. Мартину из Бирмингема (Англия) и Т. Смиты из Эсседона (Австралия).

Программа Коннета основана на окружности, но в ее причудливых узорах проступают и квадраты. Ввиду ее двойственной природы мне пришлось назвать ее CIRCLE² (КРУГ²). В нескольких словах, в ней применяется формула окружности $x^2 + y^2$, для того чтобы придать тот или иной цвет точке с координатами x и y . Подробности я опишу ниже. А пока замечу, возможно, к вашему удивлению (а поначалу и к моему), что в обоях подобного рода таится нечто большее, чем множество концентрических окружностей: по мере того как вы отходите назад от стены, все более отчетливо могут проступать на ней изящные структуры квадратной формы (см. рисунки на с. 93).

Наверное, не стоит удивляться тому, что программа CIRCLE² родилась под влиянием множества Мандельброта, о чем речь шла в октябрьском номере нашего журнала за 1985 г. Открытие этого множества принадлежит Б. Мандельброту из исследовательского центра Томаса Уотсона фирмы IBM. Богатство формы и красок в графическом изображе-

нии множеств Мандельброта основано на единственной математической функции, применяющейся повторно к собственному результату для каждого комплексного числа из заданной области на плоскости. Всякий раз, когда итерируемое значение функции достигает абсолютного значения 2, количество итераций, необходимых для достижения этого значения, определяет цвет соответствующей точки.

Коннет не располагает цветным монитором, поэтому он решил поставить черный цвет в соответствие точкам, для которых абсолютная величина достигает 2 после четного числа итераций, и белый — точкам, для которых количество итераций нечетно. Таким образом, Коннету удалось получить достаточно хорошие изображения множества Мандельброта, но он этим не удовлетворился и занялся исследованием других формул. В конце концов он остановился на формуле $x^2 + y^2$ и отказался от итераций. Его программа систематически сканирует решетчатую область на плоскости. Для каждой точки (x, y) она вычисляет значение формулы и выделяет целую часть из полученного результата. Если это целое число оказывается четным, точка (x, y) окрашивается в черный цвет, если нечетным, то в белый (остается неокрашенной).

Боюсь, что я уже потерял половину своей аудитории. Читатели, наверное, поняли, как устроена программа, и бросились к своим компьютерам, чтобы ввести ее в память машины. Конечно же, программа очень проста. В алгоритмической записи программа CIRCLE² состоит из секции ввода, за которой следует двойной цикл:

```
input corna, cornb
input side
for i - 1 to 100
for j - 1 to 100
  x ← corna + (side × i/100)
  y ← cornb + (side × j/100)
  z ← x2 + y2
  c ← int(z)
  if c is even, then plot (i, j)
```

Сначала программа ждет ввода координат (*corna*, *cornb*) левого нижнего угла исследуемого квадрата. Переменная *side* представляет длину сто-

роны этого квадрата. Например, если ввести значения — 15 и — 20 в качестве координат левого нижнего угла квадрата и 87 как длину его стороны, то программа изобразит массив точек 100 × 100, заключенный в квадратной области со стороной 87 единиц, левый нижний угол которой будет находиться в точке с координатами (— 15, — 20). В моей версии программы индексы циклов пробегают значения от 1 до 100, однако эти пределы следует выбирать таким образом, чтобы квадрат лежал в пределах экрана того монитора, которым вы располагаете. На моем мониторе при выбранных предельных значениях квадрат получается довольно маленьким.

Двойной цикл проходит через квадратную решетку и для каждой пары индексов (i, j) вычисляет координаты точки (x, y) , которой соответствует эта пара. Затем в теле цикла x и y возводятся в квадрат, сумма полученных квадратов присваивается переменной z и из этого значения извлекается целая часть. Наибольшее значение целого числа, большее или равное сумме квадратов x и y , хранится как значение переменной c . Если c делится на 2, то точка (x, y) высвечивается на экране в виде цветного элемента изображения или как темная точка при выводе картинки на печатающее устройство. Если значение переменной c оказывается нечетным, то соответствующая точка не высвечивается или не печатается.

Читателям, которые пожелаю воспроизвести обои Коннета, не следует думать о том, правильно ли они поняли, каким цветом нужно изображать «четные» и «нечетные» точки. Большинство рисунков не утрачивают свою красоту при выборе любых цветов. На самом деле количество цветов может быть больше двух. Вместо того чтобы определять, четно или нечетно значение переменной c , его можно делить на число, соответствующее количеству цветов, которым вы располагаете. Тогда величина остатка от деления будет определять тот или иной цвет. Например, чтобы получить изображения, приведенные на с. 93, были выбраны соответственно два цвета для верхнего узора, три для среднего и четыре для нижнего.

Чем меньше исследуемый квадрат, тем плоскость кажется наблюдателю ближе и тем сильнее «увеличение», под которым рассматривает изображение программа CIRCLE². Однако в отличие от процедуры раскрашивания окрестности множества Мандельброта программа Коннета не содержит в себе бесконечной регрессии все уменьшающихся узоров. При боль-

шом увеличении в окрестности начала координат (0, 0) появляется семейство концентрических окружностей. При еще большем увеличении в середине экрана возникает черный диск; целая часть суммы квадратов координат для каждой точки диска равна нулю. Затем уже весь экран становится темным.

Обои Коннета выглядят значительно интереснее при уменьшении увеличения, когда вы как бы отходите от стены. Концентрические круги будто растворяются в замысловатом узоре первичных и вторичных окружностей, напоминающих муаровые кружева. По мере снижения степени увеличения, как по мановению волшебной палочки, появляются все новые и новые отличающиеся от предыдущих узоры. Может быть, здесь все же скрывается бесконечная регрессия? Я уверен, что читатели сумеют понять, в чем тут дело, а через три месяца я опубликую наиболее интересные ответы.

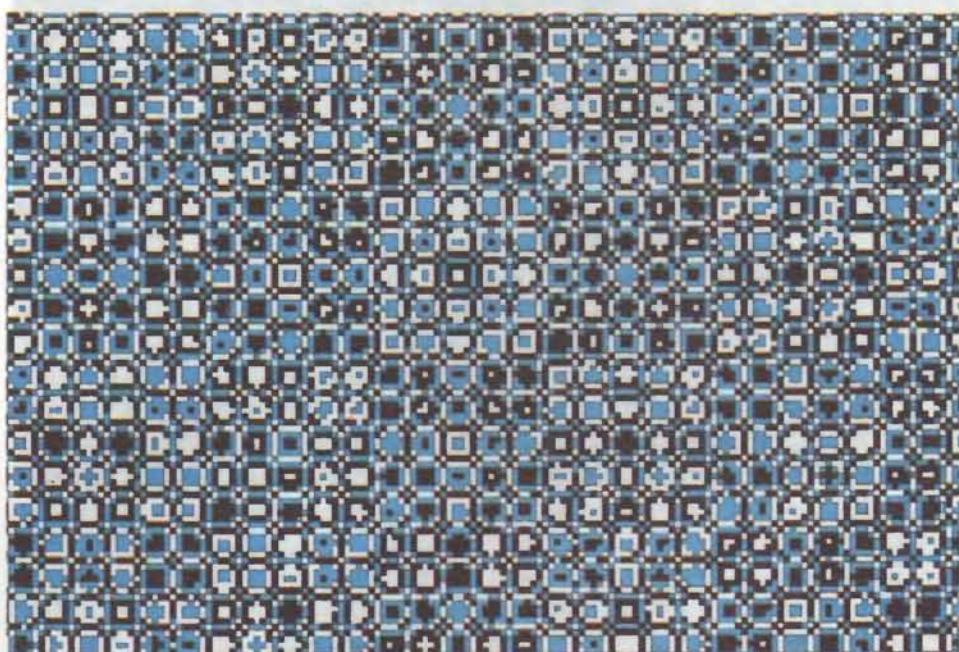
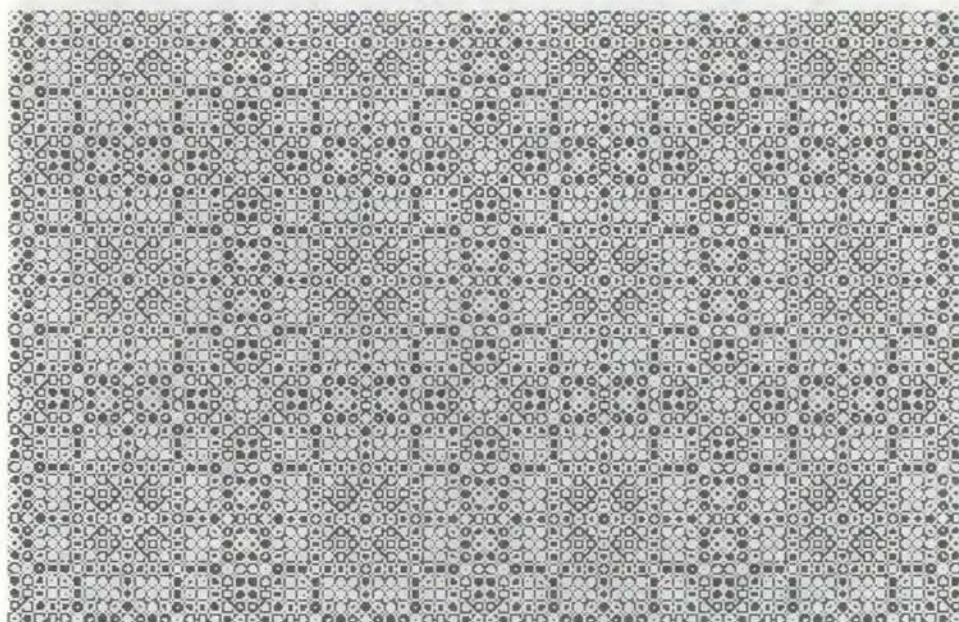
Б. Мартин из Астонского университета в Бирмингеме был также вдохновлен свойствами множества Мандельброта. Он принял на вооружение идею Мандельброта итерировать формулу от начального числового значения — зародыша, но на этом сходство их методов заканчивается. В то время как узоры Мандельброта возникают из комплексных чисел, обои Мартина основаны на итерациях, применяемых к обычным действительным числам. Более того, числовые зародыши для множества Мандельброта представляют собой бесчисленные точки, принадлежащие заданной области на плоскости, а программа Мартина выращивает свои узоры из одного-единственного зародыша.

Мартин предлагает, например, следующие две формулы, которые могут породить потрясающие, отличающиеся довольно сложным узором изображения (см. фото на обложке журнала, а также рисунки на с. 94, 95 и 96):

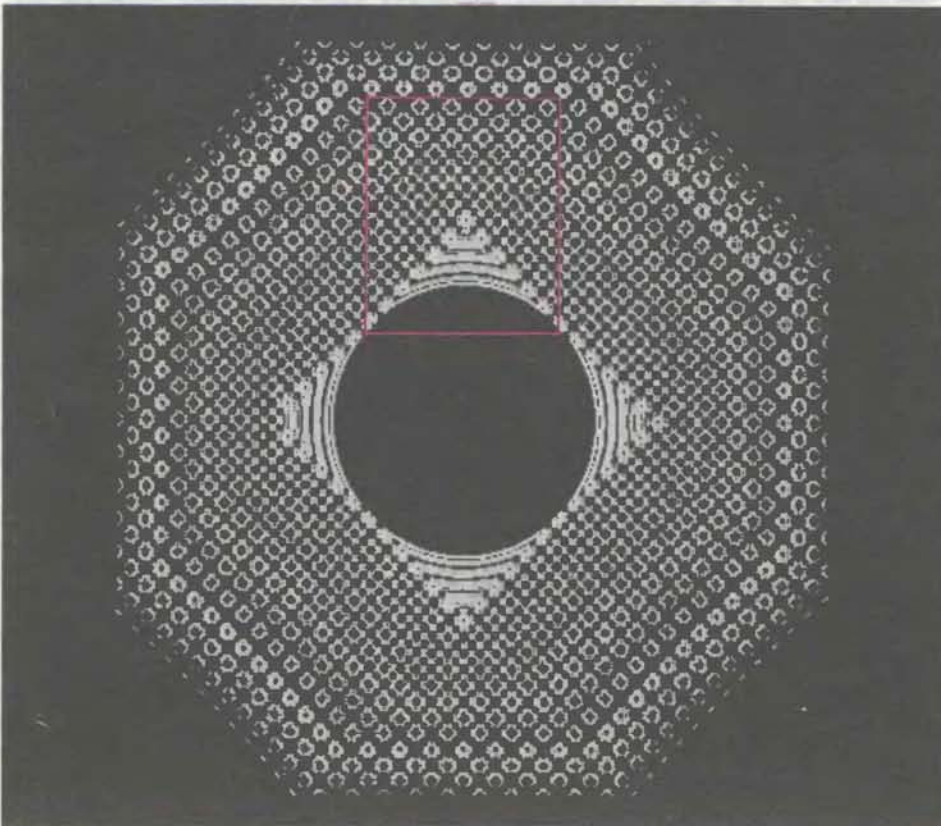
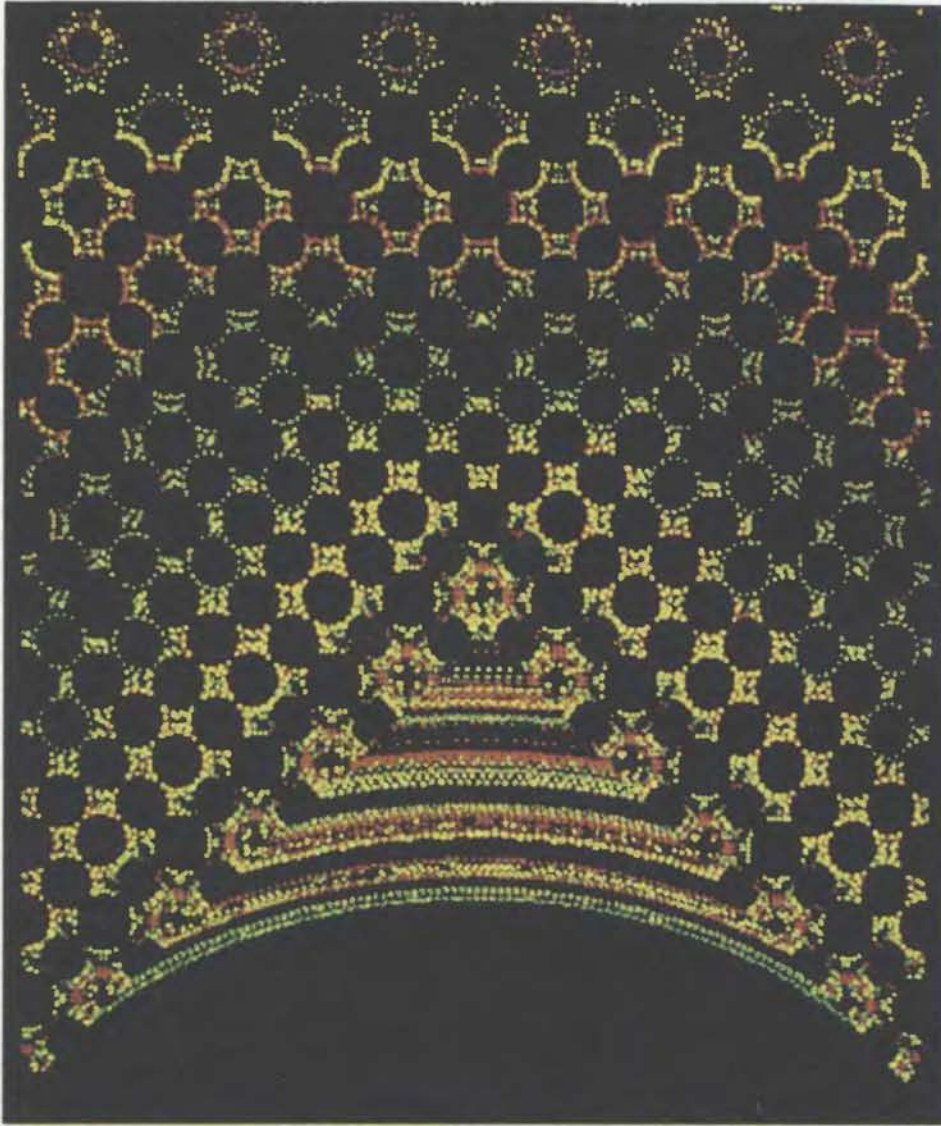
$$\begin{aligned}x &\leftarrow y - \text{sign}(x) \times [\text{abs}(b \times x - c)]^{1/2} \\ y &\leftarrow a - x\end{aligned}$$

Здесь функция $\text{sign}(x)$ принимает значения 1 или -1 в зависимости от того, положителен или отрицателен аргумент x . Функция $\text{abs}(b \times x - c)$ дает абсолютную величину выражения $b \times x - c$. Изображения могут варьировать довольно значительно в зависимости от выбираемых значений a , b и c — числовых параметров в формуле.

Сами формулы записаны в сокращенной математической форме. Здесь предполагается, что каждый раз новые значения x и y вычисляются в пра-



Окружности и квадраты по модулям 2, 3 и 4, полученные по программе Дж. Коннета CIRCLE²



«Фрактальные» обои, порожденные программой Б. Мартина HOPALONG

вой части формул и присваиваются x и y в левой части, после чего эти значения снова подставляются в правую часть для вычисления следующих x и y . Таким образом, программа, которую я назвал HOPALONG (попрыгунья), скачет от одной точки к другой. Процесс начинается в точке, где и x , и y равны 0, т. е. в начале координат. Следующая точка может уже располагаться справа вверху, а точка за ней — слева внизу. Компьютер высвечивает точки настолько быстро, что у наблюдателя возникает ощущение миниатюрного электронного дождя, падающего на экран; на нем появляются сотни, а затем и тысячи точек. Вскоре начинает вырисовываться узор. Если, например, параметр a принять равным -200 , b равным $0,1$ и c равным -80 , то возникает восьмиугольный узор (см. нижний рисунок слева). Если рассматривать изображение под увеличением и раскрашивать точку в зависимости от количества скачков, требующихся, чтобы достичь ее, то изображение превращается в удивительные вензеля (см. верхний рисунок слева). Для других значений a , b и c можно получить новые узоры. Можно принять, например, $a = 0,4$, $b = 1$ и $c = 0$ (см. верхний рисунок на с. 95) или принять $a = -3,14$, $b = 0,3$ и $c = 0,3$ (см. нижний рисунок на с. 95).

Алгоритм программы HOPALONG почти так же прост, как и программы CIRCLE²:

```
input num
input a, b, c
```

```
x ← 0
y ← 0
for i ← 1 to num
  plot (x, y)
  xx ← y - sign(x) × [abs(b × x - c)]1/2
  yy ← a - x
  x ← xx
  y ← yy
```

И опять множество читателей бросились, наверное, к своим компьютерам, чтобы тотчас ввести и запустить программу. Те же, кто останутся с нами, будут вознаграждены более подробным описанием программы Мартина и познакомятся также с третьей программой, производящей рисунки для обоев.

Перед выполнением программы HOPALONG нужно ввести количество итераций, которое присваивается в качестве значения переменной num . Затем нужно ввести также значения параметров a , b и c . Чем больше величина num , тем более тонким и замысловатым становится узор. Если, например, num принять равной

10 000, программа высветит на экране 10 000 точек, но для некоторых значений a , b и c это лишь только начало. При $a = -1000$, $b = 0,1$ и $c = -10$ и небольших увеличениях изображение напоминает корку четырехдольного лимона (см. нижний рисунок на с. 96). По мере того как число итераций возрастает от 10 000 точек до 100 000 и затем до 600 000, кружева становятся все более и более тонкими и красивыми (см. верх рисунок на с. 96).

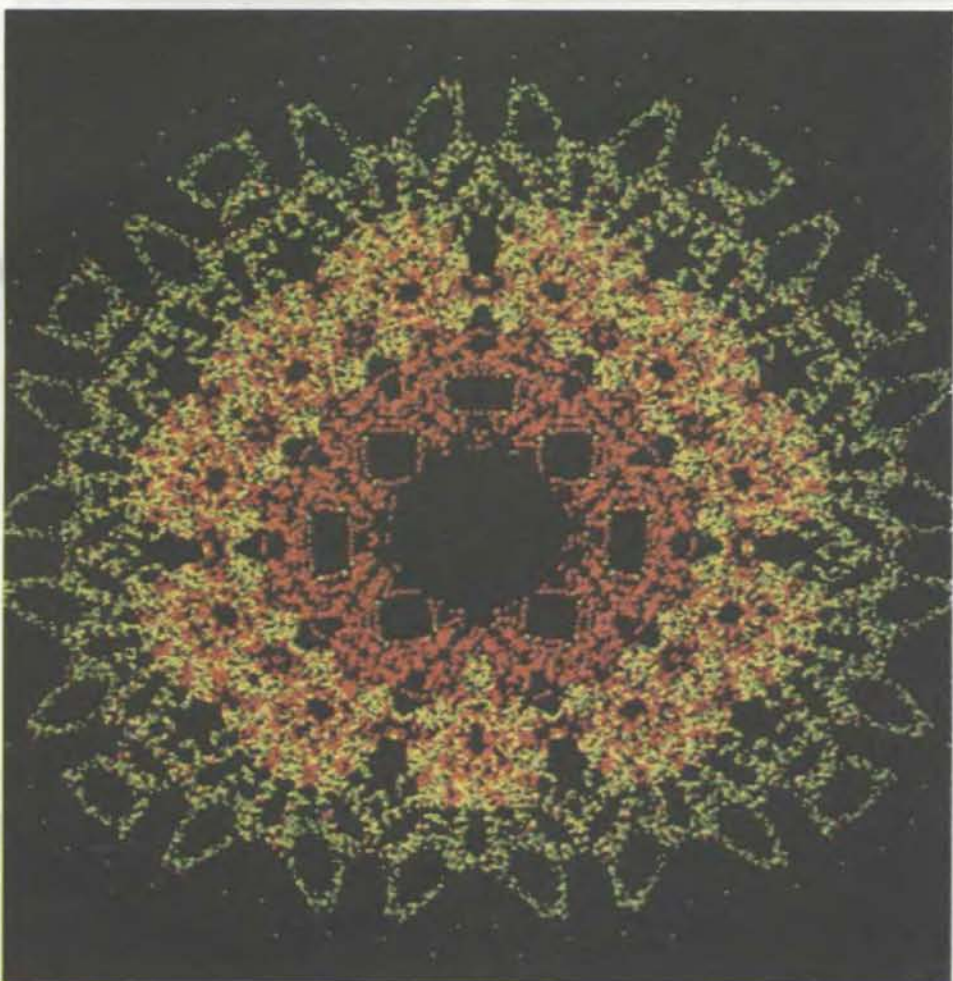
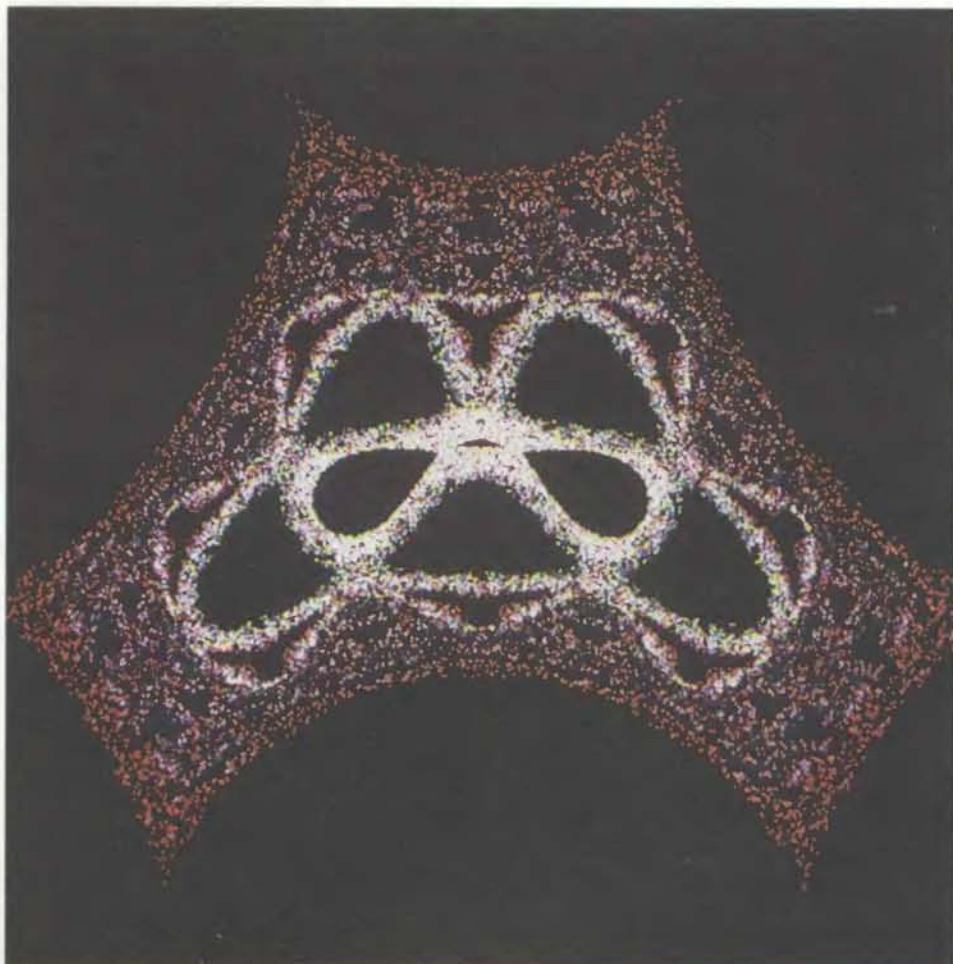
Этот алгоритм можно несколько усовершенствовать. Например, в него можно ввести средство, обеспечивающее перемещение точек, не попадающих на экран, или сжатие внеэкранных областей, чтобы сделать их видимыми. Если в алгоритм введены такие средства, то перед началом выполнения программы следует задать еще три дополнительных параметра, определяющих положение и масштаб картинки. В этом случае тело главного цикла нужно модифицировать: сразу после вычисления x и y в усовершенствованной версии программы HOPALONG осуществляются сдвиг полученных значений x и y и умножение результатов на масштабный множитель.

Аналогия с обоями не укрылась и от Мартина: «Мне кажется, что мы находимся на пороге взрыва в области создания узоров, имеющей важное коммерческое значение. Возможно, мы станем свидетелями создания автоматизированного дизайнера, художника по узорам на обоях и тканях, — это может произойти уже в ближайшие несколько лет. Клиент будет сам подбирать себе рисунок по вкусу, задавая компьютеру несколько числовых параметров». Мартин оптимистически смотрит и на возможность применения подобных программ в математической биологии. Посмотрим-ка снова на четырехдольный лимон. При сильном увеличении мы можем видеть детали, весьма напоминающие сосудистую систему; а может быть, это поперечное сечение внешнего слоя односемядольного растения? Об этих и о других узорах Мартин пишет следующее: «Очевидно, эти любопытные конфигурации показывают нам, что правила, по которым строятся сложнейшие ткани живых организмов, могут быть до абсурда простыми».

Возможно, читатели заинтересуются исследованием образов, порождаемых двумя другими итерационными формулами, также предложенными Мартином:

$$\begin{aligned}x &= y - \sin(x) \text{ и} \\y &= a - x\end{aligned}$$

В этих формулах требуется указать



Магические символы, полученные по итерационной формуле Мартина при параметре, равном 7

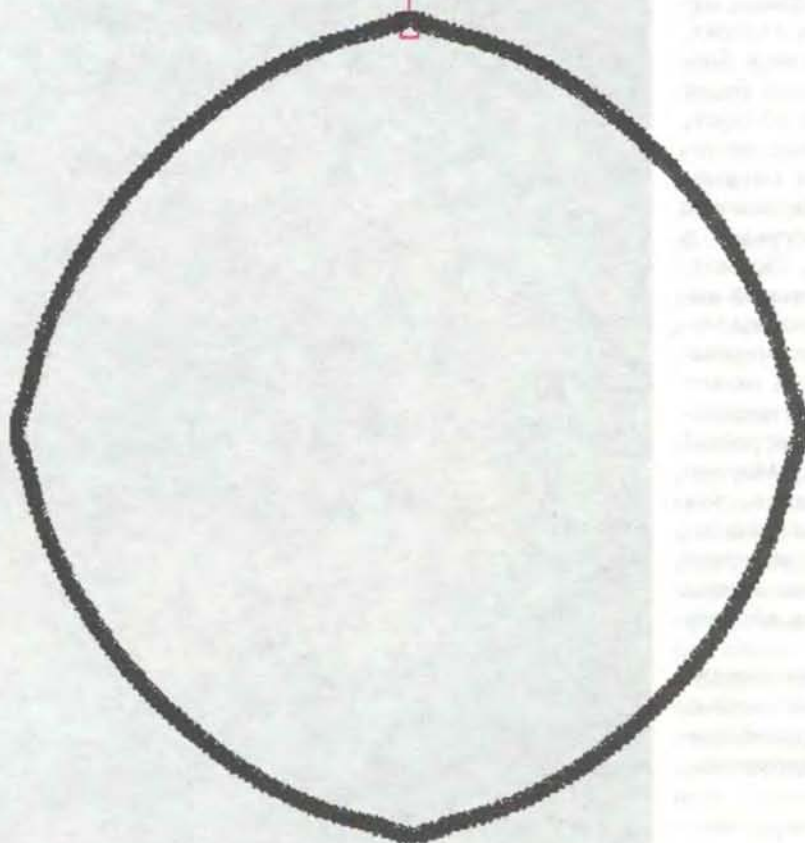
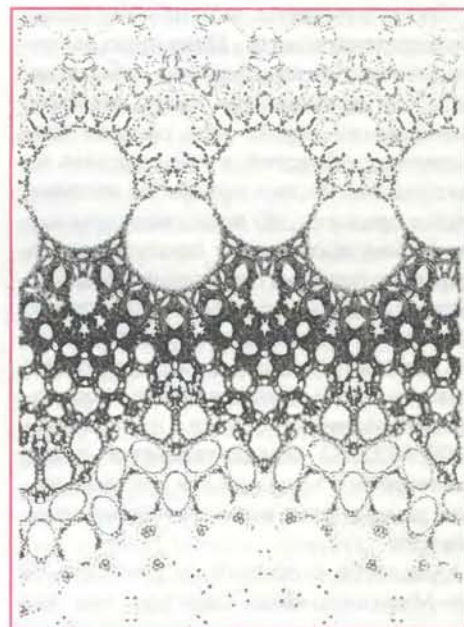
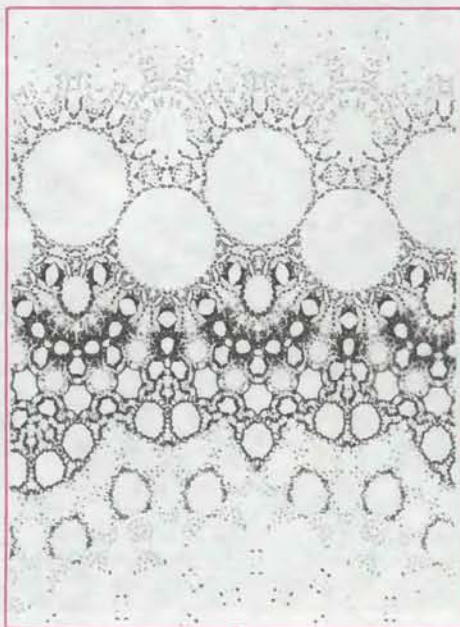
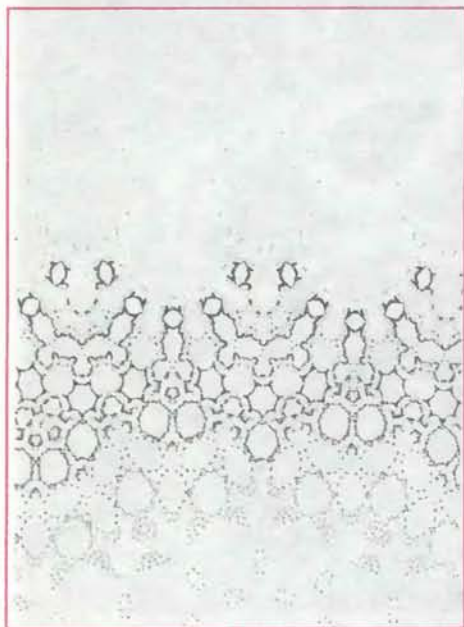
значение лишь одного параметра a . Мартину удалось обнаружить ряд в высшей степени интересных узоров, когда a лежит в окрестности $0,07$ от числа π .

Обои третьей разновидности следует приберечь для комнат, отведенных для глубоких и серьезных размышлений. Узоры здесь самые разные, от персидских хитросплетений до неистовых образов южноамериканских

индейских культур (см. нижний рисунок на с. 97 и на с. 98). Методы, при помощи которых были получены эти образы, абсолютно непохожи на рассмотренные выше. Т. Смит из австралийской фирмы PICA Pty. Ltd. разработал тонкие вариации самовоспроизводящегося клеточного автомата, изобретенного в 1960 г. Э. Фредкиным из Массачусетского технологического института (см. статью

Б. Хейеса в рубрике «Занимательный компьютер» в декабрьском номере журнала за 1983 г.). В идее этого автомата кроется удивительная возможность для порождения разнообразных узоров, и Смит начал исследования этих огромных возможностей.

Что собой представляет клеточный автомат Фредкина? Представьте себе бесконечную двумерную решетку из



Модель стебля растения и его сосудистая система, порожденные программой HOPALONG

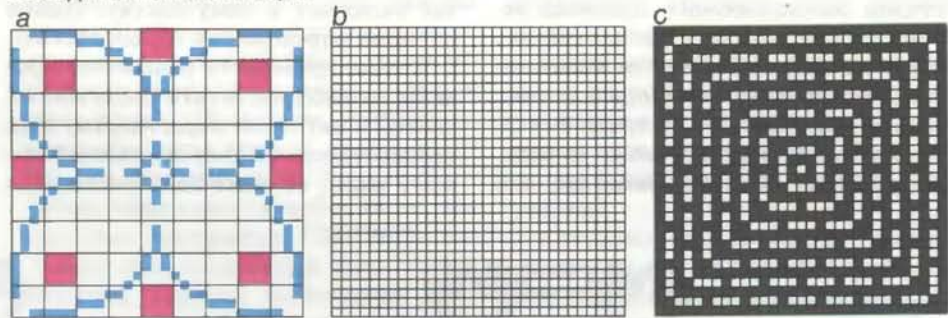
квадратных клеток. В каждый данный момент времени каждая клетка может находиться в одном из двух возможных состояний: она может быть либо живой, либо мертвой. Система управляется воображаемыми часами, при тактовых сигналах которых могут меняться состояния клеток. Судьба каждой клетки определяется окружающими ее четырьмя соседними клетками: если число живых соседей на одном такте часов четно, то на следующем такте данная клетка будет мертвой независимо от ее предыдущего состояния. Если же число живых соседей оказывается нечетным, то на следующем такте клетка будет живой. Это правило применяется одновременно ко всем клеткам решетки.

Автомат Фредкина очень напоминает игру «Жизнь», изобретенную Дж. Конвеем из Кембриджского университета. Эту игру мы не раз обсуждали в статьях нашей рубрики. Однако автомат Фредкина появился на свет раньше игры Конвея и он намного проще. Более того, он обладает одним удивительным свойством, отсутствующим у игры «Жизнь», — любая исходная конфигурация живых клеток, проходя через ряд поколений (тактов часового механизма), производит четыре своих копии. Еще через несколько поколений таких копий насчитывается уже 16, затем 64 и т. д. Обоим самым интересным образцам появляются в течение жизни промежуточных поколений клеток на стадии создания новых копий исходных популяций живых клеток.

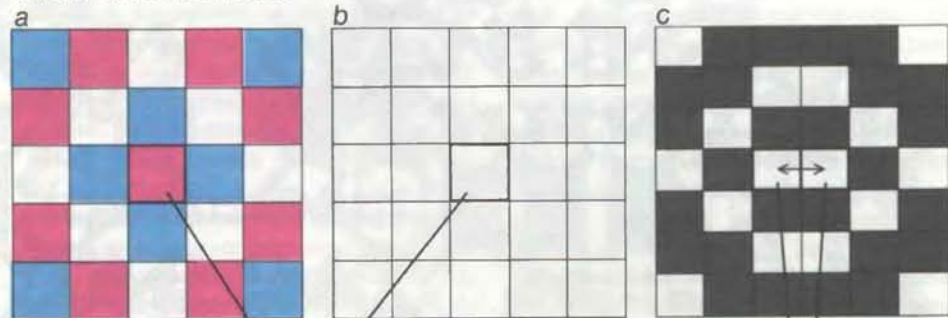
Программа Смита, печатающая обобщенные обои Фредкина, обладает весьма универсальными свойствами и называется PATTERN BREEDER (генератор узоров). Правила, определяющие судьбу клетки, не обязательно зависят от состояния четырех соседних клеток. Перед выполнением программы можно задать конфигурацию окружающих клеток, или «активную окрестность» для каждой клетки. Затем уже программа применяет то же самое правило «четный-нечетный», которое было выбрано в исходной версии автомата Фредкина. Каждый раз, когда на очередном такте часов число живых клеток в активной окрестности данной клетки четное, эта клетка должна умереть в следующем поколении. В противном случае она будет живой.

PATTERN BREEDER работает с любой исходной конфигурацией клеток, заданной пользователем. Например, исходная конфигурация, обозначенная буквой *a* на верхнем рисунке справа, создает красную часть узора, показанного на рисунке внизу. Для

ИСХОДНАЯ КОНФИГУРАЦИЯ



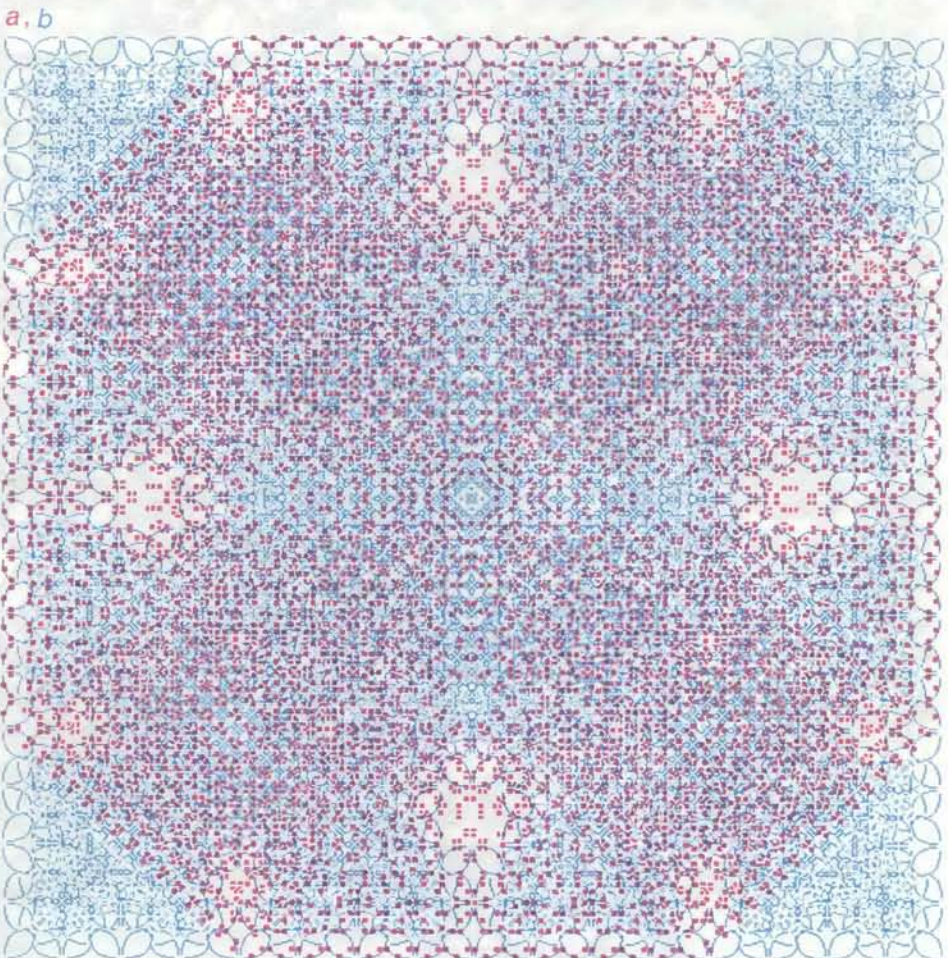
АКТИВНАЯ ОКРЕСТНОСТЬ



ЦЕЛЕВЫЕ КЛЕТКИ

ЦЕЛЕВЫЕ КЛЕТКИ

Правила, порождающие клеточные автоматы в программе Т. Смита PATTERN BREEDER



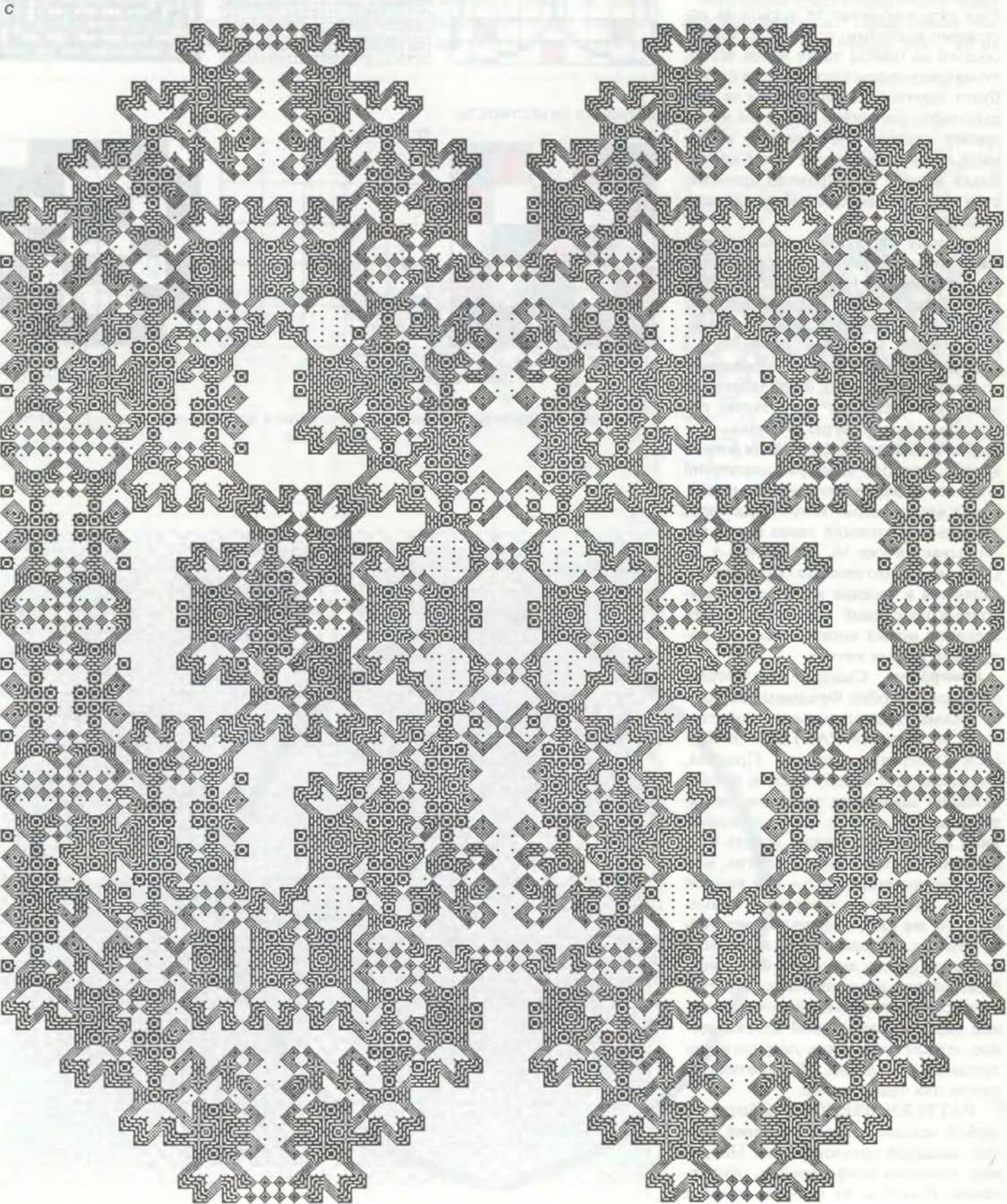
Два наложенных друг на друга изображения, порожденные программой PATTERN BREEDER

каждой данной клетки и на каждой стадии эволюционного процесса активная окрестность остается той же. Сама по себе она является довольно сложным узором, в который входят все цветные клетки в матрице 5×5 , также обозначенной буквой *a* на верхнем рисунке на с. 97. Заметим, что

активная окрестность в данном случае включает и саму клетку, судьба которой определяется окрестностью.

Чтобы применить решающее правило, нужно подсчитать число живых клеток в активной окрестности; если рассматриваемая клетка в данный момент жива, ее тоже надо учесть при

подсчете. Исходные конфигурации и соответствующие каждой из них активные окрестности показаны также для двух других изображений. Пара, обозначенная буквой *b*, соответствует синей части изображения, приведенного на нижнем рисунке на с. 97, а пара, обозначенная буквой *c*, соот-



Абстракция в стиле майя, полученная программой Смита

ветствует рисунку на с. 98. Активная окрестность s обладает дополнительным усложняющим свойством: клетка, судьба которой определяется окрестностью, сама осциллирует в последующих поколениях слева направо и обратно в центр окрестности. Программа Смита содержит в себе библиотеку исходных конфигураций и активных окрестностей, из которых пользователь может выбирать интересные его варианты. В настоящее время программа может выполняться только на персональных компьютерах Apple фирмы Macintosh.

Я не буду описывать программу PATTERN BREEDER во всей ее сложности, но приведу здесь более простую программу под названием FREDKIN. Читатели, обладающие некоторой подготовкой в программировании, смогут затем превратить эту программу в более общий алгоритм, обладающий кое-какими свойствами PATTERN BREEDER Смита:

Ввести исходную конфигурацию S для каждой клетки массива на экране
Count $\leftarrow 0$

для каждого соседа этой клетки
если сосед живой

to count \leftarrow count + 1

если значение count четно

to cell $\leftarrow 0$

иначе cell $\leftarrow 1$

Вывести cell

Ввести go
переход на S

Одна из привлекательных особенностей алгоритмической записи заключается в том, что в вашем распоряжении имеется много различных уровней описания. Конечно, грань, отделяющая общность описания от безответственной туманности, очень тонка. Читатели, наверное, заметят, что описание программы FREDKIN в том виде, в каком оно было приведено выше, отличается большей общностью по сравнению с алгоритмами, рассмотренными ранее. Например, для выполнения инструкции «Ввести исходную конфигурацию» потребуются указание нескольких инструкций на любом из распространенных языков программирования. Эти инструкции будут объединены в двойной цикл с двумя индексами i и j . Еще один двойной цикл скрывается за инструкцией «Для каждой клетки массива на экране». Здесь два индекса соответствуют координатам точек на экране дисплея или на принтере.

В своем главном цикле программа FREDKIN просто реализует применение правила, управляющего эволюцией заданной конфигурации. Она под-

считывает количество живых членов активной окрестности для каждой клетки (i, j) и затем, если это количество оказывается нечетным, высвечивает или выводит на печать клетку в виде точки. Последняя инструкция главного цикла требует ввода значения для переменной go. Здесь пользователь может ввести любое число, после чего программа FREDKIN построит свой следующий узор. Таким образом, процесс выполнения программы может быть прерван, чтобы можно было внимательно рассмотреть особенно понравившийся узор. Данный алгоритм, может быть, и не отвечает полностью требованиям структурного программирования, но работает прекрасно. Иногда, как мы видим, инструкции GOTO и связанные с ними уловки оказываются все же полезными.

Через три месяца я опубликую наиболее интересные образцы оговоров для ума, присланные к тому времени нашими читателями. Остальные же войдут в мою коллекцию, которую в виде книги я представлю вам, если когда-нибудь вернусь к этой теме.

В СТАТЬЕ, посвященной компьютерной магии, опубликованной в предыдущем номере журнала, внутренняя логика двух трюков осталась необъясненной. Первый из них был основан на известном фокусе Х. Лорейни, нью-йоркского мага. Доброволец из публики вытаскивает карту из хорошо перемешанной колоды и возвращает ее на место. Затем он сдает карты в шесть стопок и находит ту стопку, которая содержит вытянутую им ранее карту. Компьютер повелевает добровольцу сдавать по одной карте из этой стопки. После того как сдана очередная карта, компьютер указывает, следует ли продолжать сдавать или остановиться, угадывая тем самым выбранную карту в сдаваемой стопке.

Каким же образом компьютер останавливается на нужной карте? Ответ заключается в том, что, когда человек сдает колоду на шесть стопок, из центральной части исходной колоды в каждую стопку попадает по одной карте из каждой шести. Каждая из шести карт, находившихся в середине исходной колоды, занимает одно и то же относительное положение в маленьких стопках, а именно она всегда будет четвертой. Поскольку человек сдает карты только из стопки, содержащей выбранную карту, компьютер всегда оказывается в состоянии угадать ее, остановившись после того, как сдана четвертая карта.

Второй нераскрытый в прошлый

раз трюк основан на выборе цифр на клавиатуре обыкновенного карманного калькулятора. Доброволец из публики вводит два трехразрядных числа, выполняет над ними операцию умножения и называет все разряды результата, кроме одного. Каким образом факиру удается отгадать этот разряд?

Согласно инструкциям факира, каждое трехразрядное число, выбранное добровольцем, должно представлять собой три десятичных цифры, взятых либо со строки, либо со столбца, либо с главной диагонали цифровой клавиатуры калькулятора. Но любое такое число обладает мистическим свойством «тречности» после выбрасывания девяток. Когда все разряды числа складываются между собой, их сумма может представлять одно- или двухразрядное число. Если сумма является двухразрядной, то сумма самих разрядов дает одноразрядное число. В любом случае окончательный одноразрядный результат кратен трем. Например, число 471, набранное на клавишах первой колонки клавиатуры, сводится к 12, а затем и к 3, которое, разумеется, кратно 3. В то же время, когда человек перемножает два трехразрядных числа, обладающих описанными свойствами, и произведение подвергается той же самой процедуре, результат получается равным 9. Эта процедура равносильна перемножению по модулю 9 — отсюда мой термин «выбрасывание девяток». Если отсутствует какой-нибудь разряд произведения, скажем x , то в результате отбрасывания 9 для остающихся разрядов имеем $9 - x$. Это число вычисляется магом по мере того, как человек зачитывает все, кроме одного, разряды произведения. Таким образом, по известной величине $9 - x$ можно немедленно указать значение x .

Стратегия «положительной суммы» в отношении производительности труда, которая, по мнению Л. Тёроу, не совсем «складывается»

ЛЕСТЕР ТЁРОУ

СТРАТЕГИЯ ПОЛОЖИТЕЛЬНОЙ СУММЫ: ТЕХНОЛОГИЯ ДОЛЖНА СПОСОБСТВОВАТЬ ЭКОНОМИЧЕСКОМУ РОСТУ. Под редакцией Ральфа Ландау и Натана Розенберга

THE POSITIVE SUM STRATEGY: HARNESSING TECHNOLOGY FOR ECONOMIC GROWTH. edited by Ralph Landau and Nathan Rosenberg. National Academy Press (\$ 35)

НАСТОЯЩАЯ книга явно претендует на то, чтобы дать серьезный анализ экономической политики и экономической реальности в США. Внушительный авторский коллектив из 43 человек включает в себя руководителей ряда солидных американских корпораций и финансовых организаций, ректора крупного университета, ведущих экономистов и ученых из Гарвардского, Станфордского и других университетов, а также правительственных чиновников. Редакторы книги — Ральф Ландау, вице-президент Национальной Академии технических наук, профессор-консультант по вопросам экономики при Станфордском университете и бывший председатель совета директоров группы «Хэлкон СД», и Натан Розенберг, руководитель экономического факультета Станфордского университета. В этом совместном труде ставится диагноз любопытному, подобному хронической простуде недомоганию, которое испытывает американская экономика со времени окончания вьетнамской войны. И хотя многие из авторов статей, представленных в книге, дают нам примеры истинной проницательности, окончательный «коллективный диагноз», на мой взгляд, нельзя назвать верным.

Когда речь заходит о центральной теме, авторы действительно единодушны: технология может быть поставлена на службу повышения уровня жизни при одновременном уменьшении использования трудовых и сырьевых ресурсов, с тем чтобы избежать превращения США в общество «нулевой суммы», в котором увеличение дохода одного человека происхо-

дит за счет потерь в доходах другого.

Так, с частичной заменой медных проводов волоконно-оптическими кабелями в линиях дальней связи, миниатюризацией электронного оборудования и использованием алюминия для передачи электроэнергии на большие расстояния медь, которая 15 лет назад стоила дорого и имела в недостаточном количестве, теперь продается по цене меньшей (в реальном выражении), чем в самые мрачные дни «великой депрессии».

Чрезвычайно эффективно используя новейшую технологию, японцы стремительно ликвидируют разрыв в уровне жизни, который разделял США и Японию в 50-е годы и составлял 8:1. И они вполне могут добиться провозглашенной ими цели: к 2000 г. достигнуть самого высокого в мире уровня жизни.

Авторы книги единодушны в том, что необходимы более стремительные темпы продвижения вперед в области, которую инженеры именуют «техническим развитием», а экономисты — «ростом производительности труда». Но они наталкиваются на трудности, когда пытаются объяснить, почему в темпах технического развития в США наблюдаются признаки замедления. Трудности еще более возрастают, когда они пытаются предложить средство для ускорения роста производительности труда в США.

Рост производительности труда позволяет экономисту оценивать, как быстро внедряется в стране новая и более эффективная технология. Рассмотренные статистические данные по росту производительности труда в США рисуют довольно мрачную картину. В период с 1948 по 1965 г. производительность труда в стране ежегодно возрастала на 3,3%. После 1965 г. начался процесс постепенного, но весьма устойчивого спада. С 1977 по 1985 г. рост производительности труда составлял лишь 0,7% в год, а в 1985 г. (за исключением сельского хозяйства) упал до 0,3%. Производительность труда часто снижается в

периоды экономических спадов (сокращения производственных затрат происходят медленнее, чем сокращение объемов производимых товаров), но 1985 г. не был годом экономического спада. Он имел другую отличительную черту — это был первый год, в котором падение производительности труда не сопровождалось спадом (по крайней мере в пределах 25%) в самой экономике.

Более того, 1985 г. был отмечен усилением конкуренции на мировом рынке, в которой фактически все отрасли американской промышленности уступили часть своего места на этом рынке иностранной продукции. Фирмы с низкой производительностью труда были вынуждены объявить о своем закрытии. Учитывая наличие столь мощных стимулов к увеличению производительности труда, 1985 г. должен был бы ознаменоваться ее стремительным ростом. Однако этого не произошло. Почему?

Во всех странах с рыночной экономикой темпы роста производительности труда упали после первого «нефтяного шока» в 1973 г. (Обычно это объясняется тем, что инвестиции были сосредоточены на сбережении энергии, а не на повышении темпов роста производительности труда.) Тем не менее остальные промышленно развитые страны быстро оправались и после второго «нефтяного шока» в 1979 г., и с того времени их темпы роста производительности труда превышают американские в 4—6 раз.

Хотя книга написана так, будто замедление роста производительности труда в США — это какая-то трудно разрешимая загадка, читателю преподносятся результаты прямолинейного анализа, претендующего на разрешение этой загадки. Как отмечают в предисловии редакторы, «поистине важными факторами, которые могут обеспечить постоянный рост производительности труда, являются темпы технических изменений (т. е. изменений, зависящих в основном от величины расходов на исследования и разработки) и повышение качественного уровня рабочей силы». Харви Брукс, профессор прикладной физики и государственной политики в Гарвардском университете, разбирает этот вопрос более подробно. Он указывает, что США в настоящее время вкладывают в гражданские исследования и разработки меньшие инвестиции по сравнению со своими крупнейшими промышленными соперниками: в США они составляют 1,7% валового национального продукта (ВВП), в ФРГ — 2,5%, а в Японии — 2,3%.

Качественный уровень американской рабочей силы также не удовлетво-

ряет современным требованиям. Так, в США по сравнению с основными конкурентами больше функционально неграмотных (13% взрослого населения); меньше тех, кто имеет законченное среднее образование; больший процент выпускников средних школ имеет недостаточную подготовку по математике; меньшая доля инженеров среди выпускников колледжей. Имея столь низкие данные на «входе», как можно надеяться на высокое качество на «выходе»?

И все же, как отмечают авторы, дело не только в этом. Капиталовложения в основные производственные средства также являются одним из факторов. Большинство новых технологий требует нового оборудования; кроме того, рабочая сила, квалификация которой повысилась, также нуждается в новом оборудовании, чтобы реализовать свои профессиональные возможности. Страны или отрасли промышленности, которые идут на большие капиталовложения, обычно осваивают новые технологии быстрее. США же вкладывают в приобретение нового оборудования меньше капиталовложений по сравнению со своими конкурентами. Очевидно, что им придется увеличить объем таких капиталовложений. Если добавить к этому готовность предпринимателей рисковать, а также широкие рыночные возможности, то, по мнению ряда авторов книги, США освободятся от тормозящих факторов. Действительно ли это так?

Судя по высказываниям авторов о том, кому придется менять сложившуюся практику для достижения необходимых улучшений, получается, что дело только за правительством. Оно должно «понизить реальные процентные ставки, испытывающие влияние денежно-кредитной политики, дефицитов и неопределенности политики самого правительства»; правительство должно «принять налоговую структуру, которая будет действительно содействовать сбережению и инвестированию», признавая при этом, что «такие факторы, как дифференцированное налогообложение прироста капитала, стимулировали процесс нововведений и решимость предпринимателей идти на риск»; правительство должно «принять на вооружение разумную политику экономического регулирования и стремиться уменьшить ... опасения по поводу отравлений, болезней и других опасностей»; правительство «должно уменьшить темпы увеличения ... расходов, включая, возможно, даже расходы на оборону, но увеличить расходы на исследования и разработки как фундаментальные, так и общего ха-

рактера»; правительство должно «избегать чрезмерного ... вмешательства на рынках»; наконец, правительство должно помнить, что «национальное планирование и реальные нововведения являются несовместимыми». Джеймс Куинн, профессор управления в Дартмутском колледже, пишет следующее: «Вследствие эффективности таких мотиваций поддержание климата, благоприятного для предпринимателей, должно быть в центре любой политики стимулирования экономического роста в США». И в других областях своей деятельности правительство делало «чрезмерный упор на справедливость» как в правовом, так и экономическом смысле, а также стремилось «к большей справедливости в распределении доходов даже в ущерб потенциальному росту производительности труда».

Говоря без обиняков, авторы книги рекомендуют, чтобы, за исключением увеличения затрат на исследования и разработки, правительство не стояло на пути американской экономики, уменьшило свою роль в ней и дало возможность рыночным силам использовать свои «магические» возможности. Однако, даже если бы подобный анализ ситуации и был правильным (а я докажу, что он таковым не является), он тем не менее порождает недоверие к промышленникам, ученым и экономистам, которые написали эту книгу, поскольку скорее всего они «хлопочут для своего кармана»: увеличьте федеральное финансирование программ исследований и разработок, выгодных мне, но урежьте правительственные социальные программы, выгодные всем остальным; сократите налоги на прирост моего капитала, но увеличьте налоги на потребление для других американцев. Авторы забывают передать очень важную мысль о том, что достижение значительного прогресса в технологии и производительности труда — это не вопрос об удовлетворении эгоистических интересов тех или иных групп, а общая цель, имеющая важное значение для повышения жизненного уровня всех групп населения США.

Явным недостатком книги является то, что ее авторы отказались последовать совету Харви Брукса «рассмотреть и перенять зарубежный опыт». В ней нет анализа экономики Европы, хотя у нее традиционно существует активное сальдо с США, которое приближается к японскому активному сальдо с Соединенными Штатами. Когда авторы все же обращаются к опыту других стран (в статьях профессора Масахико Аоки, специалиста в области японской эко-

номики из Станфордского университета, и Даниэля И. Окимото, доцента политологии из этого же университета), выводы, к которым они приходят, не оказывают заметного влияния на их рекомендации.

Если предположить, что Соединенные Штаты преисполнены социальной справедливости, то как авторы книги объясняют тот факт, что среди промышленно развитых стран (за исключением Франции) США отличает самое неравномерное распределение доходов? Неравенство в распределении доходов США на 50% выше, чем в Японии, и на 35% выше, чем в ФРГ.

Если же проблема заключается в чрезмерных расходах правительства, то как авторы книги объясняют тот факт, что по последним данным Организации экономического сотрудничества и развития (ОЭСР) японское правительство тратит большую часть своего ВВП на социальные нужды, чем американское правительство? Как согласуют авторы свой анализ с тем фактом, что, поскольку у Японии невысокий военный бюджет, расходы на социальные программы в этой стране в настоящее время составляют большую долю правительственных ассигнований, чем в США? Если проблема заключается в общих расходах правительства, то почему темпы роста производительности труда самые низкие в США — в стране, у которой государственный сектор наименьший по сравнению с другими крупнейшими промышленно развитыми странами?

Может быть, причиной являются высокие налоги? В этой связи, что могут сказать редакторы и авторы книги по поводу статьи Дейла Джоргенсона, профессора экономики из Гарвардского университета? Джоргенсон показывает, что в 50-е и 60-е годы, когда годовой рост производительности труда превышал 3%, налоги с корпораций были намного выше, чем сейчас, когда увеличение производительности труда за год составляет менее 1%.

Несмотря на то что капиталовложения в основные фонды в период с 1948 по 1965 г. составляли меньшую долю американского ВВП (9,5% в год), чем в период с 1977 по 1985 г. (11,6% в год), производительность труда и темпы технического развития возрастают сейчас медленнее, чем в первый из указанных периодов. Если причина заключается в предпринимчивости, то почему в Японии и ФРГ производительность труда растет гораздо быстрее, хотя никто не скажет, что эти страны отличаются большей предпринимчивостью, чем США?

Почему Япония — общество «пра-

вительственного регулирования» — и ФРГ, где промышленный государственный сектор больше, чем в США, показывают хорошие результаты? Что заставило редакторов книги фактически игнорировать эти факты? Альберт Бауэрс, руководитель корпорации Syntex, в своей статье о японской экономике приводит знакомый перечень ключевых направлений экономической политики (ориентация на конкретные рынки, вложение капиталов под низкий процент в определенные отрасли промышленности, закрытие иностранным компаниям доступа на ключевые внутренние рынки Японии, отказ от «сиюминутных» прибылей и т. д.). И тем не менее редакторы в попытке навязать читателю свой взгляд ссылаются на этот пример как бы между прочим.

За исключением отличной статьи об экономических трудностях, порождаемых американской правовой системой, написанной Мильтоном Катцем, профессором права из Гарвардского университета, остальные авторы полностью упускают из виду роль социальной структуры, т. е. роль так называемых не «жестких», а «мягких» источников технологического прогресса. Чтобы ускорить рост производительности труда в США, именно организациям, а не правительству следует изменить свои традиционные методы работы.

Если, например, проанализировать рост производительности труда в несельскохозяйственном секторе в период с 1978 по 1985 г., составлявший 0,5% в год, то можно обнаружить некоторые интересные факты. В течение этого периода американские частные предприятия уменьшили число производственных рабочих на 1,9 млн., т. е. на 6%, увеличив долю ВВП, производимого этими предприятиями на 18% (с поправкой на инфляцию). Если объем производства возрастает на 18% при сокращении затрат на 6%, то это означает, что производительность труда повысилась на 24%. Если поделить эту цифру на 7 лет, то окажется, что рабочие на предприятиях США обеспечивали более чем 3%-ный прирост производительности труда!

Однако в действительности дело обстоит иначе. Те же самые предприятия увеличили численность своих служащих на 10 млн., повысив тем самым число занятых на 21%. Так как объем производства увеличился лишь на 18%, это означает, что производительность служащих в американской промышленности фактически упала. В настоящее время в американских платежных ведомостях числятся 58 млн. служащих и лишь 30 млн. ра-

бочих. В результате этого падение производительности труда служащих фактически свело на нет значительную часть прироста в производительности труда рабочих. Если учесть еще и тех, кто занят в секторе услуг, многие из которых косвенно работают на частный сектор, то спад в производительности труда служащих окажется еще больше.

В 1985 г. американские предприниматели стали высказываться о необходимости уменьшить чрезмерные расходы на служащих, но, несмотря на это и на отдельные статьи в газетах о том, что некоторые фирмы сокращают занятость в средних звеньях управленческого персонала, имеющиеся данные показывают, что происходит обратное. В 1985 г. доля ВВП частного сектора выросла на 2,7%. При этом темпы роста численности директоров и управляющих составляли 5,6% в год, т. е. более чем в два раза превышали прирост объема производства. В то же самое время административный персонал (который сейчас насчитывает 17,3 млн. человек) увеличился на 3,5% в год, т. е. на 30% быстрее прироста объема производства.

Поотраслевые сравнения производительности труда между американскими и иностранными фирмами, такие, как известное исследование относительных задержек производства автомашины «Форд эскорт», всегда показывают, что недостаточный рост производительности труда в США в немалой степени обусловлен относительно высокими расходами на конторских служащих.

Так как авторы сосредоточивают свое внимание на положении только в самих предприятиях, то в их анализе оказывается упущенным весьма важный элемент. Даже если бы все рекомендации авторов были выполнены, то в средней американской конторе мало что изменится; однако именно здесь и кроются основные проблемы. Следует иметь в виду, что конторы являются главными поглотителями компьютерного оборудования и программного обеспечения, что, однако, не приводит к повышению производительности труда. Почему?

Ряд авторов книги ссылаются на то, что Бертон Клейн, профессор экономики Калифорнийского технологического института, называет «склонностью идти на риск». Такие фразы имеют мало смысла, когда говорят о производительности труда конторских служащих. Если готовность «идти на риск» означает, например, желание вкладывать деньги в новую технологию, то можно утверждать, что конторы весьма любят «рисковать».

Автоматизация конторских операций, охватившая американский бизнес, происходит головокружительными темпами. В последние годы на конторские компьютеры приходилась весьма значительная доля общих американских промышленных капиталовложений, и американская контора в среднем больше оснащена компьютерной техникой по сравнению с любым иностранным конкурентом. И все же производительность труда в конторах падает вопреки их растущему техническому оснащению. И так, огромные капиталовложения (идут на риск?), совершенная технология и высокая квалификация служащих — именно те факторы, за которые ратуют авторы, — не приводят к повышению производительности труда.

Причины этого следует искать не в американском правительстве, а в деятельности американских фирм. Правительство идет на уменьшение вмешательства государства в экономику (в особенности в нефтяной промышленности, на транспорте и в банковском деле) и применяет антитрестовское законодательство в гораздо меньшей мере, и тем не менее численность конторских служащих в США растет. Каковы бы ни были другие достоинства американских управляющих, они далеки от мирового класса в том, что касается их способности управлять своим делом.

Рамки настоящей статьи не позволяют вдаваться в подробную дискуссию о том, почему расходы на конторских служащих растут столь стремительно в американских фирмах, но я считаю, что эту тенденцию нельзя изменить без коренной перестройки управления и организации в самих американских фирмах.

Показательным примером является бухгалтерское дело. Казалось бы, что компьютеризация бухгалтерского дела должна была бы привести к уменьшению числа бухгалтеров. И все же в период с 1978 по 1985 г. число бухгалтеров в американских фирмах увеличилось с 1 до 1,3 млн. Внедрение новой технологии просто привело к учащению процедуры упорядочения старых счетов и изобретению новых форм бухгалтерского учета, которые ранее были неосуществимыми, но при этом никто не задумывался о том, как такие формы действительно могут улучшить конечные результаты.

Возможно, ответ могут подсказать иностранные системы управления, основанные на таких принципах, которые позволяют самим рабочим контролировать оборотные фонды и не создают огромного потока информации к вершине административной

пирамиды корпорации и обратного потока тысяч распоряжений. Однако это — опасная мысль, ибо авторам книги пришлось бы заявить корпорациям, что они стали слишком непроизводительными и что им следует внести изменения в методы своей работы.

Прежде чем последовать предписаниям авторов книги и тем самым позволить провести изменения в налогообложении с целью сократить потребление или урезать правительственные программы, проводимые для блага граждан, американский налогоплательщик вправе спросить, почему он должен верить, что американская промышленность распорядится дополнительным доходом более благоразумно и не потратит, как в последнее время, миллиарды долларов на автоматизацию конторских операций.

Он также может спросить, почему он должен платить больше налогов для поддержания исследований и разработок, когда один из авторов книги (Эдвин Мэнсфилд, профессор экономики Пенсильванского университета) утверждает, что «сейчас технология передается через национальные границы гораздо быстрее, чем в прошлом».

Американский налогоплательщик может также попросить прокомментировать утверждение одного из руководителей корпорации Phillips, которое широко обсуждалось в европейской прессе в марте этого года, о том, что США в конечном счете будут полностью вытеснены из электронного бизнеса, поскольку американские фирмы отказались от производства электронных товаров широкого спроса, т. е. удалились от рынка, стимулирующего инвестиции в разработку новых процессов, которые можно было бы использовать в производстве промышленной и военной электроники. Зачем же в таком случае поддерживать менеджеров, совершающих подобные стратегические ошибки?

Среднего американца можно простить за мысли о том, что не правительство, а что-то другое мешает американским менеджерам организоваться и принимать решения, если американские фирмы с рабочими, не организованными в профсоюзы, способны, удерживая 90% рынка чипов 8K RAM, «скатиться» до доли в 10% рынка чипов 256K RAM. В своей докторской диссертации Чарлз Фергюсон, выпускник Массачусетского технологического института, анализирует причины спада американской полупроводниковой промышленности. Этот спад был ускорен стратегией, хитроумно задуманной и хорошо осу-

ществленной правительством и промышленными кругами Японии. Эта стратегия сработала вследствие раздробленности структуры американской промышленности, а также в результате близоруких решений и большого оборота, который непосредственно вытекал из самой организации американской промышленности.

Некоторые из структурных проблем кратко упоминаются в статье Гордона Мура, главного управляющего делами компании Intel: «Излишек капитала, вкладываемого в новые предприятия, связанные с риском, часто вредит компании, поскольку те, кто берется осуществлять это начинание, часто оставляют компанию, осуществляя свое рискованное предприятие самостоятельно... Крупный проект, важный для удержания наших позиций в международной конкуренции, был задержан на год или более, потому что люди уходили на новое начинание». Как можно создать фирму, процветающую в течение более одного поколения, если любая группа талантливых молодых инженеров желает основать собственную компанию и разбогатеть? Подобно избытку мороженого, избыток предприимчивости может вызвать «несварение» у экономики. И тем не менее авторы книги ратуют за еще большую предприимчивость.

Конечно, отдельные авторы книги иногда не согласны с мнением большинства. Так, Поль Дэвид, профессор экономики и истории Стэнфордского университета, отмечает, что рынки не всегда гарантируют оптимальные результаты (в качестве примера он приводит неудобное расположение букв QWERTY на клавиатуре печатных машинок и компьютеров). Однако понимание этого обстоятельства нигде в книге не отражается на рекомендациях, предлагаемых авторским коллективом.

Ряд авторов усматривают недостатки в промышленных исследованиях и разработках процессов. Как отмечает Харви Брукс, «одним из отрицательных факторов может быть то, что в отличие от других стран в США основное значение уделяется продукции как таковой, а не внесению новшеств в производственный процесс». Роберт Мэлпас, директор-распорядитель компании British Petroleum, признает, что «инженер-производитель занимается одно из самых низших звеньев инженерной профессии». По мнению Гордона Мура, «если в области производства американцы уступят своим иностранным конкурентам, то создастся реальная угроза того, что исследования и разработки, нацеленные на усовершенст-

вование производства, потеряют приток средств, необходимых для их поддержания».

Авторы призывают расширять промышленные исследования и разработки и выделять больше кредитов тем, кто занимается ими. Однако они не дают каких-либо разъяснений, почему американские фирмы недостаточно вкладывали капиталы в промышленные исследования и разработки или почему они сейчас неожиданно начинают менять эти привычки. Если в условиях рынка, свободного от ограничений, американцы не вкладывают капиталы в промышленные исследования и разработки, то, должно быть, им не выгодно поступать так, и никакие увещания или дополнительные средства для инвестиций не изменят ни объема, ни престижа таких инвестиций. Если недостаточные объемы промышленных исследований и разработок являются реальной проблемой, то следует признать, что так или иначе рыночный механизм не работает. Никакой правительственный бюрократ не давал распоряжений избегать инвестиций в технологические исследования и разработки и не «подправлял» налоговую систему, чтобы помешать таким инвестициям.

В статье под названием «Изобретая конструкторов: компьютерные исследования и разработки в Соединенных Штатах и Японии», опубликованной в «Technology Review», Д. Элеонор Уэстни и Кийонори Сакакибара описывают процесс внедрения новых технологий в производство компьютеров в Японии. В отличие от характерного для США жесткого разделения между исследованиями и разработками, производством и управлением японские инженеры начинают с исследований, затем фактически внедряют свои идеи в производственные технологии и, наконец, в управление. У кого же могут быть наилучшие стимулы для эффективного производства нового изделия, как не у тех, кто первым придумал это изделие? Именно такие организационные изменения должны произойти в США, для того чтобы они вернули свое превосходство в области технологических нововведений. Если же американские фирмы не желают подобных изменений, то такие изделия, как полупроводниковые чипы, будут все реже иметь клеймо «Made in USA».

Другие формы социальной организации также играют свою роль в деле сдерживания роста производительности. Хотя в рассматриваемой нами книге есть статья Джона Рида, руководителя компании Citicorp, и его коллеги Глена Морено о роли круп-

ных банков в финансировании промышленности, в ней нигде не говорится о том, как смелые начинания финансовых викингов влияют на новую технологию и рост производительности труда. В американской финансовой системе даже весьма сильные фирмы, созданные, чтобы противостоять соперникам, не имеют средств (после обязательной выплаты процентов), которые они могли бы вложить в разработку новой технологии. В обстановке мании слияния фирм промышленность становится игрушкой банков. Активы перераспределяют, кто-то сколачивает себе состояние, однако главный источник роста благосостояния — производительность труда — растет все медленнее.

В Японии министр международной торговли и промышленности считается более влиятельным, чем министр финансов. В США же абсурдно даже сравнивать силу министра торговли и силу министра финансов.

Подобное положение подчеркивает то, что является важным по мнению общества. Поведение страны также отражает мнение общества, когда то, что выгодно для финансовых учреждений, находится в конфликте с тем, что выгодно для промышленности. В январе 1985 г. курс британского фунта стерлингов составлял 1,04 долл. США. Промышленникам Великобритании надо было бы от радости плясать на улицах. Впервые за 50 лет у них, казалось, появилась возможность увеличить свою долю на мировом рынке. Однако это явилось катастрофой для лондонского Сити. Да и кто же захочет держать английские финансовые активы при такой цене за фунт? Незамедлительно правительство Великобритании подняло учетные ставки с 9 до 14%, чтобы восстановить положение своих финансовых учреждений, и этим шагом оно закрыло возможности, которые могли открыться перед промышленными фирмами страны. Когда речь заходит о таких ситуациях, то США ведут себя чисто по англо-саксонски; встав перед выбором, они будут вести себя профинансово и антипромышленно. Однако, чтобы конкурировать со странами, отдающими предпочтение промышленности, нужно развернуть позицию на 180°.

Настоящий сборник статей также выиграл бы, если бы в него было включено и мнение историка об экономическом развитии США. Харви Брукс отмечает, что «спрос на прочные стальные рельсы для железных дорог явился важным фактором стимулирования технологического прогресса в быстро развивающейся ста-

лелитейной промышленности». Брукс, правда, не упоминает тот факт, что правительство США своими протекционистскими мерами воспрепятствовало доступу на американский рынок более производительной английской сталелитейной промышленности. Брукс не напоминает читателям о том, что железные дороги также строились на земле, бесплатно предоставляемой американским правительством.

Первым уникальным вкладом федерального правительства в прогресс промышленности явилась концепция взаимозаменяемых частей. Э. Уитни разработал эту производственную систему в 1798 г., чтобы выполнить контракт на изготовление мушкетов, заключенный им с министерством обороны. Никто в частном секторе не решался идти на риск массового производства, и, действительно, по первоначальному контракту Континентальный конгресс выплатил Уитни больше, чем если бы конгресс закупил мушкеты ручной работы в Европе. Уитни к тому же задержал сроки поставки и в значительной мере превысил издержки производства, которые правительство также взяло на себя. Однако широкое использование взаимозаменяемых частей дало Америке преимущество, позволившее ей догнать в экономическом отношении Великобританию в течение XIX в.

Американская индустрия гражданской авиации была создана на основе самолетов, сконструированных для военных перевозок. Правительственные строительные проекты, такие, как система автомобильных дорог между штатами, создали внутренние рынки, что дало возможность производителям строительного оборудования установить на многие годы господство на мировых рынках.

Однако история США есть нечто гораздо более сложное, чем только лишь разнузданная стихия рынка.

Редакторы и авторы книги часто уподобляют технологию «черному ящику», сложные внутренние механизмы которого никто не может постичь, в то же время они дают понять, что рыночный механизм ясен как божий день. «Закачай» на рынок высококачественные компоненты, не давай правительству расстраивать этот механизм, и рынок всегда даст на выходе высококачественные результаты.

Как хорошо известно экономистам и менеджерам, рыночный механизм, к сожалению, столь же туманен, сколь и технология. Посмотрите, например, на предписание экономических стимулов (уменьшение налогов) для хваленых сторонников рискованных предприятий. Никогда техниче-

ский прогресс не был столь стремительным, как в ходе второй мировой войны, но в то же время ни в какое другое время люди не получали меньше стимулов в виде личного дохода. Максимальные налоговые ставки превышали 90%. Нынешние ставки налогообложения лиц с высокими доходами гораздо ниже всех тех, которые существовали со времен «великой депрессии», однако внедрение новых технологий и рост производительности протекали медленнее, чем в любой период после промышленной революции. Ясный рыночный механизм все мутнеет и мутнеет.

Издательство МИР предлагает:

Р. Рэфф, Т. Кофмен
Эмбрионы, гены и
эволюция

Перевод с английского

В книге американских авторов излагаются факты и идеи о связи генетики, эмбриологии и эволюции. С привлечением большого фактического материала обосновывается представление о том, что эволюция идет по преимуществу путем отбора мутаций регуляторных генов, ответственных за морфогенез.

Содержание: классические и современные представления об основных понятиях теории эволюции и эмбриологии и их взаимосвязи: морфологическая и молекулярная эволюция; роль гетерохронии в эволюции; регуляция эмбриогенеза, значение мутаций регуляторных генов; число генов, необходимое для развития эмбриона; организация генома эукариот; иерархические системы, обеспечивающие организменную интеграцию морфогенеза, и эволюция.

Для специалистов по молекулярной биологии, эмбриологов, генетиков, эволюционистов, для студентов и преподавателей биологических факультетов.

1986, 31 л. Цена 2 р.80 к.



Наука и общество

Что мужу добро —
жене худо

В ГОРНЫХ районах западной части Северной Америки обитает один интересный паук. Самец этого вида, прежде чем приступить к спариванию, разрушает паутину самки: он комкает это изысканное куполообразное сооружение в плотный маленький шарик. П. Уотсон из Корнеллского университета сообщает в журнале "Science", что он нашел причину такого на первый взгляд бессмысленного вандализма. Странные для нас действия самца предотвращают вторжение других самцов во время процесса спаривания, который весьма продолжителен. По наблюдениям Уотсона, половозрелая самка, побыв 7-10 дней девственной, выделяет феромон — летучее вещество, привлекающее самцов, — и смазывает им свои тенета. Скомкав пахучую паутину, самец резко сокращает количество феромона, испаряющегося в окружающее пространство, и тем самым уменьшает вероятность посещения этого места другими самцами.

Самец, достигнув зрелости, покидает свою паутину и живет за счет добычи, попадающей в тенета самок. У самок яйца оплодотворяются спермой только первого полового партнера и поэтому самцы остро конкурируют за возможность спариться с половозрелой, но девственной самкой, поскольку таких относительно мало. При низкой плотности популяции неспаривавшимся половозрелым самкам необходимо как-то заявить о се-

бе, чтобы самцы могли их заметить. По данным Уотсона, присутствие на паутине феромона приводит к 10-кратному увеличению посещаемости ее самцами. Первое, что делает самец, найдя такую паутину, — старается уменьшить ее размеры. И только после этого начинается копуляция, длящаяся 5 часов.

Для самки ее тенета — единственное средство защиты и пропитания, и «несчастной» приходится сооружать новые, а ведь на строительство паутины тратится невосполнимое количество белка. Самка еще лишена и того, что предоставила бы ей открытая справедливая борьба между претендующими на нее самцами: у нее нет шанса получить в партнеры сильнейшего из имеющихся самцов.

Подобные противоречия между полами — не редкость в животном мире. Но обычно источник женских феромонов не так легко уничтожить. Скажем, если им является само тело самки, то максимум, что может совершить самец, чтобы уменьшить его действие, — маскировать женский феромон своим собственным сигналом; есть данные о том, что у некоторых животных самцы действительно прибегают к этому способу.

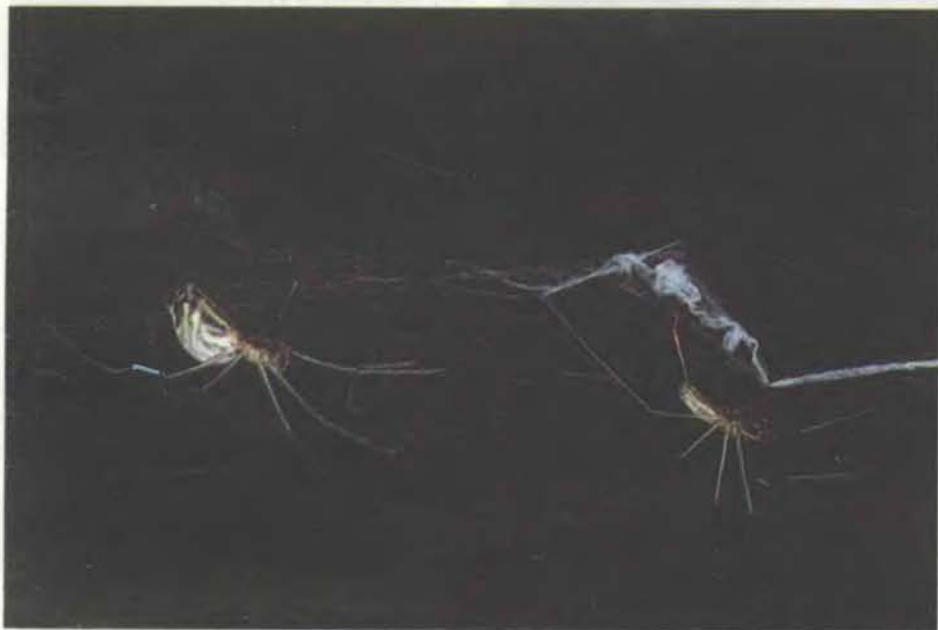
Взглянуть на проблему сверху

СОГЛАСНО последнему сообщению Института мировых ресурсов, 80 тыс. км² тропических лесов (площадь шт. Мэн) каж-

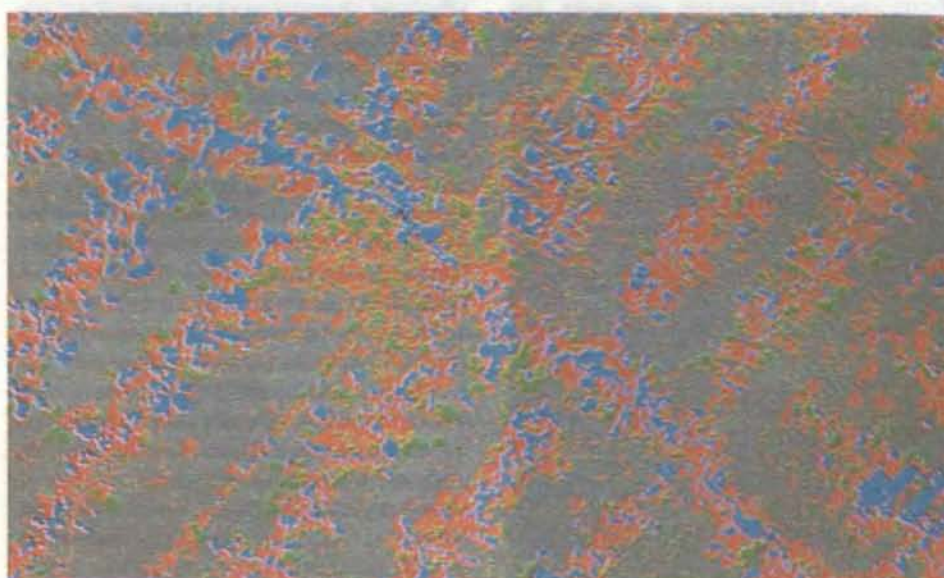
дый год исчезает с лица земли. Эта оценка, признается в отчете, — лишь одна из многих. Скорость исчезновения тропических лесов — это величина, которая до сих пор служит предметом бурных споров, так как надежных данных, на которые можно опереться, немного. Отдельные правительства могут преуменьшать значение этой проблемы по политическим мотивам, но даже беспристрастные исследования ограничены по своей точности из-за огромных пространств, подлежащих обследованию. Решением проблемы может стать спутниковая фотография: этот новый метод позволяет измерять скорость обезлесения путем сравнения фотографий, сделанных со спутников в последовательные моменты времени.

Среди многих причин, которыми объясняется беспокойство за судьбу деревьев, произрастающих в тропических районах, две причины заслуживают особого внимания. Первая состоит в том, что тропические леса служат местом обитания большинства наземных видов животных и растений: вырубка этих лесов может приводить к массовым вымираниям и в конечном счете к уменьшению генетического разнообразия земных организмов. Вторая причина состоит в том, что тропические леса представляют собой огромный резервуар углерода. Некоторые исследователи, включая Дж. Вудвелла из Вудс-Холского исследовательского центра, считают, что обезлесение является основной причиной возрастания в атмосфере содержания углекислого газа. Если этот вывод справедлив, обезлесение может привести к заметным изменениям климата планеты за счет парникового эффекта.

Техника измерения обезлесения была разработана Дж. Вудвеллом совместно с Р. Хьютоном и Т. Стоуном из Лаборатории биологии моря и А. Парком, независимым консультантом. Лежащая в ее основе идея весьма проста. Здоровая растительность поглощает красный свет и отражает радиацию в ближней инфракрасной области спектра. Голая местность кажется более яркой, чем растительный покров, в красной области спектра и менее яркой в ближней инфракрасной области. На снимках, сделанных со спутника «Ландсат», заметны изменения, связанные с вырубкой леса или с обработкой земли. Накладывая более поздний снимок на более ранний и вычитая второй из первого элемент за элементом, можно количественно оценить произошедшие изменения (каждый элемент снимка, сделанного со спутника «Ландсат», изображает



САМЕЦ ПАУКА (справа) комкает паутину самки (самка слева), чтобы ее запах не привлекал других самцов.



СНИМКИ, сделанные со спутника «Ландсат», показывают результаты обезлесения в период с 1976 (вверху) по 1981 г. (в середине) в Рондонии. Изображенная область имеет в ширину 30 км. Участки красного цвета — тропические леса; белые и голубые диагональные полосы — просеки, вырубленные поселенцами. На снимке внизу, который получен «вычитанием» среднего снимка из верхнего, зеленым и оранжевым цветом показаны участки голой земли, а голубым — сельскохозяйственные угодья.

участок земной поверхности размером 59 на 79 м).

Вудвелл и его коллеги применили новый метод к обследованию Рондонии — провинции в Бразилии, расположенной на юго-западе Амазонской низменности. До 1960 г. эта область тропических лесов оставалась в основном нетронутой, но в последнее время, после того как бразильское правительство выделило участки по 100 га для приезжих из перенаселенных южных районов страны, началось ее освоение. Согласно результатам расчетов, проведенных группой исследователей из Вудс-Хола, к 1982 г. поселенцы вырубili по меньшей мере 11 400 км² лесов.

Изучение Рондонии стало своего рода пробным камнем. Конечной целью должно стать глобальное исследование масштабов обезлесения. Снимки со спутника «Ландсат», покрывающие в совокупности всю поверхность земного шара, делаются с 1972 г. Вудвелл и его коллеги смогли уменьшить затраты на обследование Рондонии, используя вместе с отдельными снимками «Ландсата» фотографии, сделанные со спутника Национального управления по исследованию океана и атмосферы: каждая из этих фотографий изображает большую площадь, но с меньшим разрешением. Такой подход, по мнению Вудвелла, позволит провести глобальное обследование обезлесения, затратив всего лишь от 5 до 10 млн. долл.

Желтый дождь прекращается

С 1981 г. государственный департамент США выступает с заявлениями, что СССР и его союзники применяют в Юго-Восточной Азии химическое оружие. При этом делается ссылка главным образом на факт присутствия следов токсина (трихотецена Т-2, вырабатываемого грибом *Fusarium*,) обнаруженных в желтых пятнах на листьях и камнях, доставленных из тех районов Кампучии и Лаоса, которые якобы подвергались химическим нападениям, а также в крови, моче или тканях 20 человек, утверждавших, что они оказались жертвами этих химических нападений. Несколько исследователей, включая Метью Меселсона (один из авторов статьи «Желтый дождь», см.: В мире науки, 1984, № 2. — Ред.), поставили под сомнение «доказательства» государственного департамента. Они

пришли к выводу, что «желтый дождь» состоит в основном из пыли, переваренной пчелами, и представляет собой не что иное, как массовую дефекацию пчел. Результаты недавних исследований, проведенных в Канаде и Великобритании, показывают, что заявления со стороны государственного департамента США беспочвенны.

Исследовательским центром министерства обороны Канады были проанализированы образцы крови 280 человек из Таиланда; 270 из них не были в районах предполагавшихся химических нападений. В крови пяти из этих 270 человек обнаружены трихотечены; у тех же 10 человек, которые оказались «жертвами» химических нападений, трихотечены в крови отсутствовали. Канадские исследователи отмечают, что уровень трихотечена в крови сравним с уровнем этого токсина в пищевых продуктах, зараженных грибом *Fusarium*. Кроме того, они исследовали образцы растений и установили, что желтые пятна

на них состоят в основном из пылицы. На пластиковом пакете, переданном им жителем деревни, якобы подвергнувшись химическому нападению в 1982 г., они действительно обнаружили трихотечены, однако исследователи считают, что из этого факта ничего не следует, поскольку, по их словам, «нельзя достоверно установить, откуда этот пакет».

Дж. Стэнли — министр обороны Великобритании — сообщил в палате общин, что Исследовательский центр министерства обороны Великобритании по химической защите «произвел анализ на трихотечен ряда биологических, медицинских и других проб из районов Юго-Восточной Азии, подвергнувшихся, как утверждают, химическим нападениям. Анализы, — заявил Стэнли, — дали отрицательный результат».

Учитывая все это, отмечает Меселсон, «утверждение, что желтый дождь — это химическое оружие, опровергнуто».

ДИЗАЙН НА ОСНОВЕ ПРИНЦИПА ИЗОМОРФНОГО ЗАМЕЩЕНИЯ. Сб. Итоги науки и техники. т. 3. Органическая химия. — М.: ВИНТИ, 1979.

Кузьмин В.Е., Коновороцкий Ю.П. ВЗАИМОСВЯЗЬ СТРУКТУРНЫХ И ТОПОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МОЛЕКУЛ. — Журнал структурной химии, 1985, т. 26, № 4, с. 14.

Соколов В.И. ХИМИЧЕСКАЯ ТОПОЛОГИЯ. — М.: Знание, 1981.

СУПЕРСТРУНЫ

AN INTRODUCTION TO THE THEORY OF DUAL MODELS AND STRINGS. J. Scherk in *Reviews of Modern Physics*, Vol. 47, No. 1, pages 123-164; January, 1975.

UNIFICATION OF FORCES AND PARTICLES IN SUPERSTRING THEORIES. Michael B. Green in *Nature*, Vol. 314, No. 6010, pages 409-414; April 4, 1985.

SUPERSTRINGS AND SUPERSYMMETRY. Alvaro de Rújula in *Nature*, Vol. 320, No. 6064, page 678; April 24, 1986.

SUPERSTRING THEORY. M. B. Green, J. H. Schwarz and E. Witten. Cambridge University Press, in press.

Арефьева И.Я., Волович И.В. СУПЕРСИММЕТРИЯ, ТЕОРИЯ КАЛУЦЫ—КЛЕЙНА, АНОМАЛИИ, СУПЕРСТРУНЫ. — Успехи физических наук, 1985, т. 146, вып. 6, с. 655.

Казаков Д.И. СУПЕРСТРУНЫ ИЛИ ЗА ПРЕДЕЛАМИ СТАНДАРТНЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ. — Сообщения ОИЯИ, P2-86-91, Дубна, 1986.

Нестеренко В.В. РЕЛЯТИВИСТСКИЕ СТРУНЫ: ОТ МЫЛЬНЫХ ПЛЕНОК К ОБЪЕДИНЕНИЮ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ. — Природа, 1986, № 11, с. 14.

Библиография

БИОЛОГИЧЕСКОЕ ВЛИЯНИЕ МКВ-ИЗЛУЧЕНИЯ

BIOLOGICAL EFFECTS AND MEDICAL APPLICATIONS OF ELECTROMAGNETIC ENERGY. *Proceedings of the IEEE*, Vol. 68, No. 1; January 1980.

THE ORIGINS OF U.S. SAFETY STANDARDS FOR MICROWAVE RADIATION. Nicholas H. Steneck, Harold J. Cook, Arthur J. Vander and Gordon L. Kane in *Science*, Vol. 208, No. 4449, pages 1230-1237; June 13, 1980.

EFFECTS OF LONG-TERM LOW-LEVEL RADIOFREQUENCY RADIATION EXPOSURE ON RATS. A. W. Guy et al. U.S.A.F. School of Aerospace Medicine, 1983-85.

RADIOFREQUENCY RADIATION EXPOSURE LIMITS IN EASTERN EUROPE. Peter Czernski in *Journal of Microwave Power*, Vol. 20, No. 4, pages 233-239; 1985.

BIOLOGICAL EFFECTS AND EXPOSURE CRITERIA FOR RADIOFREQUENCY ELECTROMAGNETIC FIELDS. National Council on Radiation Protection and Measurements, Report No. 86, Bethesda, Md., 1986.

БИОЛОГИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ. Под ред. Б.М. Савина и Г.А. Степанского. Сборник статей: Итоги науки и техники, серия «Физиология человека и

животных». — М.: ВИНТИ, 1978, т. 22.

ГИГИЕНИЧЕСКОЕ НОРМИРОВАНИЕ ФАКТОРОВ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СРЕДЫ И ТРУДОВОГО ПРОЦЕССА. Под редакцией Н.Ф. Измерова и А.А. Каспарова. — М.: Медицина, 1986, с. 115-145.

ХИМИЮ ПРОГНОЗИРУЕТ ТОПОЛОГИЯ

MOLECULAR CONNECTIVITY IN CHEMISTRY AND DRUG RESEARCH. Lamont B. Kier and Lowell H. Hall. Academic Press, 1976.

CHEMICAL GRAPH THEORY. Nenad Trinajstić. CRC Press, 1983.

INFORMATION-THEORETIC INDICES FOR CHARACTERIZATION OF CHEMICAL STRUCTURES. Danail Bonchev. Research Studies Press, distributed by John Wiley & Sons, Inc., 1983.

Дмитриев И.С. МОЛЕКУЛЫ БЕЗ ХИМИЧЕСКИХ СВЯЗЕЙ (ОЧЕРКИ О ХИМИЧЕСКОЙ ТОПОЛОГИИ). — Л.: Химия, 1980.

Жданов Ю.А. ЭНТРОПИЯ ИНФОРМАЦИИ В ОРГАНИЧЕСКОЙ ХИМИИ. — Издательство Ростовского университета, 1979.

Зефилов Н.С., Трач С.С., Чижов О.С. КАРКАСНЫЕ И ПОЛИЦИКЛИЧЕСКИЕ СОЕДИНЕНИЯ. МОЛЕКУЛЯРНЫЙ

ГЕМАТОЭНЦЕФАЛИЧЕСКИЙ БАРЬЕР

BLOOD-BRAIN BARRIER IN PHYSIOLOGY AND MEDICINE. Stanley I. Rapoport. Raven Press, 1976.

THE CONCEPT OF A BLOOD-BRAIN BARRIER. Michael Bradbury. John Wiley & Sons, Inc., 1979.

POLARITY OF THE BLOOD-BRAIN BARRIER: DISTRIBUTION OF ENZYMES BETWEEN THE LUMINAL AND ANTILUMINAL MEMBRANES OF BRAIN CAPILLARY ENDOTHELIAL CELLS. A. Lorris Betz, J. Anthony Firth and Gary W. Goldstein in *Brain Research*, Vol. 192, No. 1, pages 17-28; June 16, 1980.

BRAIN METABOLISM: A PERSPECTIVE FROM THE BLOOD-BRAIN BARRIER. William M. Pardridge in *Physiological Reviews*, Vol. 63, No. 4, pages 1481-1535; October, 1983.

SPECIALIZED PROPERTIES AND SOLUTE TRANSPORT IN BRAIN CAPILLARIES.

A. Lorris Betz and Gary W. Goldstein in *Annual Review of Physiology*, Vol. 48, pages 241-250; 1986.

ЦВЕТА ПРЕДМЕТОВ

JOURNAL DE EUGÈNE DELACROIX. Introduction and notes by André Joubin. Librairie Plon, 1932.

TREATISE ON PHYSIOLOGICAL OPTICS. Herman von Helmholtz. Dover Publications, Inc., 1962.

THE FERRIER LECTURE, 1962: VISUAL ADAPTATION. W. A. H. Rushton in *Proceedings of the Royal Society, Series B*, Vol. 162, No. 986, pages 20-46; March 16, 1965.

DAYLIGHT AND ITS SPECTRUM. S. T. Henderson. John Wiley & Sons, Inc., 1977.

THE RETINEX THEORY OF COLOR VISION. Edwin H. Land in *Scientific American*, Vol. 237, No. 6, pages 108-128; December, 1977.

Пэдхем Ч., Сондерс Дж. ВОСПРИЯТИЕ СВЕТА И ЦВЕТА. Перев. с англ. — М.: Мир, 1978.

Соколов Е. Н., Измайлов Ч. А. ЦВЕТОВОЕ ЗРЕНИЕ. — М.: Издательство МГУ, 1984.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СОЛНЦА С МЕЖЗВЕЗДНЫМ ВЕЩЕСТВОМ

THE EXTRATERRESTRIAL UV-BACKGROUND AND THE NEARBY INTERSTELLAR MEDIUM. H. J. Fahr in *Space Sciences Reviews*. Vol. 15, No. 4, pages 483-540; February, 1974.

SYMPOSIUM ON THE STUDY OF THE SUN AND INTERPLANETARY MEDIUM IN THREE DIMENSIONS. Edited by L. A. Fisk and W. I. Axford. Goddard Space Flight Center, 1976.

THE INTERSTELLAR WIND AND ITS INFLUENCE ON THE INTERPLANETARY ENVIRONMENT. Gary E. Thomas in *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, Vol. 6, pages 173-204; 1978.

Курт В. Г. АТОМЫ МЕЖЗВЕЗДНОЙ СРЕДЫ В СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ. — Природа, 1984, №10, с. 50.

Курт В. Г. АСТРОФИЗИКА И КОСМИЧЕСКАЯ ФИЗИКА. В сборнике «Движение Солнца в межзвездной среде». — М.: Наука, 1982, с. 268.

ПЛЕЧЕНОГИЕ

LIVING AND FOSSIL BRACHIOPODS. M. J. S. Rudwick. Hutchinson University Library, 1970.

PERMIAN BRACHIOPODS OF WEST TEXAS. G. Arthur Cooper and Richard E. Grant. Smithsonian Institution Press

for sale by U. S. Government Printing Office, 1972-77.

BRACHIOPODS AND PEDICLES. Joyce R. Richardson in *Paleobiology*, Vol. 7, No. 1, pages 87-95; 1981.

BRACHIOPODS. Merrill W. Foster in *Synopsis and Classification of Living Organisms*, edited by Sybil P. Parker. McGraw-Hill Book Company, 1982.

END-CRETACEOUS BRACHIOPOD EXTINCTIONS IN THE CHALK OF DENMARK. Finn Surlyk and Marianne Bagge Johansen in *Science*. Vol. 223, No. 4641, pages 1174-1177; March 16, 1984.

ВКЛАД ЛЕОНАРДО ДА ВИНЧИ В ТЕОРЕТИЧЕСКУЮ МЕХАНИКУ

MEMORIE SULLA GEOMETRIA E LA MECCANICA DI LEONARDO DA VINCI. Roberto Marcolongo. Stabilimento Industrie Editoriali Meridionali, Naples, 1937.

THE MECHANICAL INVESTIGATION OF LEONARDO DA VINCI. Ivor B. Hart. University of California Press, 1963.

THE MECHANICS OF LEONARDO DA VINCI. Clifford A. Truesdell in *Essays in the History of Mechanics*. Springer-Verlag, 1968.

LEONARDO DA VINCI. MECHANICS. Marshall Clagett in *The Dictionary of Scientific Biography*: Vol. 8. edited by Charles Coulston Gillispie. Charles Scribner's Sons, 1973.

Гуковский М. А. МЕХАНИКА ЛЕОНАРДО ДА ВИНЧИ. — М. — Л.: Издательство АН СССР, 1947.

Зубов В. П. ЛЕОНАРДО ДА ВИНЧИ. — М.: Издательство АН СССР, 1961.

НАУКА ВОКРУГ НАС

HOLOGRAPHY HANDBOOK: MAKING HOLOGRAMS THE EASY WAY. Fred Unterseher, Jeannene Hansen and Bob Schlesinger. Ross Books, 1982.

SEEING THE LIGHT: OPTICS IN NATURE, PHOTOGRAPHY, COLOR, VISION, AND HOLOGRAPHY. David Falk, Dieter Brill and David Stork. Harper & Row, Publishers, 1986.

Власов Н. Г., Рябова Р. В., Семенов С. И. О ГОЛОГРАММАХ ЛЕЙТА, ВОСТАНАВЛИВАЕМЫХ В БЕЛОМ СВЕТЕ. — Журнал научной и прикладной фотографии и кинематографии, 1977, № 5.

ЗАНИМАТЕЛЬНЫЙ КОМПЬЮТЕР

MATHEMATICAL GAMES. Martin Gardner in *Scientific American*, Vol. 224, No. 2, pages 112-117; February, 1971.

COMPUTER RECREATIONS. Brian

Hayes in *Scientific American*, Vol. 249, No. 4, pages 22-36; October 1983.

В МИРЕ НАУКИ

Подписано в печать 21.10.86.
По оригинал-макету. Формат 60 × 90 ¼.

Гарнитуры таймс, гелиос.

Офсетная печать.

Объем 6,75 бум. л.

Усл.-печ. л. 13,50.

Уч.-изд. л. 17,42.

Усл. кр.-отт. 49,36.

Изд. № 25/4854. Заказ 785.

Тираж 20000 экз. Цена 2 р.

Издательство «Мир»

Набрано в редакции по подготовке оригинал-макетов издательства «Мир» на фотонаборном комплексе «Компьюграфик»

Типография В/О «Внешторгиздат»

Государственного комитета СССР

по делам издательств,

полиграфии и книжной торговли.

127576, Москва, Илимская, 7



Васидзу К.

ВАРИАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ
В ТЕОРИИ УПРУГОСТИ И ПЛАСТИЧНОСТИ

Перевод с английского

Имя японского ученого проф. К. Васидзу (ранее — Вашицу — именно в такой ошибочной транскрипции его фамилия неоднократно фигурировала в монографиях и учебниках, изданных в нашей стране) широко известно специалистам в области механики деформируемого твердого тела, строительной механики и прикладной математики. Его монография «Вариационные методы в теории упругости и пластичности» трижды публиковалась на английском языке (1968, 1975 и 1982 гг.) и при каждом переиздании ее текст существенно перерабатывался и дополнялся.

В книге с единых позиций излагается построение вариационных принципов в теории упругости и пластичности и описываются их приложения к конкретным задачам. Наряду с классическими вариационными принципами указываются модификации этих принципов, образующие основу построения метода конечных элементов; приводится большой фактический материал, незаменимый при решении задач механики деформируемых тел. В научном и методическом отношении книгу можно поставить в один ряд с известными монографиями С.П. Тимошенко.

Для научных работников, аспирантов и студентов, специализирующихся по прикладной математике и по механике, а также для инженеров и конструкторов.

Краткое содержание:

Часть А. Формулировка вариационных принципов в теории упругости. Введение. 1. Геометрически линейная теория упругости в прямоугольных декартовых координатах. 2. Вариационные принципы в теории упругости при малых перемещениях. 3. Геометрически нелинейная теория упругости в прямоугольных декартовых координатах. 4. Обобщение принципа виртуальной работы и связанных с ним вариационных принципов. 5. Кручение стержней. 6. Балки. 7. Пластины. 8. Оболочки. 9. Конструкции. 10. Деформационная теория пластичности. 11. Теория пластического течения.

Часть В. Вариационные принципы как основа методов конечных элементов. Введение. 12. Классические и модифицированные вариационные принципы в линейной статической теории упругости. 13. Классические и модифицированные вариационные принципы в статической теории упругости при конечных перемещениях. 14. Классические

и модифицированные вариационные принципы в задачах линейной динамической теории упругости. 15. Две инкрементальные теории деформируемого твердого тела с геометрическими и физическими нелинейностями. 16. Вариационные принципы в задачах изгиба упругих пластин. 17. О методах дискретизации.

Приложения: А. Об условиях стационарности функции. В. Вариационные принципы в динамике системы материальных точек. С. О принципе виртуальной работы. D. О функциях энергии деформации и дополнительной энергии. E. О различных видах тензоров напряжений в теории конечных перемещений. F. Векторы и тензоры. G. Совместные изгиб и кручение балки. H. Теория балки, учитывающая эффект деформации поперечного сдвига. I. Соотношения напряжения-деформации для тонкой пластины. J. Теория изгиба пластин, учитывающая эффект деформации поперечного сдвига. K. Различные виды оболочек. L. О принципе Хаара-Кармана. M. О вариационных принципах в квазистатических задачах и в теории ползучести. N. О методе граничных элементов.

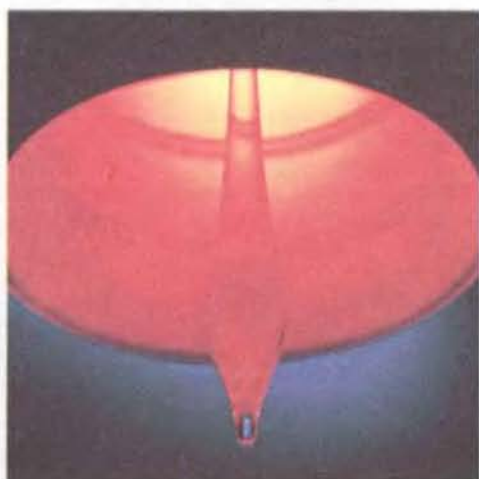
План выпуска 1987 г. Цена 3 р. 10 к.

Уважаемый читатель!

Эту книгу Вы можете заказать в магазинах книготоргов, распространяющих научно-техническую литературу. Если в ближайшем от Вас магазине заказ не будет принят, заказ можно направить в издательство «Мир» по адресу: 129820 Москва, 1-й Рижский пер., 2, издательство «Мир», отдел распространения и рекламы



В следующем номере:



НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ЭКОНОМИКА

МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ СИСТЕМ ИНФОРМАЦИИ И СВЯЗИ

МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ НАЗЕМНОГО ТРАНСПОРТА

МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ЭНЕРГЕТИКИ

ПРИМЕНЕНИЕ НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ В МЕДИЦИНЕ

НАУКА О МАТЕРИАЛАХ

НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ В ЭЛЕКТРОНИКЕ

МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ФОТОНИКИ

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МЕТАЛЛЫ

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ КЕРАМИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ПОЛИМЕРЫ

КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

ФИЗИКА РАСТРЕСКИВАНИЯ

КОМПЬЮТЕР-КАРИКАТУРИСТ