

# В МИРЕ НАУКИ

SCIENTIFIC  
AMERICAN

Издание на русском языке



Февраль **2** 1984

АЭРОДИНАМИКА  
ВЕЛОМАШИН

Издательство МИР предлагает:

---

## МОЗГ

### Сборник статей

Перевод с английского

---



Специальный выпуск журнала *Scientific American*, в котором приняли участие такие известные ученые как Ф. Крик, Д. Хьюбел, Т. Визель и другие.

Содержание: Как работает мозг. Нейрон. Малые системы нейронов. Организация мозга. Развитие мозга. Химия мозга. Центральные механизмы зрения.

Механизмы головного мозга, управляющие движением. Специализация человеческого мозга. Заболевания человеческого мозга. Мысли о мозге.

Книга предназначена для биологов всех специальностей, для врачей, химиков, физиков, кибернетиков, для студентов и аспирантов.

1984, 20 л.

Цена 1 р. 70 к.

---





# В МИРЕ НАУКИ

*Scientific American* · Издание на русском языке

ИЛЛЮСТРИРОВАННЫЙ ЖУРНАЛ

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

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР» МОСКВА

№ 2 · ФЕВРАЛЬ 1984

*В номере:*

## СТАТЬИ

- 4 **Современные ледоколы** *Джон Д. Харброн*  
Быстрые темпы развития ледоколостроения обусловлены постоянно возрастающими масштабами торговых перевозок в замерзающих морях. Современные ледоколы отличаются необычной конструкцией корпуса и движительного комплекса. Наибольшее число ледоколов в настоящее время строится в Финляндии  
(Scientific American, December 1983, Vol. 249, No. 6)
- 12 **Ио** *Торренс В. Джонсон, Лоуренс А. Содерблом*  
Самый активный в Солнечной системе вулканизм обнаружен на Ио, одном из спутников Юпитера. Гейзероподобные эруптивные колонны и массивные лавовые потоки свидетельствуют о присутствии необычных вулканических расплавов. Источник их энергии — гравитационное воздействие Юпитера  
(Scientific American, December 1983, Vol. 249, No. 6)
- 26 **Сельские общины в начале раннего железного века на территории Центральной Европы** *Питер С. Уэллс*  
Результаты археологических раскопок в Баварии дают представление об экономическом укладе жизни обитателей сельских поселений в X—VIII вв. до н.э., когда они начали обменивать избыточный продукт на изделия обособившихся ремесленников  
(Scientific American, December 1983, Vol. 249, No. 6)
- 34 **Спираль ДНК** *Ричард Э. Дикерсон*  
Рентгеноструктурный анализ кристаллов трех типов двуспиральных молекул ДНК показал, что генетическая информация, закодированная в последовательности нуклеотидов, может проявляться в локальной структуре спирали  
(Scientific American, December 1983, Vol. 249, No. 6)
- 50 **Квантовая гравитация** *Брайс С. Де Витт*  
В квантовой теории гравитации сама геометрия пространства-времени должна непрерывно флуктуировать, так что может стереться даже различие между прошлым и будущим  
(Scientific American, December 1983, Vol. 249, No. 6)
- 64 **Смена жертвы в простой экосистеме** *Артур Т. Бергрэд*  
На острове Ньюфаундленд, где число видов млекопитающих невелико, рыси охотились на американских зайцев-беляков до тех пор, пока популяция зайцев не «разрушилась», после чего рыси стали нападать на телят оленя-карибу. Такое циклическое переключение с одной добычи на другую продолжается и сейчас  
(Scientific American, December 1983, Vol. 249, No. 6)
- 74 **Аэродинамика аппаратов, движимых мускульной силой человека** *Альберт С. Гросс, Честер Р. Кайл, Дуглас Дж. Мэйлуики*  
Сопротивление воздуха значительно замедляет движение велосипедиста. Учет аэродинамических факторов позволил создать велосипеды, развивающие скорость до 100 км/ч  
(Scientific American, December 1983, Vol. 249, No. 6)
- 84 **Интерпретация зрительных иллюзий** *Дональд Д. Хоффман*  
Зрительная система способна интерпретировать изображения, имеющие неоднозначный смысл, используя для этого некоторые правила, отражающие закономерности наблюдаемого мира  
(Scientific American, December 1983, Vol. 249, No. 6)

## РУБРИКИ

- 3 Об авторах
- 11, 25, 63, 83, 105 Наука и общество
- 49 50 и 100 лет назад
- 91 Наука вокруг нас
- 98 Занимательный компьютер
- 106 Книги
- 111 Библиография

# SCIENTIFIC AMERICAN

## BOARD OF EDITORS

Gerard Piel  
PUBLISHER

Dennis Flanagan  
EDITOR

Brian P. Hayes  
ASSOCIATE EDITOR

Philip Morrison  
BOOK EDITOR

John M. Benditt

Peter G. Brown

Michael Feirtag

Robert Kunzig

Diana Lutz

Jonathan B. Piel

John Purcell

James T. Rogers

Armand Schwab, Jr.

Joseph Wisnovsky

Samuel L. Howard  
ART DIRECTOR

Richard Sasso  
PRODUCTION MANAGER

George S. Conn  
GENERAL MANAGER

© 1983 by Scientific American, Inc.

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

## В МИРЕ НАУКИ

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР  
С. П. Капица

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА  
Л. В. Шепелева

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

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

ХУДОЖЕСТВЕННЫЙ РЕДАКТОР  
С. А. Стулов

ЗАВЕДУЮЩАЯ РЕДАКЦИЕЙ  
И. В. Лунёва

ТЕХНИЧЕСКИЙ РЕДАКТОР  
Л. П. Чуркина

КОРРЕКТОР  
Р. Л. Вибке

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

ТИТУЛЬНАЯ НАДПИСЬ,  
ШРИФТОВЫЕ РАБОТЫ:  
В. В. Ефимов

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

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

## На обложке



## АЭРОДИНАМИКА АППАРАТОВ, ДВИЖИМЫХ МУСКУЛЬНОЙ СИЛОЙ ЧЕЛОВЕКА

Полностью обтекаемый трехколесный велосипед «Вектор сингл». Велосипедист вращает педали, откинувшись на спину, почти лежа. В конструкции велосипеда воплощены последние достижения в области аэродинамики колесных средств передвижения, приводимых в действие с помощью педалей (см. статью А. С. Гросса, Ч. Р. Кайла и Д. Дж. Мэйлуики «Аэродинамика аппаратов, движимых мускульной силой человека» на с. 74). «Вектор сингл» разработан и построен группой конструкторов под руководством Аллана А. Войгта, президента фирмы Versatron Research, Inc. Войгт считает, что эта трехколесная машина теоретически способна развить скорость почти 100 км/ч на ровной поверхности при затратах мощности велосипедистом 1 л.с. Похожая модель «Вектор тандем», приводимая в движение двумя гонщиками, расположенными спиной друг к другу, пока удерживает рекорд скорости 101,26 км/ч, которая была достигнута при затратах мощности каждого велосипедиста чуть больше 1 л.с. На участке автотрассы протяженностью 64 км средняя скорость тандема была 81,3 км/ч.

## Иллюстрации

ОБЛОЖКА: Ted Lodigensky

| СТР. АВТОР/ИСТОЧНИК                                                         | СТР. АВТОР/ИСТОЧНИК                                                                           | СТР. АВТОР/ИСТОЧНИК   |
|-----------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| 5 Wärtsilä                                                                  | University of California at Los Angeles                                                       | 79 Walken Graphics    |
| 6—10 Walken Graphics                                                        |                                                                                               | 84—90 Gabor Kiss      |
| 13—19 National Aeronautics and Space Administration, U.S. Geological Survey | 41 Irving Geis                                                                                | 92, 93 Frode Wissing  |
| 20—22 Ian Worpole                                                           | 42 Richard E. Dickerson, Molecular Biology Institute, University of California at Los Angeles | 94—96 Michael Goodman |
| 23 John T. Trauger, California Institute of Technology                      | 43 Irving Geis                                                                                | 99—103 Ilil Arbel     |
| 27 Caroline Quillian Stubbs                                                 | 44 Richard E. Dickerson, Molecular Biology Institute, University of California at Los Angeles |                       |
| 28—32 Alan D. Iselin                                                        | 45—47 Irving Geis                                                                             |                       |
| 35 Nelson Max, Lawrence Livermore National Laboratory                       | 51—60 George V. Kelvin                                                                        |                       |
| 36—39 Irving Geis                                                           | 65—71 Tom Prentiss                                                                            |                       |
| 40 Richard E. Dickerson, Molecular Biology Institute,                       | 75 Bruce A. Sargeant                                                                          |                       |
|                                                                             | 76, 78 Walken Graphics                                                                        |                       |
|                                                                             | 77, 80, 81 Albert E. Miller                                                                   |                       |



## Об авторах

John D. Harbron (ДЖОН Д. ХАРБРОН «Современные ледоколы») — специалист по внешнеполитическим вопросам в издательской фирме Thomson Newspaper Group в Канаде. Его карьера профессионального писателя тесно связана с давним интересом к морю и кораблям. По окончании Университета в Торонто и аспирантуры в Гаванском университете Харброн поступил на службу в канадские ВМС, где, будучи офицером, преподавал историю военно-морских сил в Колледже канадских ВМС. После ухода в отставку в звании капитана 3-го ранга Харброн работал в редакциях газет "Business Week" и "Toronto Telegram" и одновременно был корреспондентом ряда английских и канадских морских газет и журналов. Оставив работу в "Toronto Telegram", он перешел в издательскую фирму Thomson.

Torrence V. Johnson, Laurence A. Soderblom (ТОРРЕНС В. ДЖОНСОН, ЛОУРЕНС А. СОДЕРБЛОМ «Ию») были членами исследовательской группы НАСА, которая впервые получила крупномасштабные изображения многих тел Солнечной системы. Джонсон — астроном, степень бакалавра получил в Вашингтонском университете, а степень доктора философии в области планетологии — в Калифорнийском технологическом институте. Был сотрудником Лаборатории планетной астрономии НАСА и Национального совета по научным исследованиям. В настоящее время — старший научный сотрудник Лаборатории реактивного движения Калифорнийского технологического института. Джонсон был также членом групп по разработке зондов к внешним планетам Солнечной системы и получению изображений с «Вояджеров». Содерблом закончил Институт горного дела и технологии в Нью-Мексико, степень доктора философии в области планетологии и геофизики получил в Калифорнийском технологическом институте. С тех пор работает в Геологической службе США консультантом по физическим наукам.

Peter S. Wells (ПИТЕР С. УЭЛЛС «Сельские общины в начале раннего железного века на территории Центральной Европы») — доцент антропологии Гарвардского университета, помощник хранителя Музея европейской археологии Пибоди. С самого начала научная деятельность Уэллса постоянно была связана с Гарвардским университетом. В 1970 г. в Колледже Гарвардского университета он получил степень бакалавра гуманитарных наук, а в 1976 г. в Гарвардском университете защитил диссертацию на степень док-

тора философии в области антропологии. В процессе подготовки диссертаций Уэллс одновременно работал в Университете г. Тюбингена (ФРГ). Уэллс проявляет интерес к изучению экономических и социальных явлений в период бронзового и железного веков. Раскопки в Баварии, о которых идет речь в статье Уэллса, в настоящее время ведутся на обширной территории. Археологи пытаются найти в этом районе следы еще не открытых древних поселений, с тем чтобы получить новые данные о жизни обитателей Центральной Европы в последнем тысячелетии до н.э.

Richard E. Dickerson (РИЧАРД Э. ДИКЕРСОН «Спираль ДНК») — профессор биохимии и геофизики, директор Института молекулярной биологии Калифорнийского университета в Лос-Анджелесе. Свою научную деятельность начал в Технологическом институте Карнеги. Степень доктора в области физической химии получил в Миннесотском университете, после чего работал год в Кавендишской лаборатории Кембриджского университета в Англии. Вернувшись в Соединенные Штаты, четыре года работал в Иллинойском университете, затем перешел в Калифорнийский технологический институт, где в течение 18 лет занимался вопросами эволюции на молекулярном уровне, в частности исследовал кристаллическую структуру цитохрома с. С 1981 г. Дикерсон — сотрудник Калифорнийского университета; он изучает структуру кристаллов коротких фрагментов ДНК и их комплексов с противораковыми препаратами и белками — репрессорами считывания генетической информации.

Bryce S. DeWitt (БРАЙС С. ДЕ ВИТТ «Квантовая гравитация») — профессор физики Техасского университета в Остине и директор Релятивистского центра там же. Научные степени бакалавра, магистра и доктора получил в Гарвардском университете. После работы в различных научных учреждениях стал старшим научным сотрудником Радиационной лаборатории Калифорнийского университета в Беркли, затем — сотрудником физического факультета Университета шт. Северная Каролина в Чейпел-Хилл. Де Витт провёл в Северной Каролине 15 лет, в 1972 г. переехал в Техас.

Arthur T. Bergerud (АРТУР Т. БЕРГРЭД «Смена жертвы в простой экосистеме») ведет научно-исследовательскую работу в Университете г. Виктории (пров. Британская Колумбия, Канада). В 1956 г. окончил Колледж шт.

Орегон со степенью бакалавра. В 1961 г. в Висконсинском университете стал магистром в области биологии, после чего уехал на остров Ньюфаундленд в качестве сотрудника Отдела охраны дикой природы (через 11 лет Бергрэд стал директором Ньюфаундлендского отделения). В 1966 г. продолжил свое образование в Университете Британской Колумбии, где получил в 1968 г. степень доктора философии в области биологии. Изучает Ньюфаундлендскую популяцию оленей-карибу.

Albert C. Gross, Chester R. Kyle, Douglas J. Malewicki (АЛЬБЕРТ С. ГРОСС, ЧЕСТЕР Р. КАЙЛ, ДУГЛАС ДЖ. МЭЙЛУИКИ «Аэродинамика аппаратов, движимых мускульной силой человека») — все трое увлечены проблемой, которой посвящена статья, хотя каждый из них подходит к рассматриваемому вопросу со своей профессиональной точки зрения. Гросс, консультант по управлению и журналист, является президентом фирмы Action Research Associates, Inc. Имеет две степени бакалавра: одну в области американской истории (1969 г., колледж Колумбийского университета), другую в области психологии (1975 г., Университет в Сан-Диего). Получив вторую степень бакалавра, Гросс продолжал изучение экспериментальной психологии в Университете в Сан-Диего, где в 1976 г. ему присудили степень магистра гуманитарных наук. Кайл — профессор механики Калифорнийского университета в Лонг-Биче. Степень бакалавра получил в Университете шт. Аризона, а магистра и доктора технических наук — в Калифорнийском университете в Лос-Анджелесе. Помимо основной научной деятельности Кайл занимается изучением аэродинамики средств, движимых самим человеком. Он является автором многих публикаций по этой проблеме. Кайл — один из основателей и бывший президент Международной ассоциации развития средств передвижения, использующих мускульную силу человека. На сконструированных им моделях велосипедов с обтекаемой формой было установлено пять мировых рекордов скорости. Мэйлуики — директор фирмы Aero-visions, Inc., имеет степень магистра наук в области космической техники.

Donald D. Hoffman (ДОНАЛД Д. ХОФФМАН «Интерпретация зрительных иллюзий») — специалист в области психологии и вычислительной техники, ассистент Калифорнийского университета в Ирвине. Степень бакалавра получил в 1978 г. в Калифорнийском университете в Лос-Анджелесе, а степень доктора философии в области математической психологии — в 1983 г. в Массачусетском технологическом институте.



# Современные ледоколы

*Быстрые темпы развития ледоколостроения обусловлены постоянно возрастающими масштабами торговых перевозок в замерзающих морях. Современные ледоколы отличаются необычной конструкцией корпуса и движительного комплекса.*

*Наибольшее число ледоколов в настоящее время строится в Финляндии*

**ДЖОН Д. ХАРБРОН**

**З**НАЧИТЕЛЬНАЯ часть мировых торговых перевозок по морю, особенно в Северной Америке и северной Европе, осуществляется по трассам, проходящим в высоких широтах и скованным льдом на протяжении нескольких месяцев в году. Государства, пользующиеся этими трассами, имеют флот, насчитывающий примерно 100 ледоколов. Конструкция этих судов должна отвечать необычным условиям их эксплуатации, а управление ими требует особого искусства судовождения. В предстоящее десятилетие расширение добычи полезных ископаемых, например нефти, в различных районах, расположенных в высоких широтах, вероятно, вызовет более острую потребность в ледоколах.

Конструктивно ледоколы отличаются от других судов формой корпуса, его большой прочностью, особенно в оконечностях, мощной и высокоманевренной энергетической установкой и более прочным винто-рулевым комплексом. Форма корпуса ледокола характеризуется малой длиной при большой ширине. Например, у современных ледоколов, построенных в Финляндии — стране, судостроительные верфи которой спустили на воду около 60% судов мирового флота, такая форма достигается тем, что служебные и жилые помещения экипажа размещаются выше главной палубы. Тем самым в корпусе ледокола остается достаточно свободного пространства для главных и вспомогательных двигателей и другого машинного оборудования, а также гребных валов.

Если посмотреть на ледокол сбоку на стапеле, то можно увидеть и другую особенность его формы — небольшую осадку в носовой части, которая постепенно увеличивается к середине корпуса. Такая форма лучше всего отвечает основному назначению ледокола — созданию вертикальных усилий, необходимых для разрушения льда давлением, а не резанием. Необычная ширина ледокола позволяет сконцентрировать массу для эффективной ломки

льда. Такая конструкция к тому же позволяет снизить нагрузку на корпус, поскольку ледокол то и дело как бы садится на мель.

Понятно, что судно, выполняющее такую работу, должно иметь прочную носовую часть, поэтому форштевень изготавливают из стального литья или поковок, а носовая бортовая обшивка делается из стального листового проката толщиной 50 мм и прочно связывается с набором корпуса. Другие части корпуса также имеют высокую прочность. Непосредственному воздействию льда наиболее подвержены борта в районе ватерлинии, поэтому по всей длине корпуса в этой области устанавливается более прочная наружная обшивка, так называемый ледовый пояс. Раньше у многих ледоколов сварные швы ледового пояса корродировали и разрушались. На сталелитейном заводе в Раутаруукки в Финляндии была разработана новая марка стали, содержащая марганец, серу и кремния в которой было ограничено по сравнению с обычными марками. Сварные швы при использовании такой стали оказались более стойкими к низкотемпературным воздействиям морской воды, в которой обычно работают ледоколы.

**Г**РЕБНАЯ установка ледокола должна отвечать жестким требованиям, которые обусловлены перепадом нагрузок на двигатели в периоды вползания ледокола на лед и отхода его назад для нового набега или при работе передним ходом на свободной воде. В связи с этим на ледоколах устанавливаются такие двигатели, которые способны быстро набирать полные обороты. Двигатели же обычных судов набирают полные обороты медленно и при быстром наращивании мощности могут выйти из строя. Двигатели ледокола должны быть надежными в работе и развивать полную мощность во всем диапазоне скоростей вращения. Кроме того, они должны быть экономичными в потреблении топлива, поскольку

ледокол может продолжительное время находиться вдали от бункеровочных баз.

В эпоху пара на ледоколах применялись поршневые паровые машины. Сейчас же в основном используются дизель-электрические установки. На судах с такими установками дизель-генераторы питают гребные электродвигатели, которые в свою очередь вращают винты. В СССР построено несколько атомных ледоколов; первый из них, ледокол «Ленин», спущен на воду в 1957 г. На этих судах атомный реактор является источником тепла для генерации пара, питающего турбины. Использование атомной энергии выгодно тогда, когда ледокол большую часть времени работает вдали от бункеровочных баз, например в удаленных районах Арктики, в остальных случаях атомные установки экономически не могут конкурировать с дизель-электрическими.

Ледокол может иметь до четырех гребных винтов. У четырехвинтового судна два винта расположены в кормовой части и два в носовой. Носовые гребные винты хорошо работают в годовалых льдах, т.е. льдах, образовавшихся за одну зиму. Их толщина обычно не превышает 30 см (в некоторых районах, например в арктическом секторе Канады, годовалые льды могут достигать двухметровой толщины). Гребные винты в носовой части забирают воду из-под льда и тем самым ослабляют опору ледяного пласта, облегчая его разрушение. Затем винты отбрасывают отколотые льдины с потоком воды от носа судна и обеспечивают его продвижение вперед. При смене направления вращения этих винтов облегчается задний ход ледокола и, стало быть, повышается его маневренность. Опыт показал, что носовые гребные винты бесполезны в районах Арктики и Антарктики, так как арктический лед слишком твердый, а в Антарктике он очень толстый.

На вопрос о том, сколько у ледокола должно быть гребных винтов в кормо-





ФИНСКИЙ ЛЕДОКОЛ «Урхо» прокладывает новый канал во льдах Ботнического залива, проводя два грузовых судна. «Урхо» был первым судном этого класса ледоколов, построенных на верфи «Вяртсиля» в Хельсинки. Они имеют внушительные размеры (длина 104,6 м, ширина 23,8 м) и оборудова-

ны двумя носовыми и двумя кормовыми гребными винтами. Эффективная мощность 22 тыс. л.с. обеспечивается дизель-электрической установкой. Финляндия поддерживает канал судоходным круглый год.



вой части, однозначного ответа нет. Это зависит от того, какую пропульсивную силу они должны создавать, что в свою очередь определяется теми ледовыми условиями, для работы в ко-

торых предназначен ледокол. У некоторых типов ледоколов с двумя гребными валами, включая ледоколы, построенные в 60-е годы, и ледоколы класса R морской береговой охраны

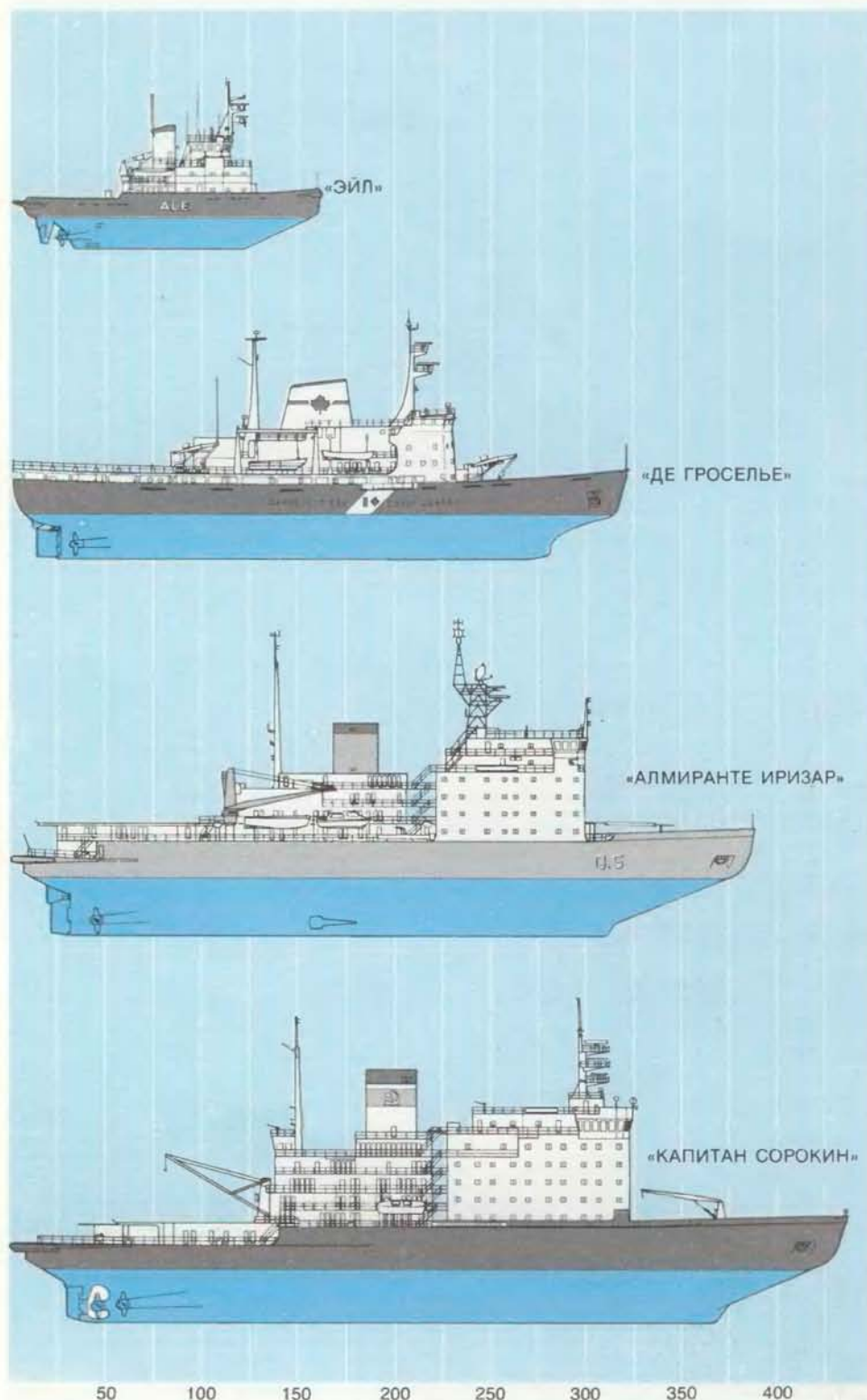
Канады, построенные в 70-е годы, лопасти гребных винтов часто изгибались и даже ломались, а валы давали трещины.

Одним из возможных решений этой проблемы является создание ледоколов с тремя кормовыми гребными винтами — одним средним и двумя бортовыми. Но и при таком расположении гребные винты могут выходить из строя, как это было, например, у двух ледоколов класса «Поляр» морской береговой охраны США. Поломка винтов, по-видимому, происходила в связи с тем, что ледоколы, на которых они были установлены, предназначались как для прокладки каналов во льдах Арктики, так и для снабженческих и исследовательских целей в Антарктике, и поэтому суммарная мощность на валах была чрезмерно большой для корпусов данного размера. В результате этого корпуса судов хронически вибрировали. Эффективная мощность каждого из этих ледоколов 60 тыс. л.с. (больше, чем на любом неатомном ледоколе): 42 тыс. л.с. развивает газотурбинный двигатель, который приводит в движение основной вал при ходе во льдах, и 18 тыс. л.с. — дизель-электрическая установка, работающая на бортовые винты, когда судно идет в свободной воде, например при переходе в Антарктику.

**П**ОСКОЛЬКУ ледокол конструктивно представляет собой высокоспециализированное судно, рассчитанное на суровые условия, управление им требует особого искусства судовождения. При прокладывании канала во льдах, например, ледокол может работать в двух режимах — непрерывный ход и движение набегам. При непрерывном ходе судно постоянно движется вперед со скоростью от 3 до 5 узлов сквозь лед толщиной до 1,5 м. Этот способ приемлем только при условии, если лед имеет довольно ровную поверхность и оказывает судну сопротивление средней величины. Такие условия обычны для ряда районов, в которых ледоколы работают регулярно. К ним, в частности, относятся Ботнический и Финский заливы, отдельные районы арктических секторов Канады и СССР, Великие озера, река и залив Св. Лаврентия.

При работе набегам ледокол вползает на лед и, когда лед откалывается, отходит назад на расстояние, в несколько раз превышающее его длину, затем опять идет вперед, набегая на ледяную кромку. Этот способ используется тогда, когда лед очень толстый, твердый или имеет неровную поверхность.

Высокое мастерство судовождения требуется и в случае заклинивания, когда ледокол застревает во льдах, что бывает весьма часто. Так, ледокол морской береговой охраны США «По-



ЧЕТЫРЕ ТИПА ЛЕДОКОЛОВ изображены в одном масштабе. Ледокол «Эйл» предназначен для прокладки каналов во льдах и буксировки судов в реках, заливах и озерах с умеренной степенью замерзания (Великие озера, Балтийское море). «Де Гроселье» — представитель ледоколов класса R морской береговой охраны Канады работает на реке и в заливе Св. Лаврентия, а летом в Арктике. «Алиманте Иризар» построен в Финляндии для Аргентины и используется в Антарктике как ледокол и как научное судно. «Капитан Сорокин» — советский ледокол. Нос ледокола имеет характерный скос и утолщенную облицовку. Это позволяет ледоколу вползать на лед, который ломается под тяжестью судна.



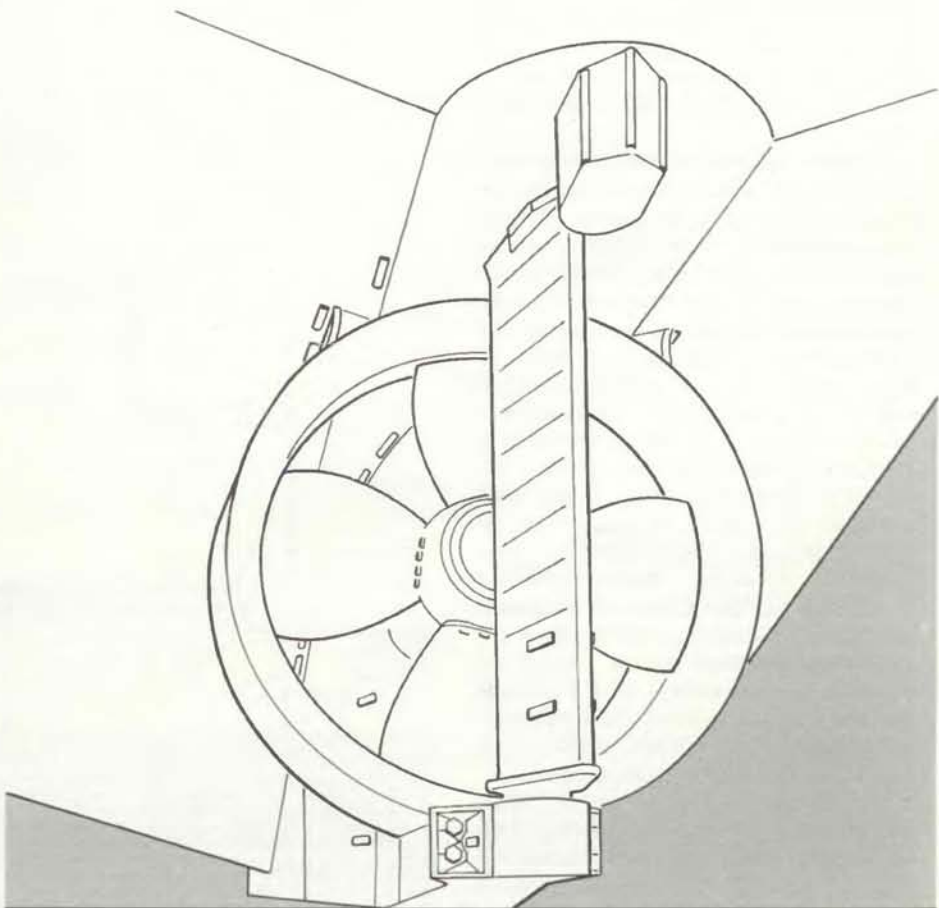
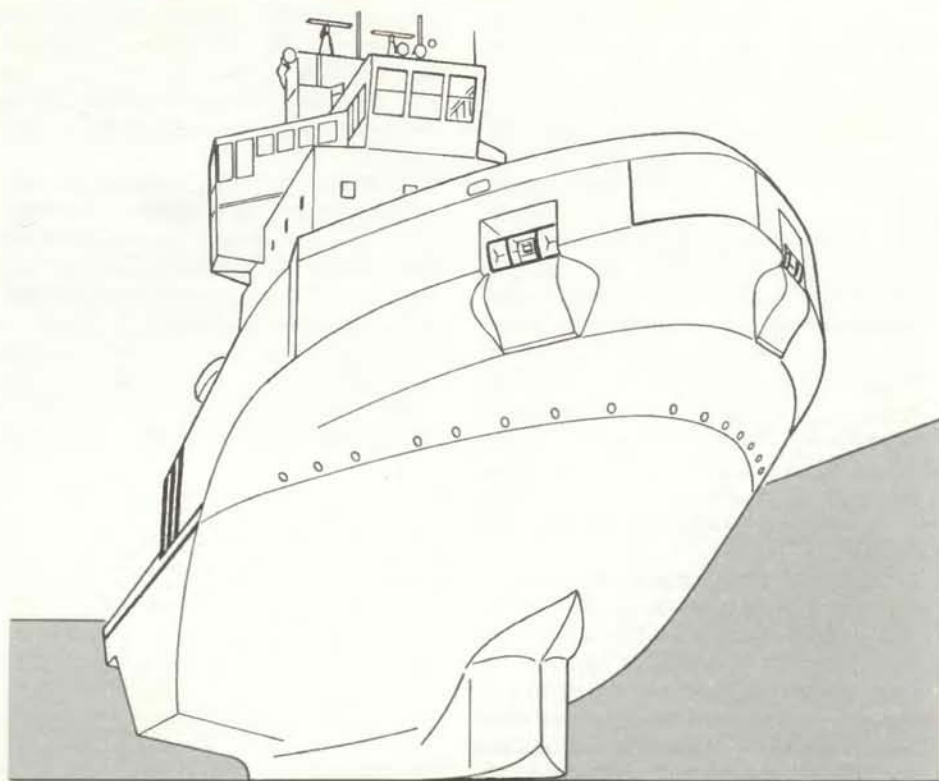
лар-Си» оказался зажатым во льдах Чукотского моря к северу от Аляски и оставался там с февраля по май 1981 г. (Самое лучшее, что смогла предпринять береговая охрана в создавшейся ситуации, — это использовать ледокол в качестве плавучей исследовательской станции, назвав ее «Дрейфующая полярная морская станция-81».)

Наличие носовых и кормовых гребных винтов повышает маневренность ледокола и дает больше шансов не застрять во льдах. На старых ледоколах все еще практикуется и такой способ борьбы с заклиниванием, как раскачивание судна с борта на борт путем перекачки жидкого балласта или горючего из одной бортовой креновой цистерны в другую. Используя подобным образом дифференциальные цистерны в носовой и кормовой оконечностях, можно обеспечить раскачивание судна в продольном направлении.

На современных ледоколах для этих целей устанавливается пневматическая оmyивающая система, разработанная и запатентованная финской судостроительной фирмой «Вяртсиля», которая является самым крупным в мире поставщиком ледоколов. Эта система обеспечивает снижение трения корпуса судна о лед или снег. Сжатый воздух пропускается через ряд сопел, расположенных на определенном интервале друг от друга в нижней части корпуса. Пузырьки воздуха, поднимаясь вдоль корпуса, образуют направленный поток смеси воды и воздуха, которая служит смазывающей прослойкой между корпусом и льдом. При скоростях менее двух узлов система снижает трение почти вдвое по сравнению с обычными условиями. По мере увеличения скорости хода судна эффективность этой системы падает, но даже при скорости пять узлов трение снижается примерно на 15%.

Многие считают, что лед, покрывающий поверхность моря, представляет собой почти однородный пласт, изменяющийся только по толщине. В действительности же формации льдов весьма разнообразны — от непроходимых шельфовых льдов в Антарктике (возраст которых достигает 100 лет) и паковых арктических льдов до зимних льдов Балтийского моря, Великих озер, реки и залива Св. Лаврентия. Специалисты, связанные с эксплуатацией ледоколов, должны учитывать эти разновидности льдов.

**П**РИМЕРНО до 1966 г. государственные ведомства США, Канады и СССР, связанные с вопросами судоходства во льдах Арктики и Антарктики, пользовались слишком обобщенной классификацией льдов, в которой выделялись четыре их основных вида: новые, молодые (ниласовые), зимние и полярные. С увеличением числа ледо-



**КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ** канадского ледокола «Канмар Кигориак», предназначенного для защиты буровых платформ в море Бофорта. Ледокол имеет ложкуобразную форму носа, специальный выступ и один гребной винт с защитной насадкой. Считается, что такая форма носа обеспечивает минимальные затраты энергии при разрушении тонкого льда. Заостренный выступ, врезаясь в лед, облегчает поворот судна. Защитная насадка предотвращает фрезеровку льда винтом. Ледокол, кроме того, имеет увеличенную площадь руля.



колов и появлением новых средств, позволяющих оценить ледовую обстановку, таких, как авиаразведка и фотографирование со спутников Земли, обобщенная классификация льдов перестала отвечать требованиям судовождения. Для обеспечения эффективной работы ледоколов теперь все страны, осуществляющие морские перевозки на трассах, пролегающих в зоне замерзающих вод, где учет ледовой обстановки может иметь существенное значение, пользуются более детальной системой классификации льдов. В данной статье приводятся классификация льдов и определения их видов, принятые в Канаде, хотя в других странах имеются свои аналогичные классификации, которые включают те же виды льдов.

Начнем с определения понятия свободной, или чистой, воды, под которой в соответствии с «Морским атласом Канады» понимается «вода, площадь покрытия льдом которой не превышает одной десятой». Другим важным понятием является годовалый лед. Так именуется лед, образовавшийся в минувшую зиму и сохранившийся до начала нового осеннего ледообразования. Двухлетний лед — это годовалый лед, не растаявший летом и находящийся во втором цикле нарастания. Многолетний лед (арктический пак) — лед, просуществовавший более двух лет.

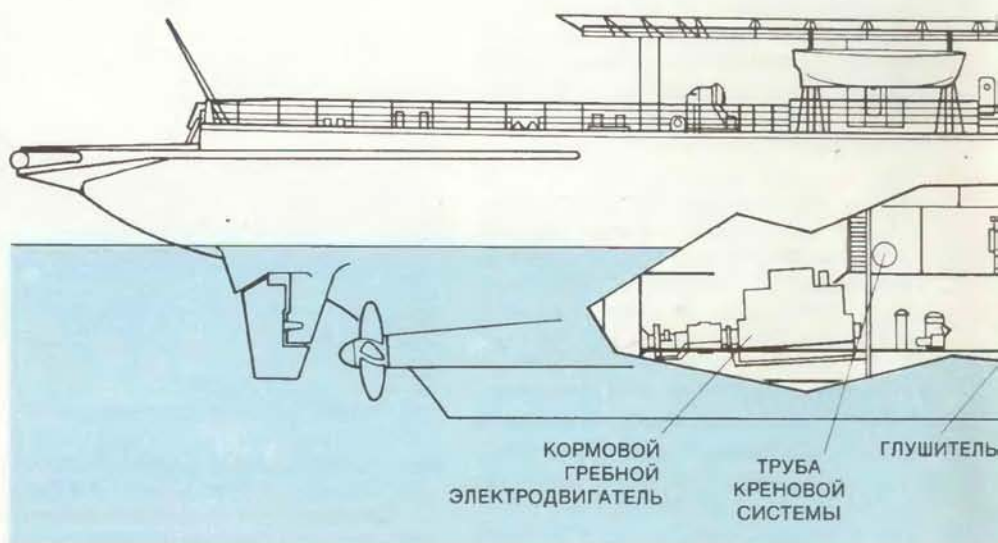
Помимо указанных разновидностей существуют и другие формации льдов, которые могут оказаться либо труднопреодолимыми, либо совсем непроходимыми для ледоколов, в зависимости от протяженности этих льдов. К таким формациям относится, например, наслоенный лед, образованный наплывом льдин. Другой разновидностью являются торосистые нагромождения — взломанные льды, хаотически взгроможденные друг на друга в результате происходящих в море динамических процессов. Поверхность ледяного покрова, образованного торосистыми льдами, характеризуется большими неровностями. Столкновение ледяных массивов приводит к образованию ледяной гряды, осадка которой может достигать 15 м. Наконец, следует упомянуть о снежном покрове, способном существенно снизить эффективность работы ледокола.

Как правило, в Ботническом и Финском заливах, в заливе Св. Лаврентия и на Великих озерах, а также в районах северо-западного и северо-восточного побережий США с середины декабря по середину мая толщина ледяного покрова бывает от 30 до 90 см. Более суровые условия для ледоколов складываются в арктическом секторе Канады, в высокоширотных водах СССР и скандинавских стран, где продление навигации на период, захватывающий частично зи-

му и всю весну, требует дополнительных усилий. Финляндия поддерживает Ботнический залив открытым круглый год для обеспечения перевозки грузов между множеством своих портов в том районе.

Особенности, характерные для арктического сектора Канады, свойственны и другим основным ледовым районам. Этот сектор простирается на 3 тыс. миль от острова Баффинова Земля до северного побережья Аляски и на 2 тыс. миль на север от арктического побережья Канады до Северного полюса с основными проходами между островами. В нем имеются районы с

различными видами ледовых образований. В каждом из этих районов постоянно ведутся наблюдения за состоянием льда и моря, направлением и силой ветра и другими климатическими факторами; любой из них может непредсказуемо меняться в период работы ледокола. Т. К. Пуллен, бывший капитан канадских ВМС и специалист по ледоколам, говорит в этой связи следующее: «Мы наталкиваемся на непроходимые льды там, где, по предварительным данным, их не должно быть, и это лишний раз доказывает, что условия плавания в Арктике полны неожиданностей».



ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА ледокола «Урхо» и других ледоколов этого класса занимает почти все пространство под главной палубой. Для размещения установки под палубой жилые и служебные помещения вынесены в надстройку. По



**РАЗНООБРАЗИЕМ** льдов обусловлена широкая разновидность конструкций ледокольных средств. Для их рассмотрения вновь обратимся к стандартам, действующим в Канаде. Несколько лет назад канадским правительством были введены «Правила по предотвращению загрязнения окружающей среды при плавании в арктических водах» — документ, который одновременно устанавливает нормы по охране природы в районе Арктики в связи с появлением в ее водах все более крупных судов и регламентирует конструкцию арктических судов. «Правила» содержат определения ледоколов и судов с

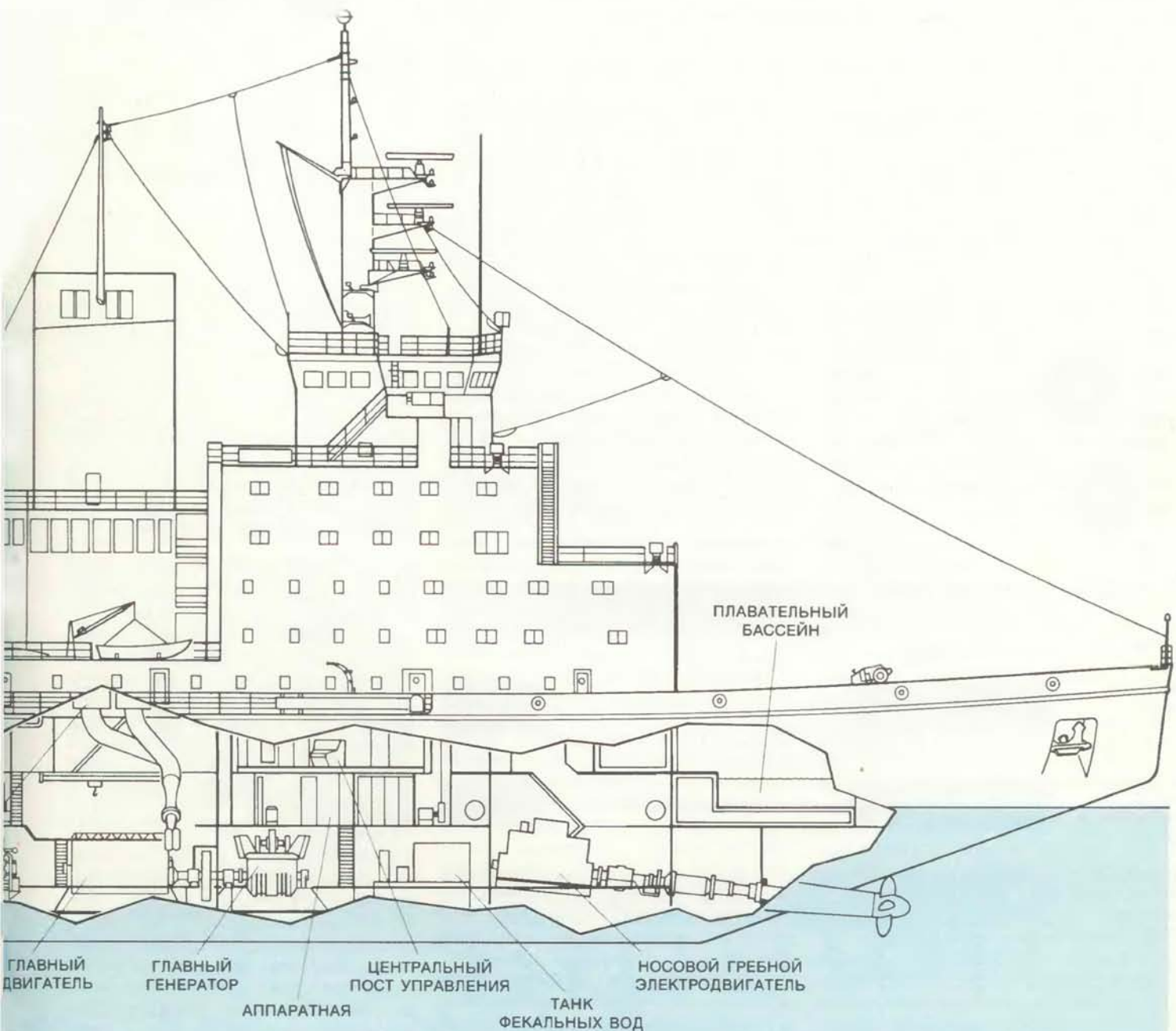
ледовыми подкреплениями от первого до десятого арктического класса.

Приведем несколько примеров, демонстрирующих широкое разнообразие типов судов, определяемых «Правилами». Судно арктического класса 3 может развивать скорость три узла во льдах толщиной 0,9 м. Судно класса 7 может идти со скоростью три узла в режиме непрерывного хода во льдах толщиной 2,1 м.

Ледоколы балтийского типа, строящиеся преимущественно в Финляндии и СССР для работы в годовалых льдах, по определению «Правил», можно отнести к судам класса 3 или 4. Более

жесткие требования предъявляются к крупным ледоколам арктического класса 8, предназначенным для круглогодичной работы в таких условиях, как арктический сектор Канады. Первый ледокол подобного типа пока только планируется построить в Канаде.

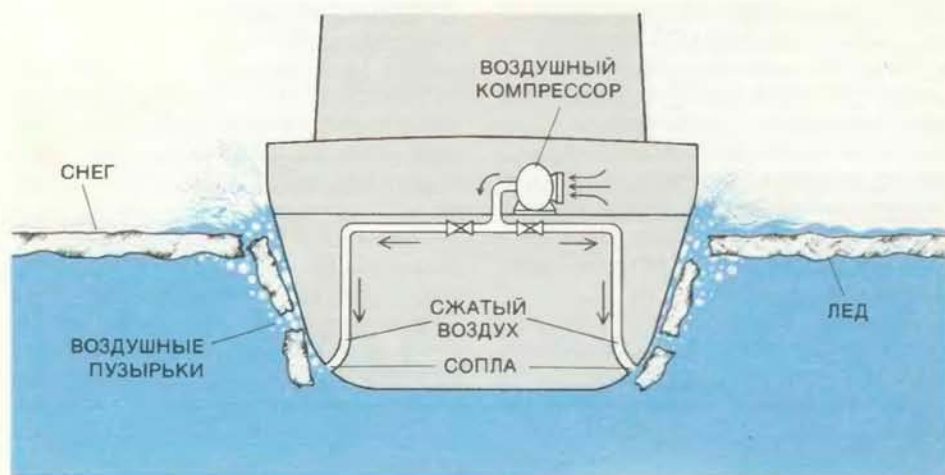
Самыми мощными современными ледоколами являются два почти одинаковых советских атомохода «Арктика» (переименованный в «Леонид Брежнев») и «Сибирь», которые в соответствии с канадскими «Правилами» можно отнести к классам 5 — 7. Водоизмещение каждого из них 35 тыс. т, а



трубам креновой системы вода перекачивается между бортовыми цистернами, когда необходимо раскатать судно, чтобы избежать заклинивания во льдах. Носовые гребные

винты отсасывают воду из-под льда, его опора ослабляется, и он легче ломается. Такой режим работы наиболее эффективен, когда толщина льда не более 0,3 м.





**ПНЕВМАТИЧЕСКАЯ ОМЫВАЮЩАЯ СИСТЕМА** была разработана фирмой «Вяртсиля» как альтернатива раскачиванию — методу борьбы с заклиниванием судна. Сжатый воздух выходит через сопла, расположенные вдоль корпуса. Создаваемый при этом интенсивный поток смеси воды и воздуха образует слой, снижающий трение корпуса о лед.

эффективная мощность составляет 75 тыс. л.с.

Американские, аргентинские, японские и западногерманские ледоколы для Антарктиды — это суда многоцелевого назначения в отличие от тех, которые работают в Северном полушарии. Эти суда должны не только работать во льдах, но и преодолевать большие расстояния в открытом море на пути в Антарктику, где они выполняют также функции научно-исследовательских и снабженческих судов. Поэтому такие ледоколы имеют дополнительные каюты для научных работников, посадочные площадки для вертолетов, совершающих ледовую разведку, и оборудованы палубными кранами большой грузоподъемности, грузовыми элеваторами и специальными трюмами для размещения грузов, достав-

ляемых на национальные базы в Антарктике.

К таким судам относится аргентинский ледокол «Алмиранте Иризар», построенный на верфи «Вяртсиля» и сданный в эксплуатацию в 1979 г. Одной из отличительных особенностей этого судна является установленная на нем система посадки вертолетов, изготовленная в Канаде. Оснащение такой системой вызвано тем, что это судно с коротким и широким корпусом имеет малую осадку, и поэтому при шторме в открытом море его может кренить до 40°. Спускаемый с вертолета трос зацепляется специальным устройством к палубе и затем медленно выбирается до полной посадки вертолета. По полосу, проложенному на палубе, вертолет буксируется в ангар. Ледокол, кроме того, оснащен двумя 16-тонны-

ми гидравлическими подъемными кранами для разгрузки судна, электрической буксирной лебедкой с устройством контроля натяжения буксирного троса (которое постоянно удерживает трос в натянутом состоянии во время буксировки), рассчитанной на максимальное тяговое усилие 60 т, а также пневматической омывающей системой.

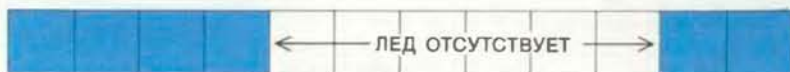
Самым мощным ледокольным флотом располагает СССР. Это единственная в мире страна, имеющая атомные ледоколы, которые работают круглый год. Даже многие советские торговые, в том числе и многоцелевые, контейнерные суда (примерно соответствующие арктическому классу 2), предназначены для активного ледового плавания и способны самостоятельно продвигаться в умеренных льдах. (Торговые суда многих других стран имеют только незначительное ледовое подкрепление.) Как правило, ледвейт (валовая грузоподъемность) этих судов равен 18 тыс. т, они имеют малую осадку и оснащены пневматической омывающей системой. Суда такого типа способны проходить по крупным сибирским рекам, впадающим в моря Арктики.

Советские ледоколы преодолевают огромные расстояния в северных морях, и, кроме того, в зимнее время они работают во льдах Финского залива, Балтийского, Черного и Каспийского морей, а также рек Енисея, Оби и Лены. Наиболее показательной является караванная проводка ледоколами судов в западной части арктического сектора СССР, где постоянно возрастает объем перевозок из Мурманска через Баренцево и Карское моря в устье Енисея, а затем вверх вплоть до порта Дудинка, через который из Игарки и Норильска отправляют лес и никель.

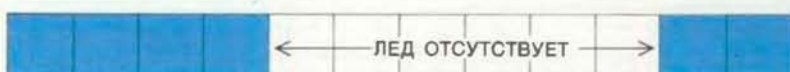
АРКТИЧЕСКИЕ  
СЕКТОРЫ  
КАНАДЫ  
И США



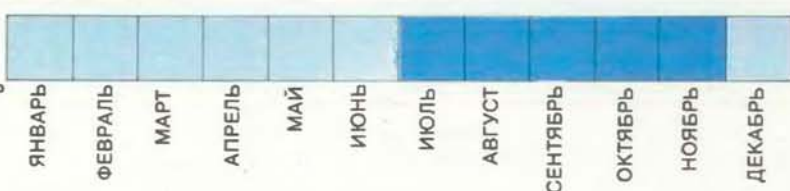
ВЕЛИКИЕ  
ОЗЕРА



БОТНИЧЕСКИЙ  
ЗАЛИВ И  
БАЛТИЙСКОЕ  
МОРЕ



ЗАПАДНАЯ  
ЧАСТЬ АРКТИ-  
ЧЕСКОГО  
СЕКТОРА СССР



**СРОКИ ПЛАВАНИЯ** ледоколов в основных зонах замерзания воды. Период ледостава отмечен цветными полосами. Темная зона соответствует периоду плавания ледоколов.

**ВОЗМОЖНО**, что построенное недавно в Канаде судно «Канмар Кигориак» фирмы Dome Petroleum Limited послужит основой для создания ледоколов будущего. Это канадское судно в основном предназначено для защиты ото льда буровой установки фирмы Dome в море Бофорта и для оказания помощи арктическому флоту этой фирмы, включающему буровые суда с ледовыми подкреплениями, буксиры и самоходные баржи.

Особенностью ледокола «Канмар Кигориак» является то, что для работы в суровых ледовых условиях западной части арктического сектора Канады он имеет всего один гребной винт в отличие от всех других канадских ледоколов, имеющих два или три винта. Создатели судна считают, что такая конструкция позволит избежать «один из главных недостатков двух- и трехвинтовых ледоколов, заключающийся в том, что бортовые винты постоянно фрезеруют лед, что снижает их эффек-



тивность». Гребной винт ледокола защищен специальной кольцевой насадкой, которая отводит в сторону большие льдины, а мелкие льдины легко перемалываются. Ледокол имеет также носовое и кормовое подруливающие устройства и увеличенную площадь руля, что обеспечивает судну повышенную маневренность.

Другой особенностью судна является необычная форма корпуса. Нос ледокола в форме ложки должен обеспечивать минимальные затраты энергии при работе в тонких льдах. В том месте, где нос ледокола переходит в среднюю часть корпуса, предусмотрен заостренный выступ, который врежется в лед на небольшую глубину и тем самым создает точку опоры и облегчает поворот судна. О возможностях ледокола можно судить по словам его владельцев, которые заявляют, что он преодолевает годовалый лед толщиной 1,73 м, сморози из многолетних льдов толщиной до 10 м и годовалые торосы толщиной подводной части до 13 м.

«Канмар Кигориак» послужит прототипом гигантского судна — ледокола-танкера с дедвейтом 200 тыс. т, который фирма Dornier намерена построить в 90-х годах. Размеры судна рассчитаны на основе предполагаемого объема перевозок нефти, которая будет добываться в море Бофорта. С этой задачей смогут справиться только такие большие и мощные суда, рассчитанные на работу на северо-западной трассе в течение всего года.

Если Канада построит ледокол арктического класса 8, он будет самым большим неатомным ледоколом в мире. «Полар 8», как он называется на стадии разработки, будет иметь длину 194 м, ширину 32,2 м и осадку 13 м. При водоизмещении 37 тыс. т и эффективной мощности 100 тыс. л.с. судно внесет существенные изменения в существующие стандарты на конструкции ледоколов, которые предусматривают определенное соотношение величины водоизмещения и эффективной мощности. Для неатомных ледоколов типичным является соотношение: весовое водоизмещение 15 тыс. т и эффективная мощность 20 тыс. л.с. Такие характеристики имеют ледоколы класса «Капитан Сорокин», построенные на верфи «Виртсия» для Финляндии, СССР и Аргентины. «Полар 8» будет первым ледоколом, способным работать при любой погоде в ледовых условиях Арктики, которые являются чрезвычайно суровыми для современных ледоколов США и Канады.

## Особенности спектров квазаров

«ВИЗИТНОЙ карточкой» квазара является определенный набор линий в спектре, очень сильно смещенных от их обычных положений. Наиболее яркий пример представляют линии серии Лаймана. Они обусловлены переходом электронов в атоме водорода с возбужденных уровней (состояний) на основной, характеризующийся минимальной энергией, с испусканием фотонов (квантов света). В лабораторных условиях линии серии Лаймана наблюдаются в ультрафиолетовой области спектра; самая интенсивная из них — линия  $L\alpha$  — имеет длину волны 1216 Å. Однако в спектре типичного квазара линии серии Лаймана имеют в несколько раз большую длину волны и располагаются в видимой области спектра. Согласно наиболее широко распространенному представлению, квазары — это источники энергии, находящиеся в ядрах недавно родившихся галактик, сильно удаленных от нас в пространстве и времени. Смещение линий в спектрах квазаров рассматривается как космологическое красное смещение.

Работы У. Саржента из Калифорнийского технологического института и А. Боксенберга из Университетского Колледжа в Лондоне позволяют поинному взглянуть на исследование некоторых линий  $L\alpha$  в спектрах квазаров. Это не эмиссионные линии, а линии поглощения, представляющие собой «провалы», а не пики в спектре. Они появляются вследствие того, что электроны в атомах водорода поглощают излучение квазара в широкой полосе; при этом атомы переходят из основного в возбужденное состояние с более высокой энергией. В спектре одного квазара число линий поглощения  $L\alpha$  может превышать 100. Каждая линия имеет длину волны, большую 1216 Å, но меньшую длины волны смещенной к красному концу спектра эмиссионной линии самого квазара. Саржент и Боксенберг предположили, что эти линии возникают при поглощении излучения квазара облаками водорода, расположенными на различных расстояниях от него на луче зрения. Каждое облако должно удалиться от Земли с некоторой скоростью, меньшей скорости квазара, и поэтому атомы водорода в облаках будут поглощать излучение квазара, давая линии с разным красным смещением. «Частокол» соответствующих линий  $L\alpha$  позволяет использовать излучение квазаров как зонд для исследования водородных облаков в межгалактическом пространстве.

Саржент и Боксенберг выделяют эту область спектра, удаляя все остальные

линии. В спектре типичного квазара наблюдаются некоторые сильные линии поглощения, лишь незначительно смещенные от обычных положений. Они связаны с поглощением излучения квазара такими элементами, как углерод, кислород, кремний, железо и магний, которые входят в состав газопылевой среды нашей Галактики. Другие, более слабые линии оказались линиями поглощения водорода, которые сопровождаются линиями поглощения тяжелых элементов с таким же красным смещением. Они обязаны своим происхождением поглощению излучения квазара веществом других галактик, находящихся на луче зрения. Наконец, имеются линии водорода, характеризующиеся множеством разных красных смещений. Это и есть «частокол» линий  $L\alpha$ ; они не сопровождаются линиями более тяжелых элементов. Саржент и Боксенберг вычислили, что отношение содержания тяжелых элементов к водороду не превышает одной тысячной доли значения, которое определено для Солнца. По-видимому, облака, вызывающие это поглощение, состоят из первичного водорода, который еще никогда не конденсировался в звезды.

Постепенно выясняются свойства этих облаков. Так, Саржент и Боксенберг обратили внимание на то, что по спектрам квазаров, расположенных на небольшом расстоянии друг от друга, можно узнать размер облаков. Им уже удалось показать, что «частоколы» линий  $L\alpha$  в спектрах двух квазаров с возрастом 10 млрд. световых лет, находящихся на расстоянии одной угловой минуты друг от друга, не совпадают. По-видимому, облака имеют размер меньше 0,5 мегапарсека — примерного размера скопления галактик. Что касается более общих свойств, то, как сообщают Саржент и Боксенберг, образующие «частокол» линии  $L\alpha$  не проявляют тенденции группироваться вокруг определенных значений красного смещения; следовательно, облака не скапливаются в пространстве. Этим они отличаются от галактик. Тем не менее при больших красных смещениях линий больше. Таким образом, отношение числа облаков к числу галактик возрастает с расстоянием от нас — как в пространстве, так и во времени. Иными словами, на раннем этапе расширения Вселенной облака были более многочисленны. Какова причина уменьшения их числа? Ею не может быть гравитационное сжатие, иначе в облаках образовались бы звезды. Саржент и Боксенберг предполагают, что вещество облака удерживается давлением окружающей межгалактической среды — газа, состоящего из водорода, атомы которого ионизованы фотонами квазаров.



# Ио

*Самый активный в Солнечной системе вулканизм обнаружен на Ио, одном из спутников Юпитера. Гейзероподобные эруптивные колонны и массивные лавовые потоки свидетельствуют о присутствии необычных вулканических расплавов. Источник их энергии — гравитационное воздействие Юпитера*

**ТОРРЕНС В.ДЖОНСОН, ЛОУРЕНС А.СОДЕРБЛОМ**

**В** СОВРЕМЕННУЮ эпоху планетных исследований спутник Юпитера Ио, открытый Галилеем почти 400 лет назад, предстал перед нами как один из самых удивительных объектов Солнечной системы. Сначала в 60-х годах астрономы открыли, что Ио каким-то образом модулирует интенсивные всплески радиоизлучения, генерируемого Юпитером. К тому же наземные наблюдения Ио с помощью чувствительных инструментов подтвердили, что спутник отражает свет как свежеснежный снег, но при этом он желтый, как апельсин. Эти наблюдения поставили перед учеными ряд трудных вопросов относительно химического состава поверхности Ио. Затем в 70-х годах было обнаружено, что Ио выбрасывает в магнитосферу Юпитера (область, в которой заряженные частицы захвачены магнитным полем планеты) огромные облака ионов и нейтральных атомов. Наконец, системы Юпитера достигли космические аппараты. В 1979 г. с пролетных траекторий «Вояджера-1» и «Вояджера-2» впервые были переданы изображения Ио крупным планом.

Сегодня Ио выглядит более удивительной, чем прежде. Разогретая приливным воздействием Юпитера, Ио, по-видимому, является «рекордсменом» по вулканизму в Солнечной системе. Вулканическая активность Ио выше, чем Земли. Выбросы из огромных вулканических гейзеров достигают высоты нескольких сотен километров. На магнитосферу Юпитера воздействует вещество вулканического происхождения, покинувшего разреженную атмосферу Ио в результате какого-то еще недостаточно понятого процесса. Именно это вещество и определяет темп радиоизлучения Юпитера и вызывает самые разнообразные явления, такие, как полярные сияния на Юпитере, а также всплески радиоизлучения самой планеты и спутников. Открытия, сделанные с помощью «Вояджеров», повлекли за собой множество новых вопросов. Поэтому результаты, опи-

санные в этой статье, нельзя считать окончательными. Это всего лишь репортаж о продолжающихся исследованиях удивительного небесного объекта.

**И**О — ОДИН из регулярных спутников Юпитера. Регулярными называют спутники, которые движутся по орбитам, близким к круговым и лежащим в плоскости экватора планеты, поэтому считается, что они образовались вместе с Юпитером в результате примерно такого же процесса, как планеты Солнечной системы. Ио находится на расстоянии 350 000 км от наблюдаемой границы облаков Юпитера (примерно на таком же расстоянии от Земли находится Луна), т.е. это — ближайший к планете из четырех крупнейших спутников Юпитера, открытых Галилеем. Ио и Европа (следующий по удаленности от планеты галилеев спутник) имеют примерно такие же размеры, как Луна, и плотность, характерную для твердых горных пород: 3,5 и 3 г/см<sup>3</sup> соответственно. Ганимед и Каллисто — самые внешние из четырех галилеевых спутников — большего размера (примерно с Меркурием), а плотность их значительно ниже, около 2 г/см<sup>3</sup>. Очевидно, они наполовину состоят из льда, а наполовину — из скальных пород, преимущественно силикатов. Изменение плотности от внутренних галилеевых спутников к внешним часто называли гладким, но его скорее следует считать бимодаль-

ным. Согласно расчетам, масса силикатов в Ганимеде и Каллисто примерно такая же, как полная масса Ио и Европы. Таким образом, все четыре спутника можно считать похожими, хотя внутренние спутники потеряли свои летучие вещества, главным образом воду. (Считается, что Европа покрыта льдом, но, судя по ее средней плотности, это лишь поверхностный слой, толщина которого не превышает 1/20 ее радиуса.)

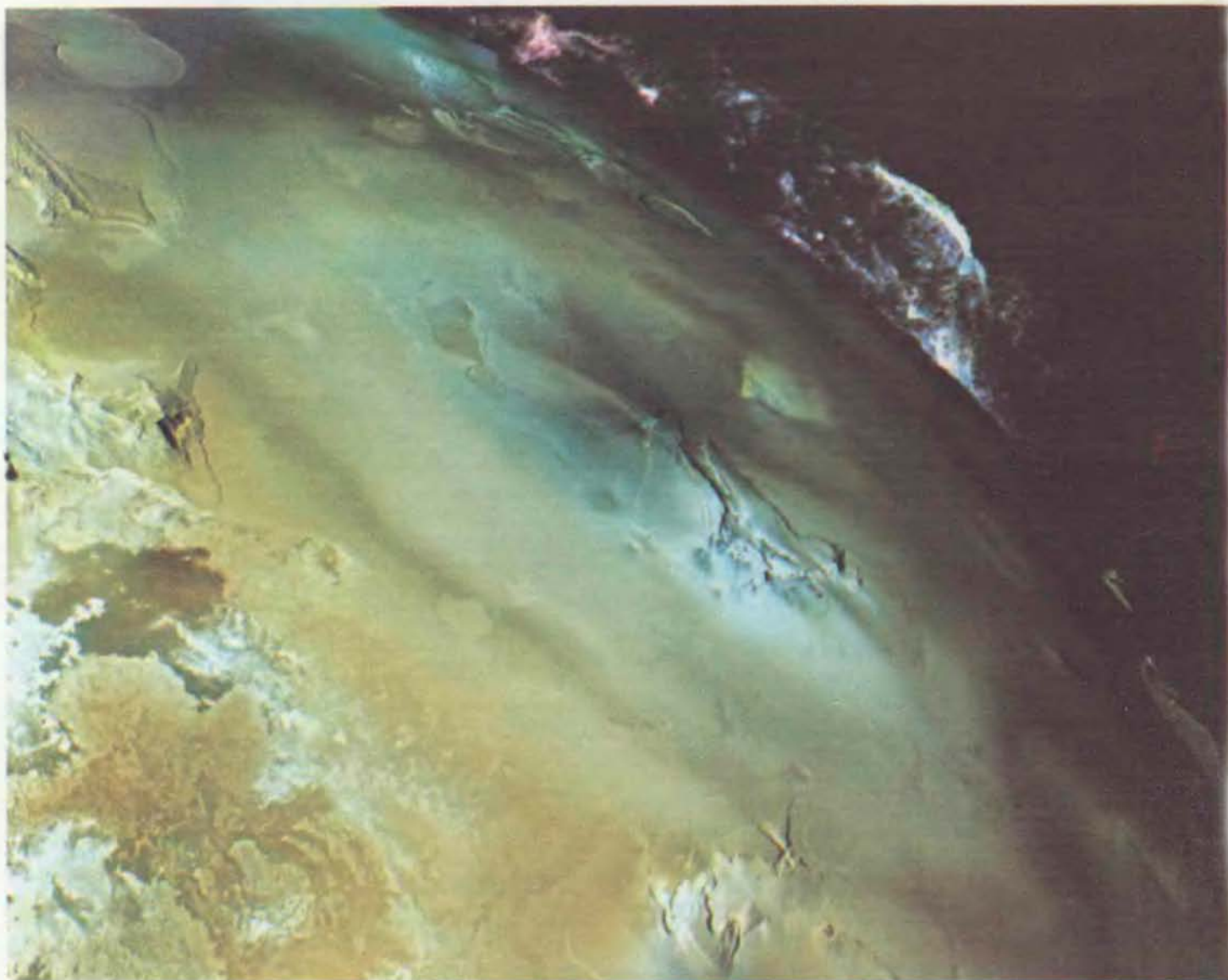
Такое распределение плотности галилеевых спутников обычно объясняют воздействием Юпитера на условия в его окрестностях на ранних стадиях эволюции. Даже в современную эпоху собственное инфракрасное излучение Юпитера примерно вдвое превышает количество энергии, которое он получает от Солнца. Ясно, что он медленно остывает, а когда-то давно сам находился в светящемся состоянии. Поэтому модели ранних стадий Юпитера (в основе которых лежат физические процессы, во многом схожие с процессами в маломассивных звездах) указывают на то, что «юный» Юпитер в течение нескольких миллионов лет был важным локальным источником энергии. Модели, разработанные Дж. Поллаком и его сотрудниками из Эймского исследовательского центра при НАСА, предполагают, что в течение периода продолжительностью 100 млн. лет температура и давление в области, в которой лежит современная орбита Ио, определя-

ЮЖНОЕ ПОЛУШАРИЕ ИО сфотографировано в 1979 г. широкоугольной камерой космического аппарата «Вояджер-1». Площадь области 2,5 млн. км<sup>2</sup>, или 6% поверхности Ио; 1 см соответствует 50 км. Видны структуры нескольких типов. Наиболее многочисленны кальдеры. Некоторые окружены расплывчатыми поверхностными образованиями, вероятно представляющими собой области поверхности, окрашенные отложениями серных гейзеров. Другие окружены, вероятно, веществом эруптивных потоков. Третьи, по-видимому, выполнены эруптивным обломочным материалом; примером может служить ромбовидная кальдера с красными и черными пятнами. Считают, что белые пятна, которыми усыяна поверхность, представляют собой смесь материала, отложенного из газа и в виде иона SO<sub>2</sub>, извергающегося вдоль эскарпов и разломов. Гора внизу слева, — вероятно, обнажение силикатной коры Ио. По оценкам, ее высота около 10 км. Изображение было обработано на ЭВМ Геологической службы США, поэтому различные обозначения видны так, как если бы наблюдатель парил над поверхностью.









**ПЕЛЕ** — первый вулкан, открытый на Ио. Это также крупнейшее гейзероподобное извержение, наблюдавшееся на Ио до сих пор. Эруптивный столб виден над краем спутника. Он поднимается примерно на 300 км и из него материал выпадает на поверхность, образуя ряд желтых и коричневых концентрических колец. Диаметр самого внешнего кольца в среднем равен 1400 км. В центре кольцеобразных отложений находится очаг гейзера: несколько холмов и центральная впадина. Складки рельефа и потоки — свиде-

тельства прошлых извержений. Это изображение Пеле передано на Землю «Вояджером-1». Мозаика составлена методом, разработанным А.С.Мак-Юэном из Геологической службы США. По изображениям высокого разрешения строится пространственная картина, а изображения низкого разрешения дают представление об окраске поверхности. Когда четыре месяца спустя к Ио приблизился «Вояджер-2», Пеле не был активен.

лись Юпитером, а не Солнцем. Тело, находившееся на орбите Ио в первый миллион лет указанного периода, получало бы от Юпитера больше энергии, чем Земля от Солнца в современную эпоху.

Вполне вероятно, что химический состав регулярных спутников Юпитера определялся их относительной близостью к планете. В таком случае Ио и Европа сложены скальными породами потому, что температура вблизи Юпитера была слишком высока и им не удалось удержать сколько-нибудь существенное количество воды. Напротив, Ганимед и Каллисто, сохранившие воду, превратились в смесь льда и скальных пород и достигли больших размеров, чем Ио и Европа. Примечательно, что плотности Ганимеда и Каллисто

примерно такие, каких следует ожидать при остывании газа с солнечным химическим составом до температуры конденсации льда.

Эту простую точку зрения нельзя считать окончательной. Дело в том, что поверхности тел Солнечной системы были усеяны множеством кратеров ударного происхождения в результате падения на них планетезималей в период интенсивной бомбардировки, который завершился 4 млрд. лет назад. Планетезимали, захваченные в гравитационное поле Юпитера, приобретали значительное ускорение, поэтому Ио и Европа «досталось» гораздо сильнее, чем другим, более удаленным спутникам. Кроме того, интенсивный вулканизм Ио, несомненно, сказался на со-

держании летучих веществ. Происхождение Ио и вообще всех регулярных спутников Юпитера, по-видимому, сходно с происхождением Солнечной системы. Таким образом, Юпитер и его спутники — это Солнечная система в миниатюре в более глубоком смысле, чем простая геометрическая аналогия.

**НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ** поверхности Ио, переданных «Вояджерами», видны следы сильной вулканической активности, что оказалось почти полной неожиданностью по следующей причине. Считается, что нормальная тепловая эволюция (а значит, и вулканизм) планетного тела определяется прежде всего его разогревом в результате выделения гравитационной энер-



гии в ходе аккреции, а также распада короткоживущих радиоактивных изотопов, таких, как алюминий-26, затем постепенным нагревом вследствие распада долгоживущих изотопов, главным образом урана, тория и калия, и, наконец, постепенным остыванием по мере истощения радиогенных источников и вследствие потери тепла через поверхность тела посредством конвекции и теплопроводности. Такая последовательность событий благоприятствует вулканизму твердых тел с большим отношением объема к площади поверхности. Вот почему Земля до сих пор проявляет вулканическую активность, тогда как лунные очаги вулканизма давно угасли. (Вулканы Марса, вероятно, активны и сегодня, но они значительно слабее, чем земные.) Ожидалось, что на Ио, размеры и масса которой такие же, как у Луны, можно будет обнаружить лишь следы древнего вулканизма.

Эти предсказания были полностью опровергнуты в марте 1979 г. Незадолго до того как «Вояджер-1» достиг системы Юпитера, С. Пил из Калифорнийского университета в Санта-Барбаре и Р. Рейнолдс и П. Кассен из Эймсского исследовательского центра опубликовали выполненный ими анализ разогрева Ио под воздействием приливных сил. Ио и Европа связаны гравитационным резонансом. Впервые гравитационные резонансы в Солнечной системе были изучены в начале XIX в. Пьером Симоном Лапласом. При резонансе под влиянием взаимного гравитационного воздействия орбиты двух спутников меняются до тех пор, пока их орбитальные периоды не станут соизмеримы. (Орбитальный период Европы в два раза больше, чем Ио.) Одно из следствий этого резонанса состоит в том, что под влиянием Европы орбита Ио постепенно становится эксцентричной, т.е. отклоняется от круговой. В результате подюпитерианская точка на Ио (т.е. ближайшая к Юпитеру точка спутника) колеблется, образуя приливный горб, перемещающийся по поверхности Ио с изменяющейся амплитудой. Это приводит к разогреву спутника вследствие приливного трения. Пил и его сотрудники рассчитали, что выделяющееся количество тепла может быть удивительно велико, и предсказали, что на Ио должны проявляться признаки значительной вулканической деятельности.

По мере приближения «Вояджера-1» к Ио становилось ясно, что Пил и его сотрудники правы. На изображениях все увеличивающегося разрешения не было видно никаких следов крупных ударных кратеров. Зато поверхность была покрыта разноцветными красными, оранжевыми и желтыми пятнами, которые на снимках «крупным планом» оказались образованиями, сходными с земными и марсианскими лаво-

выми потоками и кальдерами (кратерами обрушения над вулканическими очагами). Стало очевидно, что поверхность Ио геологически молода и развитие ее продолжается. Несколько дней спустя после прохождения «Вояджера-1» вблизи Ио группы ученых, ответственные за траекторию и получение изображений, обнаружили признаки активного извержения вулканов на Ио. С тех пор природа вулканизма, найденного на изображениях, переданных «Вояджерами», интенсивно изучается, и уже начала вырисовываться предварительная картина кинетики и термодинамики вулканизма Ио.

**М**НОГИЕ свойства вулканов Ио обусловлены экзотической химией ее поверхности. Задолго до пролета «Вояджера-1» из отсутствия в инфракрасном спектре Ио некоторых деталей (прежде всего линий поглощения льда или инея) был сделан вывод, что поверхность спутника чрезвычайно суха. Некоторые детали в видимой области спектра указывали на то, что на Ио имеется сера в различных формах. Об этом свидетельствовали также эмиссионные линии ионов серы, захваченных в магнитосфере Юпитера. Затем разнообразные приборы, которыми были оснащены «Вояджеры», показали, что большое количество ионов серы и кислорода находится в магнитосфере Юпитера, но особенно высокая ее концентрация отмечается вблизи орбиты Ио. Оказалось, что источником ультрафиолетового излучения этих ионов является окружающий Юпитер тор, концентрический с орбитой Ио. Наконец, с помощью инфракрасного спектрометра «Вояджера» были открыты линии поглощения, принадлежащие диоксиду серы  $\text{SO}_2$ . Этот спектр получен из области над одним из вулканов Ио. Это позволило установить, что источником серы и ее соединений являются центры вулканической активности на Ио. Опираясь на эти открытия, две исследовательские группы: одна — из Лаборатории реактивного движения Калифорнийского технологического института, другая — из Гавайского университета установили происхождение одной из заметных особенностей инфракрасного спектра Ио вблизи длинных волн 4,1 мкм. Они нашли, что она связана с «инеем», образовавшимся при затвердевании диоксида серы.

Почему на Ио так много серы? Сера довольно широко распространена во Вселенной, ее всего в 40 раз меньше, чем кислорода. В земной коре она редко встречается; по-видимому, в основном она содержится в земном ядре в виде сульфида железа. На Луне серы также немного. Дефицит серы — часть более сложной проблемы: низкого содержания летучих веществ на Луне. Это одна из самых непреодолимых

трудностей, с которыми сталкиваются ученые при попытках объяснить происхождение Луны. В метеоритах, особенно в простейших, содержание серы высоко, и на поверхности Марса посадочные модули «Викингов» также обнаружили большое количество серы в той или иной форме.

В большинстве моделей образования спутников Юпитера предполагается,



**ПРОМЕТЕЙ** относится к классу вулканических плюмажей Ио, которые меньше, холоднее и существуют дольше, чем извержения типа Пеле. Эти три изображения Прометея были переданы «Вояджером-1». Вверху — вид плюмажа сбоку, его высота 100 км, поперечник 300 км. На двух других изображениях показан вид сверху, когда космический аппарат пролетал непосредственно над вулканом. Плюмаж кажется темным на фоне поверхности. Тем не менее его отложения образуют кольца светлого вещества. Судя по яркости, на поверхности накапливается снег из диоксида серы.





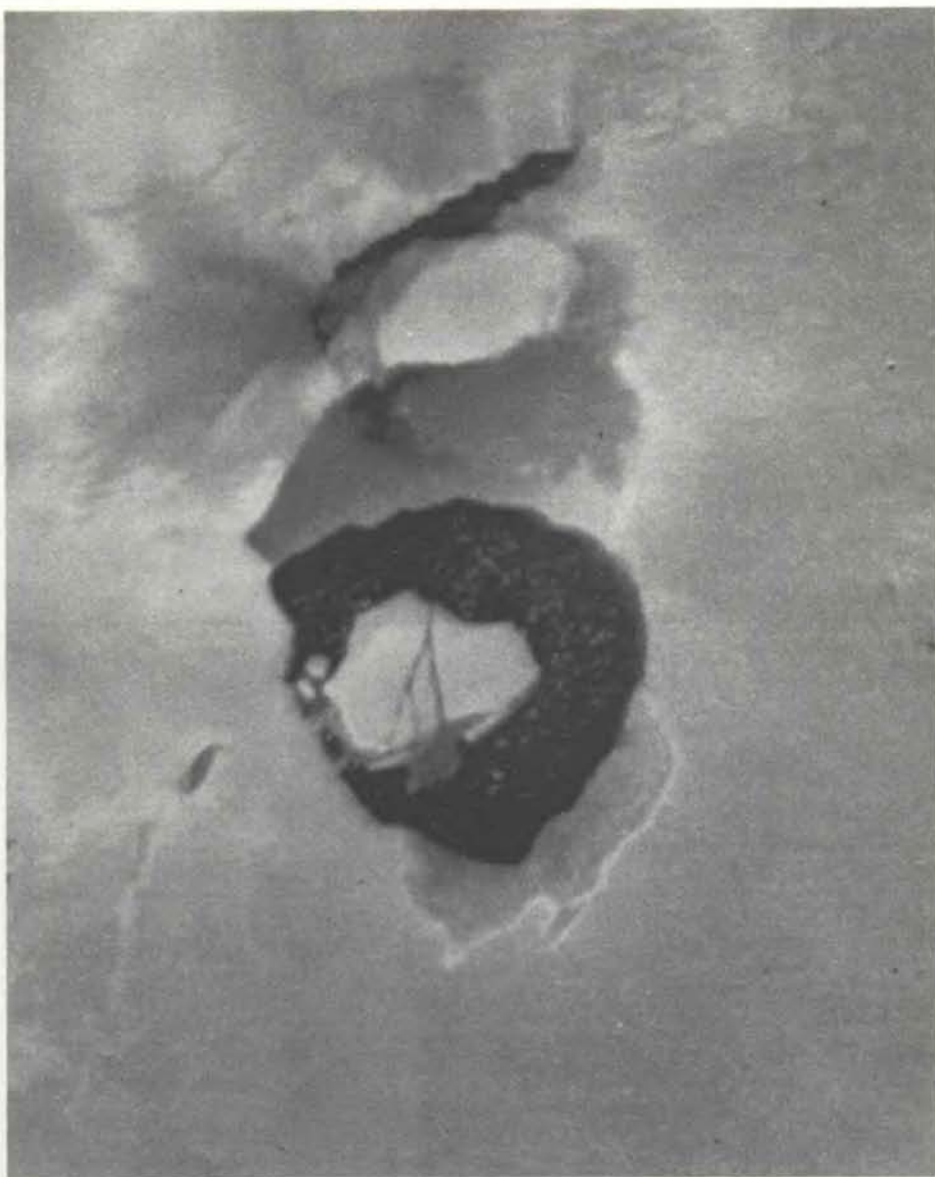
**ПЛЮМАЖИ ЛОКИ**, извергающиеся из концов черной трещины длиной около 200 км. Эруптивные столбы образуют яркие фонтаны и более темные области отложений. Эти плюмажи обладают свойствами как Прометей, так и Пеле. Ниже Локи расположено черное пятно, — возможно, лавовое озеро; неизвестно, является ли лава серной или силикатной.

Измерения инфракрасного излучения с «Вояджера» указывают, что температура большей части поверхности озера около 300 К, т.е. на 170 К выше, чем окружающей поверхности. Мозаика изображений, переданных «Вояджером-1», построена методом Мак-Юэна.



что первоначально содержание летучих веществ на Ио было выше, чем на Луне. Тогда следует допустить, что из-за интенсивного приливного разогрева за время существования Солнечной системы все легкие летучие вещества, включая воду, покинули Ио, так что сера и различные ее соединения — единственные летучие, оставшиеся в больших количествах. Альтернативная возможность состоит в том, что температура вблизи зарождающейся Ио была достаточно высока, чтобы помешать захвату воды, но все же не слишком высока, чтобы исключить присутствие серы. Изучение природы Амальтеи — самого внутреннего спутника Юпитера, может помочь решить этот спорный вопрос: если Ио в процессе формирования была слишком горяча, а потому неспособна захватить воду, то Амальтея была бы еще горячее (при условии, что она образовалась там, где находится теперь по отношению к другим спутникам Юпитера). Поэтому Амальтея должна состоять из очень тугоплавкого вещества. Однако на основе ограниченных спектральных данных предполагается, что поверхность Амальтеи подобна первичным метеоритам — углистым хондритам, для которых характерно высокое содержание летучих веществ.

**Н**А Ио можно выделить несколько типов вулканической активности, вероятно, определяемых химией серы. Один тип, с образованием эруптивных колонн, или столбов, характерен, вероятно, для большинства самых интенсивных проявлений вулканизма, обнаруженных на Ио до сих пор. Рассмотрим вулкан Пеле, который был активен во время пролета «Вояджера-1» и над которым был замечен первый эруптивный столб, достигавший высоты около 300 км. Вулканические выбросы распространились на площади диаметром около 1400 км. Форма зонтика, или плюмажа, типичная для многих эруптивных колонн, указывает на то, что продукты извержения движутся по баллистическим траекториям. Вместе с тем на некоторых изображениях Пеле видна вихревая структура плюмажей. Это значит, что имеет место турбулентность, откуда следует, что видимые частицы взаимодействуют с каким-то невидимым несущим газом. (На изображениях, переданных «Вояджерами», видны главным образом твердые частицы размерами порядка тысячных долей миллиметра или меньше. Связанный с ними газ непосредственно не виден.) Рассчитанные на ЭВМ модели эруптивных колонн, состоящих из частиц, движущихся по баллистическим траекториям в поле тяготения Ио, очень хорошо описывают общие свойства наблюдавшихся симметричных плюмажей.

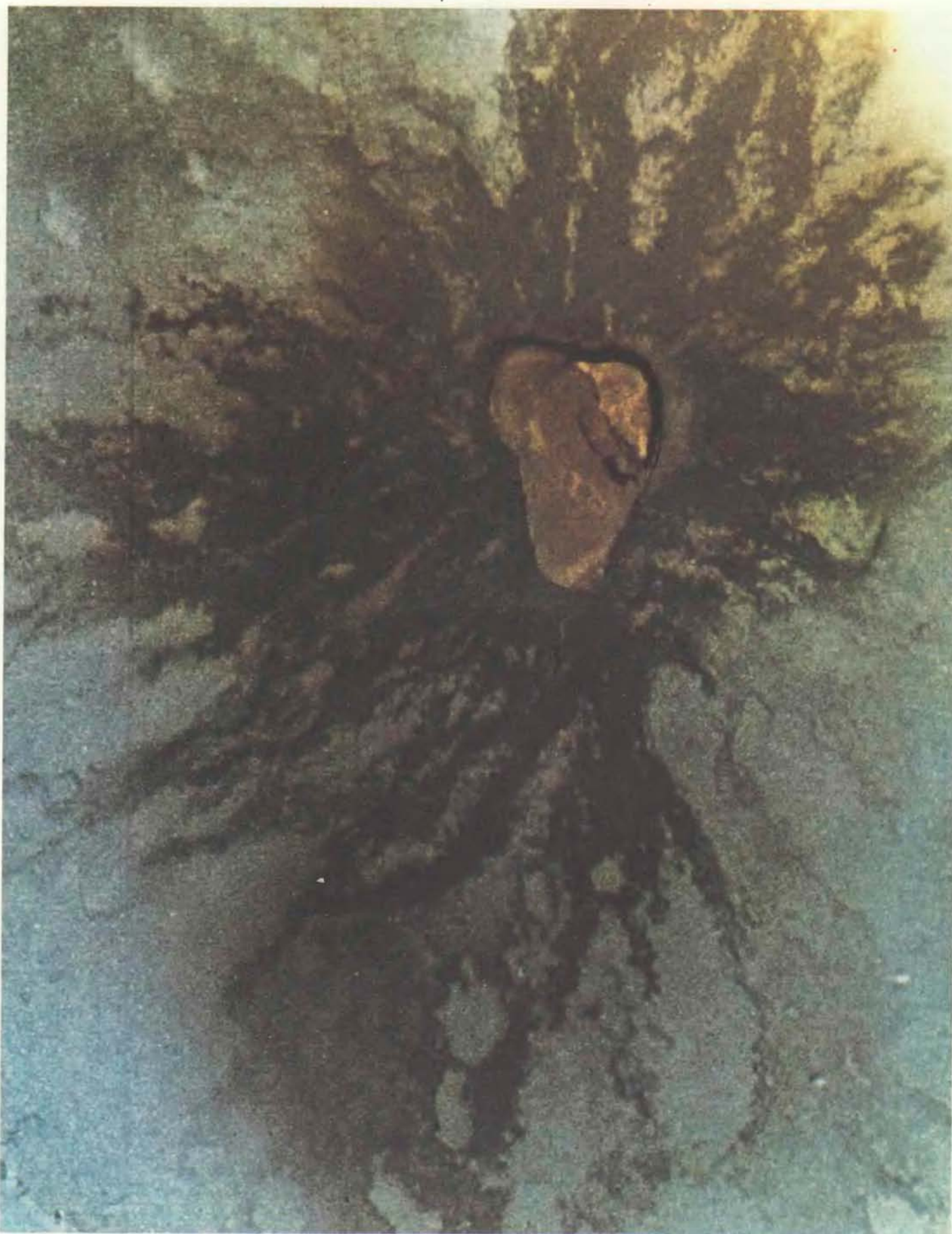


**ВИД ОЗЕРА ЛОКИ** крупным планом, полученный по крупномасштабному изображению, переданному «Вояджером-1». Большое светлое пятно на поверхности озера пересечено несколькими трещинами, отдельные светлые пятна, — по-видимому, вещество, отколовшееся от краев. Эти пятна усеивают всю поверхность озера. Возможно, застывшая корка на поверхности озера взломана конвективным течением или свежим эруптивным материалом, а светлое пятно состоит из чистой серы. Поперечник озера 250 км.

Любая модель механизма, приводящего к появлению эруптивных колонн, должна объяснять высокую скорость частиц (от 500 до 1000 м/с), найденную с помощью баллистического анализа. Б. Смит из Аризонского университета и его сотрудники Ю. Шумейкер и Сузан Киффер из Геологической службы США и А. Ф. Кук из Астрофизического центра обсерватории Гарвардского университета и Смитсоновской астрофизической обсерватории предложили модель типа гейзера. В качестве начальных условия они приняли, что благодаря большому количеству тепла, обусловленному приливным воздействием Юпитера, глубинные температуры на Ио таковы, что жидкий диоксид серы и расплавленная сера находятся в контакте на сравнительно малых

глубинах. Сузан Киффер тщательно изучила термодинамику эруптивных столбов для широкого диапазона условий в присутствии этих веществ. При самых низких энергиях, когда извержение еще может произойти, процесс начинается с того, что жидкий диоксид серы вступает в контакт с горячей жидкой серой. Жидкий диоксид серы начинает кипеть, и смесь жидкости и газа должна расширяться, поднимаясь к поверхности вдоль какого-то подводного канала. При непрерывном расширении количество выделяющихся паров увеличивается. В конце концов достигается тройная точка для  $\text{SO}_2$  (состояние равновесного сосуществования всех трех фаз вещества: твердой, жидкой и газообразной). Если это происходит на некоторой глубине под поверх-





МААСО-ПАТЕРА и окружающие эту кальдеру поверхностные образования, очень похожие на земные и марсианские. Главное различие состоит в том, что эта кальдера огромна: ее поперечник достигает 50 км. Два уровня в кальдере указывают, что она образовалась по меньшей мере в две стадии обрушения. Глубина большей части кальдеры, опреде-

ленная по длине отбрасываемой тени, составляет 0,7 км. Глубина области вверху справа 2 км. В некоторых местах лава переливалась через край кальдеры, породив потоки длиной в сотни километров. Мозаика изображений, переданных «Вояджером-1», построена Мак-Юэном.

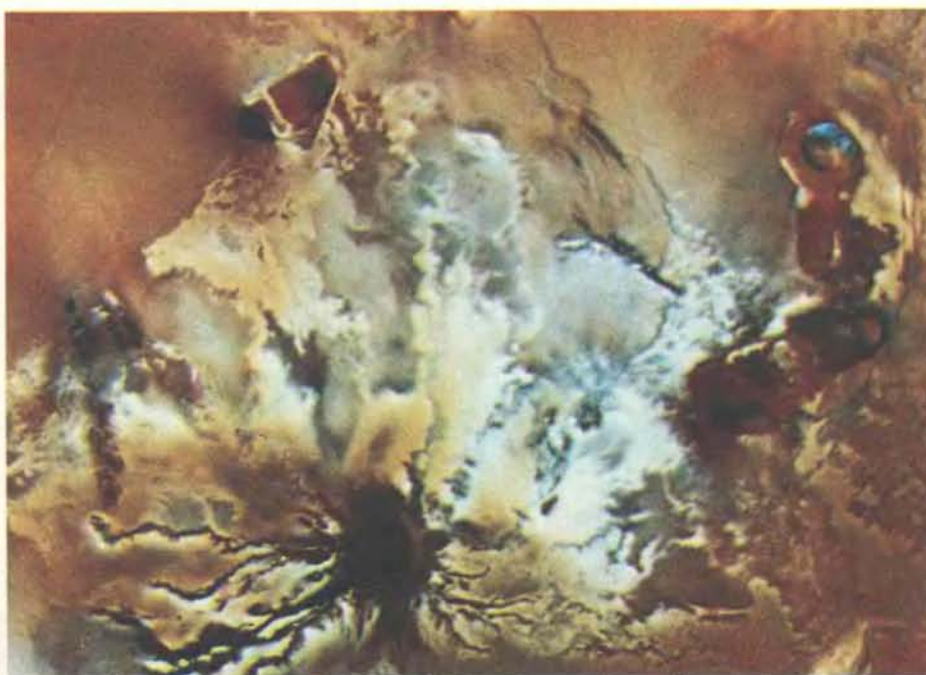


ностью Ио, то оставшаяся жидкость затвердевает («замерзает») и дальнейшее расширение  $\text{SO}_2$  сопровождается конденсацией его паров в «снег». При более высоких энергиях образуются перегретые пары диоксида серы. В этом случае расширение и подъем к поверхности вначале сопровождаются конденсацией в жидкость, а затем ее замерзанием и образованием снега.

В обоих случаях смесь диоксида серы в различных фазах ускоряется в подводном канале до тех пор, пока поток не достигнет скорости звука (в данной среде). В этой точке рост его скорости (несколько сотен метров в секунду) прекращается. Ближе к поверхности подводный канал может расширяться. Кроме того, достигнув поверхности, поток может начать расширяться в разреженную атмосферу Ио. Поэтому над самим жерлом скорость потока может быть очень высокой. Рассчитав количество выделяющейся энергии, Киффер получила, что возможна скорость выброса более 1000 м/с. Она указала, однако, что для объяснения наблюдений «Вояджера» подходят самые разнообразные условия под поверхностью, поэтому пока невозможно точно оценить температуру, глубину очага и химический состав выбросов для каждого отдельного эруптивного столба.

**ДОПОЛНИТЕЛЬНУЮ** информацию об эруптивных колоннах можно извлечь из их распределения по поверхности Ио и поведения во времени. «Вояджер-1» зарегистрировал по меньшей мере девять извержений, причем некоторые из них за период пролета космического аппарата возобновлялись несколько раз. Все девять колонн более или менее равномерно распределены по долготе, но тяготеют к низким широтам: восемь из них находятся в пределах  $30^\circ$  от экватора. Восемь из девяти вулканов были активны четыре месяца спустя, во время прохождения «Вояджера-2». (Пеле, дававший раньше самый высокий столб, не действовал.) Два вулкана давали пару эруптивных колонн, расположенных на концах трещинообразной структуры к северу от черного пятна, названного Локи. За время прохождений высота этих эруптивных колонн была различной и заметно изменялась. Кроме того, между двумя прохождениями сильно изменился также облик поверхности вокруг Пеле и Локи.

Пеле и Локи расположены довольно близко друг к другу. В частности, оба попадают в промежуточную область между полушарием, обращенным к Юпитеру, и полушарием, противоположным направлению движения. (Ио, подобно Луне, всегда обращена к Юпитеру одной и той же стороной.) Давно известно, что эта область в среднем го-



РА-ПАТЕРА и окружающие ее образования заметно отличаются от того, что геологи наблюдают на Земле и Марсе. Здесь Ра-Патера расположена внизу. Это кальдера, заполненная черным веществом, растекающимся за ее пределы. Извилистые потоки, главным образом направленные влево, простираются на 200 км. Д. Пьери из Лаборатории реактивного движения и К. Саган из Корнеллского университета предполагают, что в темном центре Ра-Патера находится сера в черной дегтеобразной форме, а потоки представляют собой более холодные и менее вязкие формы серы. Можно заметить еще две кальдеры. Вверху слева — вытянутая кальдера с желтыми, оранжевыми и черными полосами, которые, возможно, соответствуют различным формам серы. В круглой кальдере вверху справа виден голубоватый серп. На изображении, полученном 6 часами ранее, серп отсутствовал. Возможно, он связан со слабым извержением.

раздо краснее и темнее, чем противоположная ей. За время между прохождениями космических аппаратов в ней произошли также другие сильные изменения. Вокруг двух кальдер, расположенных в высоких широтах (одна — Сурт в северном полушарии, другая — Атен-Патера — в южном), образовались темно-красные кольцеобразные отложения, каждое поперечником около 1400 км (т.е. как у Пеле). Вулканических извержений в этих районах во время прохождения «Вояджера-1» зарегистрировано не было, но активностью Сурта, вероятно, можно объяснить временное увеличение потока теплового излучения Ио на длине 5 мкм (в инфракрасной области), наблюдавшееся на обсерватории Мауна-Кеа У. Синтоном из Гавайского университета в Гонолулу примерно за месяц до прохождения «Вояджера-2». Отложение Атен-Патера недавно открыли А. Мак-Юэн и один из нас (Содерблом) при анализе изображений, полученных «Вояджером-1» и «Вояджером-2».

По размерам и окраске эти два огромных скопления изверженного материала очень похожи на отложения, окружающие Пеле. Поэтому Мак-Юэн и Содерблом предполагают, что деятельность вулканов Сурта и Атен-Патеры относится к классу больших

короткоживущих извержений, наиболее ярким примером которых до сих пор было извержение Пеле. При обработке данных, полученных на инфракрасном спектрометре «Вояджера-1», Дж. Пирл с сотрудниками из Годдардовского центра космических полетов НАСА оценили, что температура жерла Пеле была около 650 К. По данным Синтона получено близкое значение.

Извержения другого класса меньше: кольца их отложений имеют в поперечнике около 300 км. Продолжительность их существования гораздо больше: все они наблюдались обоими «Вояджерами» — значит, длительность таких извержений может оцениваться в несколько лет. Их температура, по видимому, ниже — около 400 К. Они лежат в экваториальной полосе, покрытой ярким белым веществом, возможно, ином из диоксида серы. (Их кольцеобразные отложения состоят из такого же вещества.) Лучший пример вулканов такого класса — Прометей, расположенный в  $5^\circ$  к югу от экватора. Пара плюмажей у трещины Локи — вероятно, промежуточный вид извержений (между этими двумя классами). Отложения вокруг этих эруптивных колонн имеют сложную структуру. У каждого из них есть внутренняя зона, состоящая из отложений типа вулкани-



ческих конусов, по-видимому, богатых диоксидом серы, длиной около 200 км, и внешняя зона, по размерам и окраске похожая на отложения вокруг трех крупных эруптивных колонн типа Пеле.

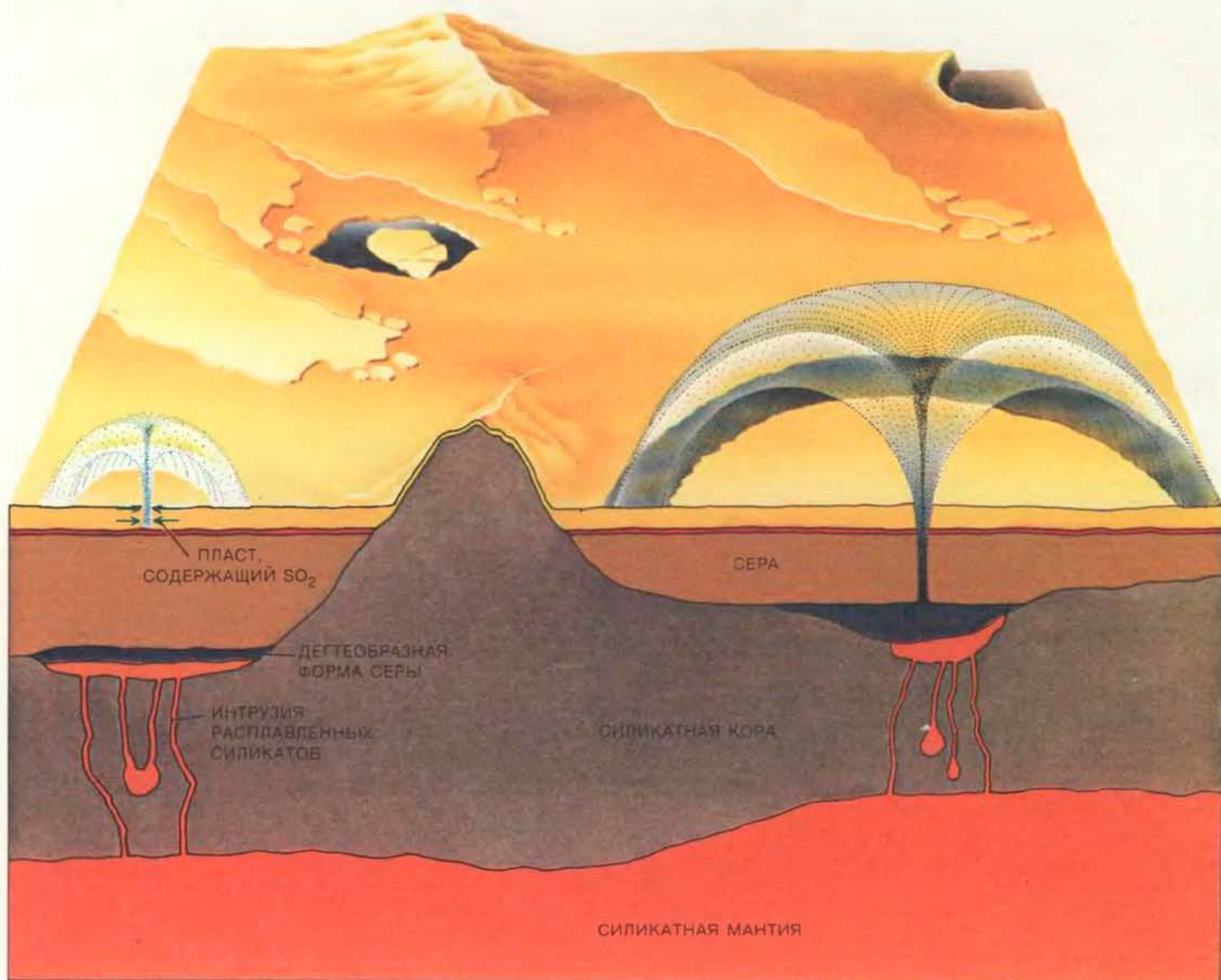
Мак-Юэн и Содерблом считают, что такое явное разделение вулканических отложений на два класса обусловлено различием летучих веществ, приводящих в действие вулканические системы. Они также предполагают, что такое различие связано с необычной зависимостью между вязкостью серы и ее температурой. При нагревании выше точки плавления сера подвергается нескольким последовательным изменениям. Сначала она желтая и твердая, затем при температуре около 400 К она

плавится и превращается в желтую жидкость низкой вязкости. При дальнейшем нагревании она приобретает оранжевую окраску, а затем, при 430 К — ярко-розовую. Затем становится ярко-красной и густеет. Около 500 К она похожа на темноокрашенный деготь. Около 600 К ее вязкость начинает падать и при 650 К она вновь становится совершенно жидкой. Наконец при той или иной температуре в зависимости от давления она испаряется.

**ИТАК**, расплав серы низкой вязкости, способный легко переносить тепло, существует в двух формах: как ярко-розовая жидкость при температуре между 400 и 430 К и как матово-черная

жидкость при температуре выше 650 К. Поэтому Смит, Шумейкер, Киффер и Кук предположили, что малые плюмажи, такие, как Прометей, вызываются взаимодействием жидкой красной серы с диоксидом серы, когда они входят в контакт; в результате  $\text{SO}_2$  испаряется и расширяется. Большие плюмажи, такие, как колонна Пеле, возникают, когда горячие силикаты в коре Ио заставляют серу испаряться при температурах от 700 до 1200 К.

Такая модель может объяснить удивительное различие в продолжительности извержений этих двух типов. Небольшие плюмажи диоксида серы существуют годами, поскольку это соединение может быть жидким в боль-



НА ГИПОТЕТИЧЕСКОМ РАЗРЕЗЕ ИО сделана попытка объяснить ее вулканизм. Мантия Ио состоит из расплавленных (или частично расплавленных) силикатов (оранжевый цвет). Кора сложена из твердых силикатов (коричневый цвет), перекрытых слоями обломков силикатов, богатых серой. Самый верхний слой серы — холодный и твердый (желтый цвет). Затем идет тонкая зона, в которой сера расплавлена (красный цвет), и более мощная зона, в которой сера горячая и дегтеобразная (желтовато-коричневый). Слева изображен эруптивный столб (плюмаж) типа Прометея. Рас-

плавленная сера вступает в контакт с жидким диоксидом серы (голубой цвет), который в кипящем виде поднимается вдоль подводящего канала и образует на поверхности эруптивный столб, богатый снегом из  $\text{SO}_2$ . Справа — плюмаж типа Пеле. Здесь силикатные включения нагревают серу и она переходит в очень горячую дегтеобразную форму (черный цвет). Она испаряется, серные пары извергаются на поверхность. Лавовое озеро типа Локи показано вверху слева. Вверху справа показана кальдера. Ее дном является силикатная кора, подстилающая тонкий слой серы.

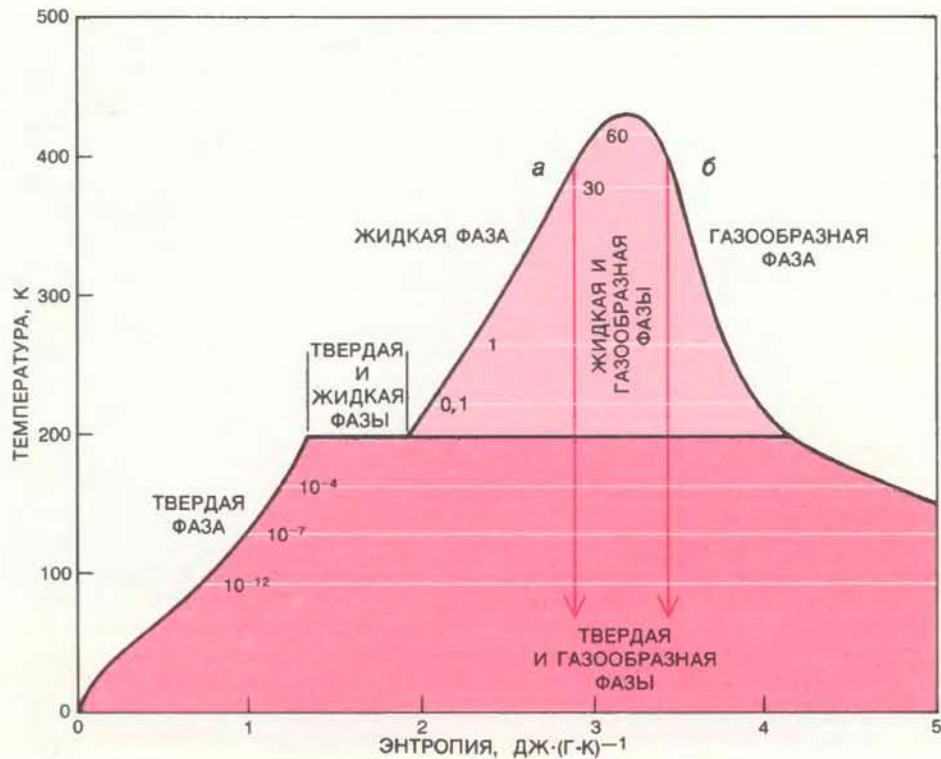


шом диапазоне глубин коры Ио. Его вязкость крайне низка (как вязкость спирта при комнатной температуре), и поэтому  $\text{SO}_2$  с легкостью проходит сквозь кору к жерлам на поверхности. Напротив, большие плюмажи, состоящие из дегтеобразной серы, сохраняются всего несколько суток, поскольку условия, благоприятствующие таким извержениям, должны быть точно сбалансированы. Например, истечение серы может прекратиться, если температура в жерле упадет ниже 650 К или же если это произойдет в подводящем канале или глубоко в коре, где сера вступает в контакт с силикатами, поскольку сера быстро охлаждается и становится дегтеобразным, почти твердым веществом.

Остается открытым вопрос о распределении вулканов обоих классов. На изображениях, переданных «Вояджерами», на темно-красном полушарии Ио, где обнаружены большие эруптивные колонны, видны многочисленные горы, сложенные, вероятно, силикатными породами, приподнятыми над равнинами Ио. (Серные горы были бы не в состоянии выдержать свой собственный вес.) Изображения противоположного полушария имеют более низкое разрешение. Однако на некоторых из них видна область, в которой многочисленны малые плюмажи типа Прометея. Эта область находится на терминаторе (границе дня и ночи), где горы были бы хорошо видны. На других изображениях она попадает на яркий край Ио. Из анализа этих изображений следует, что там поверхность представляет собой гладкую равнину.

Отсюда Мак-Юэн и Содерблом делают вывод о больших неоднородностях в устройстве коры Ио. Так, в области больших плюмажей типа Пеле кора должна быть гораздо тоньше, чем в других местах, так что горячие силикаты лежат здесь ближе к поверхности и давление, сжимающее пары серы, там ниже. Кроме того, в области малых плюмажей типа Прометея кора может быть обогащена жидким диоксидом серы вследствие некоторых геофизических процессов (таких, как изменение градиента гидростатического давления с широтой вследствие вращения Ио), сгоняющих жидкость к экватору. Следует заметить, что пара плюмажей Локи, имеющих признаки обоих классов, находится как раз там, где перекрываются области извержений обоих классов.

**СОВСЕМ** иной, отличный от гейзероподобного, тип вулканической активности проявился в существовании больших вулканических кальдер, а также связанных с ними вулканических потоков и поверхностных образований, относящихся к числу самых интересных особенностей, найденных на изображениях, переданных «Вояджера-



ИЗ ТЕРМОДИНАМИКИ ДИОКСИДА СЕРЫ следует, что на Ио возможны гейзероподобные извержения разного масштаба. (Давление указано с помощью изобар и дается в барах.) На таком графике положение произвольного объема диоксида серы относительно горизонтальной оси представляет соотношение фаз (например, жидкой и газобразной). Отвечающая этому положению вертикальная линия характеризует изменение состояния диоксида серы при извержении, происходящем при постоянной энтропии (когда соответствующий объем не производит работу, не приобретает и не теряет тепло). Показаны два таких извержения. Одно из них (а) начинается, когда температура жидкого диоксида серы поднимается до 393 К — температуры расплавленной серы глубоко в коре Ио. Диоксид серы при этом закипает и поднимается к поверхности. Другое извержение (б) начинается с газобразного диоксида серы. В обоих случаях  $\text{SO}_2$  выбрасывается в чрезвычайно разреженную атмосферу Ио в виде облака, состоящего из газа или частиц льда. Термодинамический анализ выполнен Сузан Киффер из Геологической службы США.

ми». В общем кальдеры Ио похожи на земные, но гораздо крупнее: более 200 из них достигают по меньшей мере 20 км, тогда как на Земле найдено только 15 структур такого размера. Заметим, что площадь поверхности Земли в 3,5 раза больше, чем у Ио. В отличие от вулканических плюмажей кальдеры не приурочены к какой-то особой широте. Их число на единицу площади в высоких широтах почти такое же, как на экваторе.

Споры о природе кальдер сосредоточились вокруг тех же проблем, которые возникли в связи с эруптивными колоннами, а именно вокруг вопросов о глубинных тепловых условиях и о наличии серы и ее диоксида. Две экстремальные точки зрения на происхождение кальдер можно назвать «серной» моделью и «силикатной» моделью. В первой, предложенной в первоначальном виде К. Саганом из Корнеллского университета, подповерхностные бассейны расплавленной серы, постулированные Смитом с сотрудниками для объяснения эруптивных выбросов ди-

оксида серы, служат причиной появления лавовых потоков на поверхности. Потоки, окружающие кальдеры, — это скорее изливающиеся «лавы» жидкой серы, а не расплавленный базальт или другие силикаты. Во второй модели Г. Мазурский и М. Карр из Геологической службы США и их сотрудники предположили, что кальдеры представляют собой проявление силикатного вулканизма, подобного земному. Единственное различие состоит в том, что силикатные лавы Ио окрашены серой.

«Серная» модель исходит из несомненно высокого содержания на Ио серы и ее соединений. Об этом свидетельствуют обнаружение газобразного диоксида серы вблизи места одного из извержений, а также вероятность того, что точка плавления этих веществ достигается в коре Ио на небольшой глубине. Кроме того, предполагается, что последовательное изменение цвета и вязкости серы при нагревании и охлаждении может объяснить изменения цвета с расстоянием, наблюдаемые на Ио вокруг кальдер. Хорошим при-



мером служит структура Ра-Патера. Д. Пьери из Лаборатории реактивного движения и К. Саган считают, что темные области в центре структуры Ра-Патера представляют собой высокотемпературную черную форму расплавленной серы. Длинные щупалецобразные потоки, расходящиеся от кальдеры, — это более холодные и менее вязкие истечения красной и оранжевой форм.

Трудность, связанная с этим предположением, состоит в том, что поведение различных форм серы в условиях, господствующих на Ио, известно плохо. Конечно, цвета высокотемпературных форм можно воспроизвести в лаборатории, быстро охладив жидкость. Тем не менее эти формы метастабильны и со временем превращаются в обычную твердую серу. К тому же на Ио эти формы, вероятно, содержат посторонние примеси, что может внести в эту проблему новые сложности.

Модель силикатного вулканизма базируется отчасти на изучении рельефа Ио. Топографические измерения трудны, поскольку вариации яркости на изображениях, связанные с неоднородностью химического состава поверхности, сильнее, чем те, которые связаны с рельефом. Все же некоторые изме-

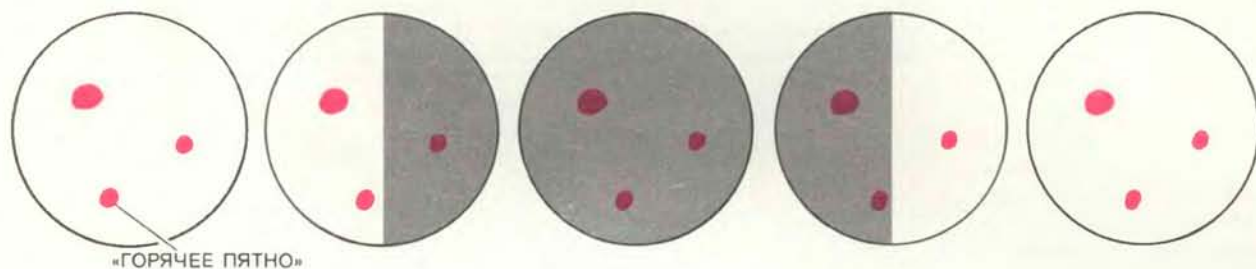
рения удалось сделать на изображениях с высоким разрешением, переданных в период максимального сближения «Вояджера-1» с Ио при благоприятном освещении. Из этих измерений следует, что размах рельефа на Ио гораздо больше, чем на других галилеевых спутниках. Ее горы возвышаются на 5 — 10 км, а глубина по меньшей мере нескольких кальдер 2 — 3 км. Телу, кора которого включает мощные толщи нагретой, возможно жидкой, серы и ее диоксида, трудно сохранить такой рельеф. Для этого требуется по меньшей мере прочный каркас, состоящий из силикатов. Поэтому широкое распространение кальдер по поверхности Ио исключает, по-видимому, существование обширных подповерхностных серных «океанов».

**ДРУГОЙ** важный аргумент, выдвигаемый сторонниками модели силикатного вулканизма, состоит в том, что обнаруженные на Ио структуры (кальдеры, щупалецобразные потоки, вулканические конусы с центральными кратерами и т.д.) более или менее похожи на те, которые геологи видят на Земле и Марсе. Вряд ли сера, необычное для вулканов вещество с экзотической зависимостью вязкости от темпе-

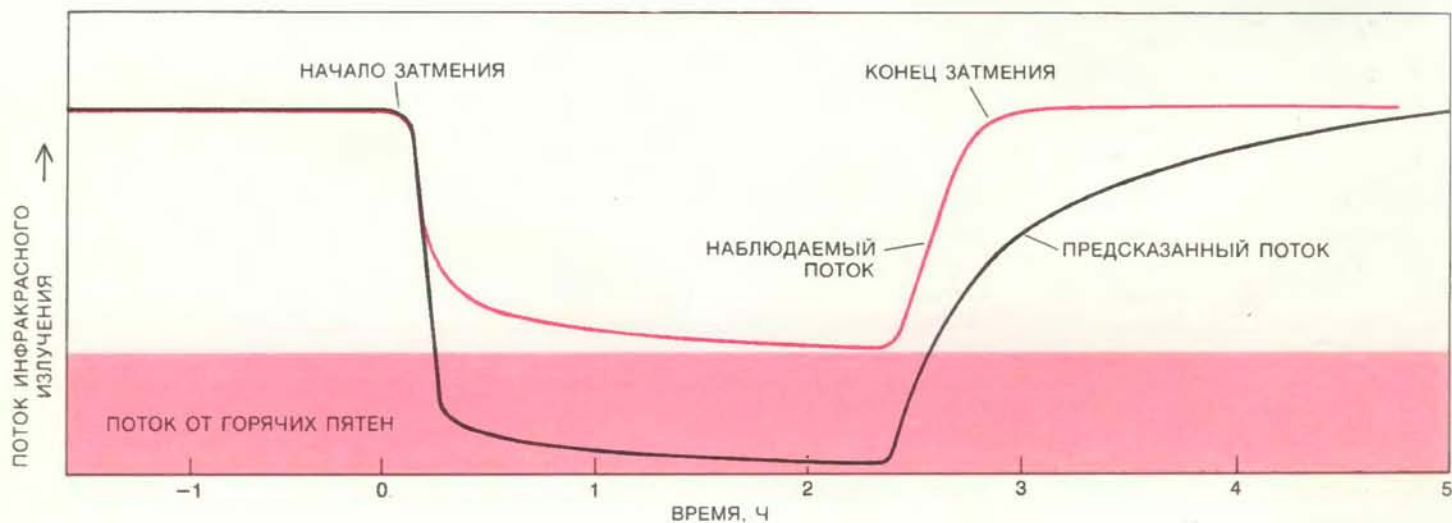
ратуры, может образовывать точно такие же структуры, как базальтовые лавы. К сожалению, геологи мало знакомы с серой как с вулканическим расплавом. На земле извержения серы довольно редки и происходят лишь тогда, когда силикатная магма плавит отложения серы.

Что же происходит на Ио? Сторонники как серной, так и силикатной моделей признают теперь вероятность того, что тип вулканизма, предполагаемый их оппонентами, имеет место по крайней мере в некоторых местах на Ио. Дж. Шейбер из Геологической службы США указывает, например, что некоторые кальдеры находятся в горных районах Ио. Поскольку горы сложены преимущественно силикатами, кальдеры также должны быть силикатными образованиями. Более того, обе спорящие стороны согласны в том, что вулканизм на поверхности Ио, какова бы ни была его природа, обусловлен присутствием в глубоких горизонтах коры расплавленных силикатов. Вопрос в том, какого типа лава — серная или силикатная — преобладает на поверхности.

Остается описать еще одну вулканическую структуру. Изолированное темное образование к югу от плюмажей



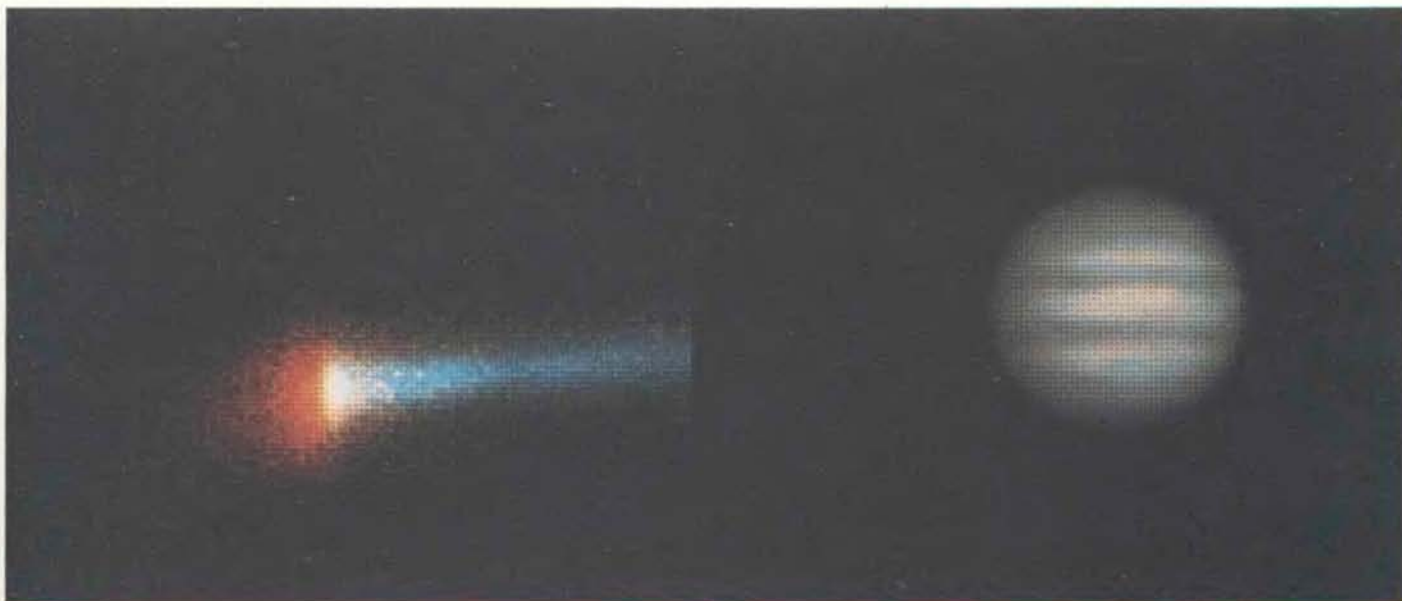
«ГОРЯЧЕЕ ПЯТНО»



**ОХЛАЖДЕНИЕ** ИО в ходе затмений озадачило наблюдателей, которые измеряли поток инфракрасного излучения от Ио в тени Юпитера. Считалось, что поток должен быстро падать до нуля в начале каждого затмения, а затем принимать обычное значение, когда поверхность Ио согревается лучами Солнца (черная кривая). В действительности поток

остается гораздо выше нуля (цветная кривая). Объяснение этого факта состоит в том, что «горячие пятна» на Ио излучают во время затмения более или менее постоянный поток тепла. Поэтому за вулканической деятельностью на Ио можно следить с Земли.





ТОР ИОНИЗОВАННОЙ СЕРЫ, окружающей Юпитер и концентричный с орбитой Ио. Происхождение этого тора связано с вулканизмом Ио, которая выбрасывает 1 т/с атомарных серы и кислорода в пространство вокруг Юпитера. Изображение тора получено на обсерваториях Маунт-Вилсон и

Лас-Кампанас Дж. Траугером из Калифорнийского технологического института. Условными цветами обозначены однократно ионизованные (голубой цвет) и двукратно ионизованные (красный цвет) атомы серы. Видимый правый край соответствует пределу данных Траугера.

Локи — это, вероятно, огромное лавовое озеро, подобное тем, которые обычно заполняют активные земные кальдеры при извержениях. Во время прохождения «Вояджера-1» это образование было крупнейшим «горячим пятном» на Ио: его температура составляла 300 К, тогда как температура окружающей области была лишь 130 К. Кроме того, на изображениях с высоким разрешением внутри этого образования обнаружилось светлое пятно. Этот «поскут» пересекался трещинами; видны также кусочки вещества, вероятно, оторвавшиеся от его краев. Картина такова, как будто застывшая корка на поверхности озера взломана конвективными потоками или свежим эруптивным материалом. Это образование гораздо больше, чем лавовые озера в кальдерах Гавайских островов. Поперечник озера около 250 км и в нем поместилась бы вся цепь Гавайских островов. Заполнено ли оно расплавленными силикатами или расплавленной серой, которые теперь остыли? Это нам не известно.

Полное отсутствие кратеров ударного происхождения — наиболее убедительное свидетельство того, что поверхность Ио геологически молода. Геологи нашли ударные кратеры — признаки древней и современной метеоритной бомбардировки — на всех небесных телах, на которые им удалось взглянуть, в том числе на Марсе и Земле. Изучение усеянных кратерами поверхностей Ганимеда и Каллисто показывает, что спутники Юпитера подверглись такой же бомбардировке, как и

внутренние планеты Солнечной системы. Кроме того, из расчетов Шумейкера следует, что поток комет и астероидов через систему Юпитера в современную эпоху должен порождать большие кратеры на Ио с такой же скоростью, как на Луне.

На основе расчетов Шумейкера мы вычислили, каков должен быть уровень вулканической активности, чтобы полностью скрыть кратеры Ио. Мы получили, что за год на поверхности Ио должен откладываться слой продуктов вулканизма толщиной в среднем 1 мм. Это означает, что уровень вулканической активности на Ио действительно очень высок. Точнее, это означает, что из недр Ио извергается несколько тысяч тонн вещества в секунду, или за месяц примерно столько же, сколько было выброшено за все время извержения вулкана Сент-Хеленс в мае 1980 г. Из этого следуют важные выводы. В частности, это означает, что по крайней мере верхняя часть мантии Ио и ее кора подверглись многократной циклической переработке. Эта переработка согласуется с гипотезой о том, что Ио «основательно пропотела» под влиянием приливного нагрева и потеряла все летучие вещества, которые у нее когда-то были.

**ДЕТАЛИ** циклической переработки вещества еще недостаточно понятны. Например, неясна относительная роль эруптивных выбросов и излияний лавы в накоплении на поверхности нового материала. Оценки полного количества вещества, извергающегося на

Ио в виде плюмажей, указывает, что одни только эруптивные выбросы создают слой вещества от нескольких десятитысячных до одной десятой миллиметра в год или несколько более. Это означает, что излияния лавы по меньшей мере могут соперничать с эруптивными выбросами. Конечно, следует иметь в виду, что эти оценки имеют шаткие основания, так как Ио — очень быстро меняющийся объект, и «Вояджеры» дали нам, образно говоря, лишь два моментальных снимка.

Наблюдаются ли какие-нибудь признаки вулканизма Ио с Земли? Как ни удивительно, ответ на этот вопрос положительный. Свидетельства вулканизма Ио существовали в загадочных данных, собранных за многие годы до полетов «Вояджеров». Выполненные в конце 60-х и начале 70-х годов наземные наблюдения Ио в инфракрасном диапазоне выявили два удивительных факта. Во-первых, во время затмений Ио Юпитером ее температура резко падала как у тела с крайне разреженной атмосферой или вообще не имеющего атмосферы, поверхность которого покрыта слоем тонкого теплоизолирующего порошка. Однако на Ио в отличие от Луны минимальная температура, достигаемая, когда спутник находится глубоко в тени Юпитера, слишком высока и не согласуется с предположением об однородном изолирующем пылевом слое. Во-вторых, температура Ио, определенная по ее яркости в инфракрасной области, не одинакова во всем диапазоне, а значительно выше на более коротких волнах.



Эти факты можно объяснить от-дельно, хотя для этого приходится вво-дить разные гипотезы *ad hoc*. Для объ-яснения данных по затмениям были предложены двухслойные модели Ио, а для объяснения температурных аномалий — некая зависимость величины тепловой эмиссии Ио от длины волны. После полетов «Вояджеров» и откры-тия вулканов на Ио три исследователя из Лаборатории реактивного движения Д. Матсон, Г. Рансфорд и один из нас (Джонсон) вернулись к старым данным в надежде понять их в свете новой ин-формации. Была разработана простая модель, в которой теплоизолирующая поверхность Ио усеяна горячими пят-нами некоторой заданной температу-ры. Выяснилось, что проблема снима-ется в случае, если около 1% поверх-ности Ио покрыто горячими пятнами, температура которых близка к изме-ренной «Вояджерами».

По этой модели определено количе-ство энергии, излучаемой горячими пятнами, в среднем по поверхности Ио  $2 \text{ Вт/м}^2$ . Новый анализ данных «Вояд-жеров» и новые наблюдения в инфра-красном диапазоне, выполненные с Мауна-Кеа, дают независимые оценки, согласующиеся с этой моделью и более ранними данными. Наилучшая совре-менная оценка среднего потока тепла от Ио, выведенная из всех этих значе-ний, составляет  $1,5 \pm 0,5 \text{ Вт/м}^2$ . Для сравнения укажем, что Земля излучает  $0,08 \text{ Вт/м}^2$ , а Луна, имеющая примерно такие же размеры и массу, как Ио, — всего  $0,03 \text{ Вт/м}^2$ . Итак, излучение Ио аномально. Если даже не вводить пред-положение о приливном разогреве, становится ясно, что на Ио радиоак-тивный распад не может быть единст-венным источником энергии.

Следует отметить, что тепловой по-ток Ио отличается от тепловых пото-ков Земли и Луны не только количест-венно, но и качественно. На Земле и Лу-не весь избыток внутреннего тепла, ге-нерируемый при радиоактивном распа-де, достигает поверхности благодаря теплопроводности через кору. (Извер-жения вулканов поставляют лишь ма-лую долю полного количества тепла.) Тепло излучается в космическое про-странство, так что температура по-верхности практически не повышается. (Поверхность нагревается главным об-разом за счет излучения Солнца.) Сле-довательно, выделяющееся из недр теп-ло недоступно измерениям в инфра-красном диапазоне. Для этого необхо-димы точные измерения температур-ного градиента в верхнем слое коры. Иное дело на Ио. Избыток внутренне-го тепла достигает поверхности преим-ущественно путем конвекции: оно пе-реносится горячими флюидами, подни-мающимися к горячим пятнам. Отсю-да оно излучается в космическое про-странство при температурах, гораздо

более высоких, чем температура по-верхности Ио, поэтому его легко изме-рить. Поток энергии со всей поверхно-сти Ио составляет от  $10^{13}$  до  $10^{14}$  Вт.

До сих пор в качестве источника энергии Ио были предложены, кро-ме радиоактивности, два возможных процесса. Один из них — приливный разогрев, другой — омический нагрев электрическими «токами», наводимы-ми в Ио вследствие взаимодействия с магнитосферой Юпитера. Т. Голд из Корнеллского университета предполо-жил, что плюмажи обусловлены имен-но этим взаимодействием, когда иони-зованное вещество поднимается с по-верхности Ио вдоль токовых линий подобно непрерывно поддерживаем-ым сильным электрическим разря-дам. Иначе трудно объяснить, как вул-канический газ разгоняется до скоро-стей, превышающих скорость звука, а также из данных магнитометрических измерений «Вояджеров», свидетельст-вующих о том, что в окрестностях Ио вдоль магнитных силовых линий течет ток силой около миллиона ампер. (Зна-чение 1 млн. ампер было получено так-же из теоретических расчетов потока ионов в магнитосфере Юпитера.)

Значение потока энергии  $10^{14}$  Вт можно использовать для проверки воз-можной роли электромагнитных эф-фектов в общем энергетическом балан-се Ио. Допустим, что весь ток, прони-зывающий Ио, превращается в ее не-драх в тепло за счет омического нагре-ва. Полное количество тепла составит  $10^{11} - 10^{12}$  Вт, т.е. не больше 0,01 ко-личества, необходимого, чтобы объяс-нить полный выход энергии. Тем не ме-нее электромагнитные эффекты могут играть немаловажную роль в таких яв-лениях, как вулканические плюмажи. Однако в этом случае «электрический разряд», вызывающий появление плю-мажа, должен создавать на Ио горячее пятно с эффективной температурой по-рядка 100 000 К. Поиски таких горячих пятен на ночной стороне Ио не увенча-лись успехом.

Тем временем возникли трудности и с гипотезой приливного разогрева. В результате приливного взаимодейст-вия как на Юпитере, так и на Ио обра-зуется приливный горб. Под влиянием приливного горба Юпитера у Ио возни-кает закручивающий момент, ускоряю-щий спутник. В результате Ио должен удаляться от Юпитера. (Аналогичным взаимодействием объясняется медлен-ное, но непрерывное удаление Луны от Земли.) Наилучшие современные оцен-ки этого взаимодействия устанавлива-ют верхний предел среднего притока энергии к Ио, причем ее значение в два раза ниже, чем измеренный поток теп-ла от Ио.

Эта проблема пока остается нерешенной. Не исключено, что тепловой

поток и вулканическая активность Ио сильно меняются во времени, и «Вояд-жеры» прибыли в период необычайно высокой активности. Возможно, что некоторые параметры и предположе-ния, принятые при расчетах эволюции орбиты и приливного разогрева Ио, неверны. Возможно также, что горя-чие пятна неравномерно распределены по поверхности Ио. Данные, собран-ные в последнее время с помощью ин-фракрасного телескопа НАСА на Га-вайских островах сотрудниками Лабо-ратории реактивного движения и Га-вайского университета, в том числе од-ним из нас (Джонсоном), указывает на то, что область вокруг структуры Ло-ки может вносить значительный вклад в полный поток тепла Ио. Если это верно и если поток от Локи и его окрестностей ошибочно приписывает-ся всему спутнику, то полная мощ-ность излучения Ио станет ближе к предсказываемой теоретически.

По-видимому, нет свидетельств то-го, что тепловой поток Ио сильно ме-няется. Данные наблюдения затмений в начале 70-х годов согласуются с ре-зультатами измерений «Вояджеров» и с данными по затмениям 80-х годов. Лишь инфракрасное излучение на дли-не волны 5 мкм характеризуется слу-чайными сильными всплесками, кото-рые связаны с процессами, постоянно происходящими на Ио. Первый такой всплеск был зарегистрирован в 1978 г. Ф. Уиттборном и его сотрудниками из Эймсского исследовательского центра с борта Койперовской летающей обсер-ватории, оборудованной на высотном самолете. Их кратковременное наблю-дение потока на длине волны 5 мкм, бо-лее чем вдвое превышающего поток, обусловленный отраженным излучени-ем Солнца, вызвал всеобщий интерес.

Эта величина потока указывает на то, что небольшая площадка, состав-ляющая  $10^{-4}$  поверхности Ио, имеет температуру около 600 К, но в то время никто не мог и подумать о вулканиче-ской активности. Накануне максималь-ного сближения «Вояджера-1» с Ио важность наблюдения Уиттборна ста-ла очевидной: инфракрасный спектро-метр космического аппарата обнару-жил на Ио небольшие районы с близки-ми значениями температуры. У. Син-тон, работающий на Мауна-Кеа, за-нялся систематическими поисками дру-гих «пятимикронных событий». Од-ним из его первых успехов было обна-ружение такого события между проле-тами «Вояджеров». Считают, что это событие было связано с изменениями вокруг кальдеры Сурут.

С тех пор Синтон накопил такую массу данных, которая стоит несколь-ких лет работы. Он обнаружил мало со-бытий, которые могли бы соперничать с зарегистрированными раньше, но его данные показывают непрерывные ва-



риации потока от «самых горячих пятен». Полное количество энергии от таких высокотемпературных областей мало: они излучают намного меньше, чем более протяженные области более низкой температуры. Значит, «пятимикронные события» не вносят значительного вклада в полный энергетический «бюджет» Ио. Тем не менее они позволяют приподнять завесу над тайной мощных событий, которые, вероятно, порождают крупные эруптивные выбросы типа Пеле. Кроме того, они способствуют поискам свидетельств в пользу силикатных лав. Вобщем говоря, наземные наблюдения Ио, в том числе данные о затмениях и инфракрасные измерения, позволяют следить за вулканической деятельностью Ио и обеспечить связь между данными «Вояджеров» и данными, которые соберет другой космический аппарат, запущенный в систему Юпитера.

**С**ЛЕДУЮЩИМ космическим аппаратом будет «Галилей». Его запуск намечен на 1986 г., к Юпитеру он приблизится в августе 1988 г. Он состоит из зонда, предназначенного для спуска в атмосферу Юпитера, и долгоживущего орбитального модуля, который позволит в течение примерно 20 месяцев вести тщательное изучение планеты, ее магнитосферы и спутников. На пути к Юпитеру «Галилей» пройдет на расстоянии меньше 1000 км от Ио, или в 20 раз ближе, чем при минимальном сближении «Вояджера». Приборы на борту «Галилея» выполнят картографирование поверхности Ио и передадут на Землю изображения, сравнимые по разрешению с изображениями земной поверхности, сделанными со спутника «Ландсат». Будет изучено взаимодействие магнитосферы Юпитера с разреженной атмосферой Ио. Переданные космическим аппаратом данные позволят модифицировать модель внутреннего строения Ио.

После максимального сближения с Ио «Галилей» должен будет покинуть ее окрестности, иначе он получит значительную дозу радиации и не сможет продолжать работу. Однако на протяжении почти всех 20 месяцев «Галилей» будет находиться в области, из которой «Вояджер» открыл вулканы Ио. Ему представится по крайней мере десять случаев сканировать Ио с тем, чтобы выявить изменения вулканической обстановки, построить тепловые карты, показывающие локализацию горячих пятен, и искать ионы, поступающие с Ио в магнитосферу Юпитера. Ио возбуждала интерес астрономов в течение почти 400 лет, пока, наконец, космический аппарат «Вояджер-1» не открыл мир, более сложный и увлекательный, чем это казалось прежде. Разумеется, на этом исследования не прекратятся.

## Водоворот событий

**Д**ОЛГОЖДАНОЕ открытие трех промежуточных векторных бозонов, состоявшееся в 1983 г. в Европейской организации ядерных исследований (ЦЕРН), усилило стремление физиков во всем мире лучше понять природу объединения электромагнитного и слабого взаимодействий. Экспериментальное доказательство существования частиц  $W^+$ ,  $W^-$  и  $Z^0$  подтвердило одно из важнейших предсказаний теории электрослабых взаимодействий, в которой слабые и электромагнитные взаимодействия рассматриваются как два различных проявления единого фундаментального взаимодействия. Успешное применение этой теории позволяет надеяться, что предсказания многих физиков о взаимодействии частиц при еще больших энергиях также могут оказаться справедливыми. Доверие к теории электрослабых взаимодействий настолько возросло, что даже большой риск потратить напрасно время, усилия и деньги считается оправданным, когда речь идет о ее дальнейшей проверке. В последующие 10—15 лет существенная часть ресурсов ведущих физических лабораторий будет направлена на изучение и проверку предсказаний этой теории. Лаборатории попытаются, и это не случайно, перехватить лидерство, принадлежащее сейчас ЦЕРНу.

Результаты, полученные в ЦЕРНе, подтолкнули физиков США к началу серьезной работы над проектом установки, названной Desertron (от англ. desert — пустыня; такое название появилось в связи с одним из вариантов предполагаемого местонахождения ускорителя). Более официально Desertron называют Superconducting Super Collider (сверхпроводниковым суперколлайдером). В этом ускорителе два пучка протонов будут разгоняться в противоположных направлениях по окружности, длина которой, возможно, будет около 100 км. В каждом пучке протоны перед столкновениями достигнут энергии примерно 10 ТэВ (10 триллионов электронвольт). Таким образом, будет высвобождаться энергия порядка 20 ТэВ. Энергия, которая может пойти в чистом виде на рождение новых частиц, должна составлять примерно 1 ТэВ, или, грубо говоря, в 40 раз больше, чем это возможно на существующей установке в ЦЕРНе. Многие физики верят, что при таких энергиях могут появиться новые частицы, называемые бозонами Хиггса, существование которых вытекает из самой структуры слабых взаимодействий.

Регистрация частиц Хиггса стала бы открытием первостепенной важности.

Вероятность того, что их можно найти с помощью установки Desertron, сплотила американскую физическую общественность вокруг этого проекта. В июне 1983 г. подкомиссия Консультативной комиссии по физике высоких энергий (НЕРАР) при министерстве энергетики США пришла к выводу о необходимости сконцентрировать денежные средства и привлечь наиболее талантливых ученых для разработки проекта Desertron; десятью голосами против семи было решено прекратить сооружение уже наполовину законченного ускорителя на встречных протонных пучках (Colliding Beam Accelerator) в Брукхейвенской национальной лаборатории. Вскоре после голосования члены НЕРАР единодушно согласились отдать предпочтение проекту Desertron.

В октябре 1983 г. министерство энергетики США перераспределило 18 млн. долл., предназначенные для сооружения Брукхейвенского ускорителя, на технико-экономическое обоснование ускорителя на ультравысокие энергии. Стоимость исследований и разработок в последующие 3—4 года оценивается в 150—200 млн. долл. Вся установка будет стоить по крайней мере 2 млрд. долл., а разработка проекта и само строительство займут, вероятно, 10—12 лет. Тем не менее многие ученые уверены, что на установке Desertron можно будет достичь энергий, имеющих очень большое значение для физики, независимо от того, будут ли обнаружены частицы Хиггса или нет. Для выполнения этой научной программы необходимо привлечь наиболее талантливых молодых физиков.

Возможности обсуждать проект Desertron мы обязаны прогрессу в области технологии изготовления надежных сверхпроводящих магнитов. Такие магниты могут сформировать мощные магнитные поля для удержания пучка частиц на орбите и управления им. Сверхпроводящие магниты дешевле в эксплуатации, чем обычные, так как сверхпроводники не оказывают сопротивления электрическому току. Сверхпроводящие магниты должны были быть установлены на брукхейвенском ускорителе. Однако трудности, с которыми столкнулись в Брукхейвене при их создании, привели к задержке со строительством и в конечном итоге к ликвидации проекта. Сейчас проблемы с магнитами решены. По сообщению директора Брукхейвенской национальной лаборатории Н. Самюэля, Desertron может стать увеличенным в 50 раз вариантом брукхейвенского ускорителя. Сверхпроводящие магниты уже

(продолжение см. на с. 73)



# Сельские общины в начале раннего железного века на территории Центральной Европы

*Результаты археологических раскопок в Баварии  
дают представление об экономическом укладе жизни  
обитателей сельских поселений в X—VIII вв. до н.э.,  
когда они начали обменивать избыточный продукт  
на изделия обособившихся ремесленников*

ПИТЕР С. УЭЛЛС

**Е**СЛИ НА Ближнем Востоке городской образ жизни получил повсеместное распространение уже к 3500 г. до н.э., то в Европе поселения, расположенные к северу от Альп, оставались небольшими по размеру вплоть до конца бронзового и начала железного века. В этой части света переход к городскому укладу жизни впервые намечился примерно к 800 г. до н.э. То было время стремительных перемен на европейском континенте с его умеренным климатом, выразившихся в росте торговли и развитии производства металлов. Археологические данные об этом переходном периоде получены в основном при раскопках кладбищ, число которых достигает нескольких тысяч, а также по случайным (но отнюдь не редким) находкам кладов металлических изделий. Однако, поскольку систематически исследовались лишь некоторые европейские поселения этого периода, экономические факторы, действие которых обусловило образование городов в Центральной Европе, по-прежнему остаются малоизученными. В настоящей статье приводится описание находок, обнаруженных на территории Нижней Баварии во время раскопок сельского поселения этого периода, и раскрывается связь этих находок с развитием, как в данном районе, так и повсюду в Центральной Европе, более крупных поселений — предшественников средневековых торговых городов.

Поселение Хашеркеллер расположено на песчано-гравийной террасе, которая образует северную границу узкой речной долины на окраине Ландсхута, главного города Нижней Баварии. Терраса расположена на высоте 15 м над уровнем реки Изар (приток Дуная) и сложена из принесенных водой отложений ледникового дебриса, перекрытых мощным слоем лёсса, наносной почвой палевого цвета. Лёсс в свою очередь перекрыт плодородным гуму-

сом, который является продуктом развития почвы в течение тысячелетий. Верхние 40 см гумуса нарушены современной глубокой вспашкой, вследствие чего от изначальной поверхности доисторического поселения ничего не осталось. Сохранились лишь темные, заполненные гумусом углубления в непо потревоженной поверхности лёсса (различные ямы и пограничные рвы), которые явились результатом деятельности обитателей поселения.

**Р**АСКОПКИ начались в 1978 г. и велись четыре сезона. Территория будущего раскопа была разбита на участки 5 × 10 м, большей частью прилегавшие друг к другу. Потревоженный вспашкой гумус был удален лопатами в два этапа, на каждом из которых снимался слой толщиной 20 см. Археологический материал, собранный в потревоженном гумусе, регистрировался с указанием слоя и участка, где он был найден. После снятия этого поверхностного слоя работа велась мотыгами и небольшими лопатками, пока не открылась подстилающая лёссовая порода. Перед тем как вскрыть углубленные в лёсс остатки поселения (ямы и рвы), выявленные в результате этой работы, их нанесли на план и сфотографировали. Гумусное заполнение каждой ямы затем разделили на две части, и каждую половину исследовали отдельно. Все выбранное заполнение просеивалось через сито с ячейками 0,5 см.

В ходе дальнейшей работы выяснилось, что поселение состояло из трех участков, каждый из которых был обнесен двойным рвом. Эти участки примыкали друг к другу и были вытянуты с востока на запад. Северная, восточная и западная стороны участков были хорошо выражены, а южная сторона оказалась размытой в результате водной эрозии. В год начала раскопок и в

последующие сезоны работы были сосредоточены на западном и среднем участках.

Хотя верх двойных рвов и разрушен вспашкой, ширина их сохранившейся части тем не менее достигала трех метров. Раскопки показали, что рвы суживались клином и имели глубину около полутора метров. Заполнение рвов было темно-коричневого цвета и содержало небольшие фрагменты керамики и костей животных. На дне одной из секций внутреннего рва западного участка обнаружено 19 столбовых ям, расположенных в ряд. Очевидно, на этом месте в свое время стоял палисад. Расстояние между центрами столбовых ям составляло в среднем 13,7 см. Если допустить, что эта цифра выражает величину среднего диаметра столбов, можно сделать вывод о большой прочности палисада.

Экспериментально доказано, что врытые в землю столбы гнивают за несколько десятилетий. И хотя другие столбовые ямы пока не обнаружены, во многих рвах выявлены следы перекопов, которые, вероятно, потребовались для того, чтобы заменить сгнившие столбы новыми. Это дает основания предполагать, что палисады были установлены во всех рвах. Они скорее всего служили не столько для защиты от нападения врагов, сколько для того, чтобы домашний скот не мог выйти за пределы поселения, а дикие животные не могли проникнуть в него.

**Б**ОЛЬШАЯ часть сведений о жизни обитателей хашеркеллерской общины получена на основании исследования содержимого ям, обнаруженных на месте поселения. Из 21 самой большой вскрытой ямы 11 относились к территории поселения, состоявшей из трех участков, что было установлено по содержанию этих ям. Остальные 10 ям частично принадлежали более мелким





ПРЯМОУГОЛЬНЫЕ РАСКОПЫ позволили вскрыть одну из трех сельскохозяйственных усадеб Хашеркеллера, поселения железного века в Нижней Баварии. По цвету грунта про-

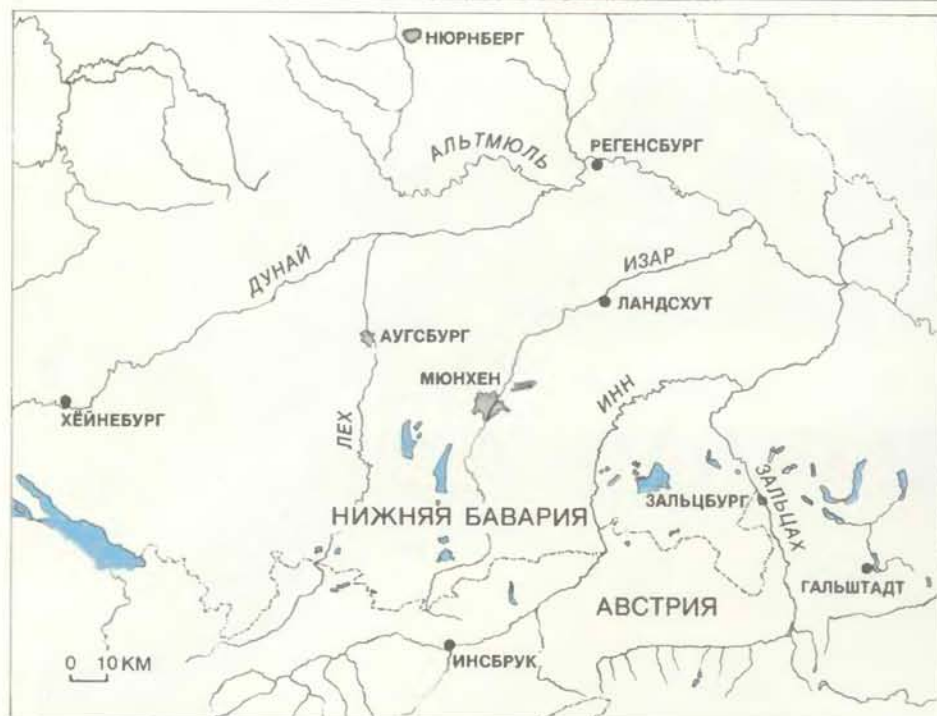
слеживается часть системы рвов, отделявших эту усадьбу от соседней. Во рвах устанавливали палисады, чтобы домашние животные не могли выйти за пределы поселения.



ПРОФИЛЬ РВА, вырытого в Хашеркеллере 3 тыс. лет назад. В желтоватой лёссовой подпочве видно V-образное углубление, заполненное темным гумусом. Здесь показан один из

двух concentрических рвов, опоясывавших сельскохозяйственные усадьбы с запада. Во рвах найдены обломки костей, куски обожженной обмазки и фрагменты керамики.





СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ УСАДЬБЫ обнаружены при раскопках террасы реки Изар на окраинах Ландсхута. Неподалеку расположены поселения эпохи железа — ремесленный центр Гальштадт и торговый город Хейнебург.

и более ранним поселениям бронзового века и частично более поздним поселениям периода римского завоевания. Темное заполнение ям, так же как и заполнение рвов, отчетливо выделялось на фоне подстилающего лёссового слоя. Заполнение ям было даже темнее заполнения рвов, что указывало на большее содержание в нем органических веществ.

Форма, размеры и характер содержимого 11 ям говорят о том, что каждая из них выполняла одну из пяти функций. Три ямы, длинные узкие чашеобразные в разрезе, были ориентированы по сторонам света: две — по линии север-юг и одна — по линии восток-запад. Такая ориентация, как свидетельствуют археологические данные, характерна для жилищ этого периода повсюду на территории Европы. Отсюда можно предположить, что эти ямы были «погребями» при жилищах и предназначались, вероятно, для хранения больших глиняных сосудов с продуктами питания. Сосуды предохраняли продукты от влаги и температурных перепадов, и кроме того, содержащиеся в сосудах продукты были недоступны для животных. Вывод о том, что эти три ямы были хранилищами, подтверждается найденными в них фрагментами керамики, в основном обломками толстостенных сосудов.

Три ямы, круглые в плане и с почти отвесными стенками, оказались самыми глубокими. При раскопках других поселений этого периода в подобных ямах находили обугленное зерно. Дно и стены таких ям были выложены плет-

нем или обмазаны глиной, что указывало на использование их для хранения зерна. Содержимое трех ям в Хашеркеллере не позволяло сделать столь однозначный вывод об их назначении. В них были найдены лишь несколько черепков и прочий мусор, однако это не означает, что они не могли применяться в тех же целях.

Две другие ямы, очевидно, были связаны с металлургией. В одной из них обнаружены отбойник и форма из песчаника для отливки перстней. Рядом найдено несколько кусочков бронзового лома. В соседней яме находились покрасневшие галька и грунт; их неестественный цвет, несомненно, результат воздействия сильного жара. Можно предположить, что в этой яме плавляли бронзу и потом заливали ее в формы. В яме, где была найдена литейная форма, обнаружены также грузило от ткацкого станка из обожженной глины и пять глиняных пряслиц. Эти находки говорят о том, что обитателям поселения было известно не только литейное дело, но и ткачество.

В большой яме в нескольких метрах от центрального участка содержалось значительное количество древесного угля и остатки сооружения из глины в виде короба. Из этой же ямы было извлечено больше половины всех обломков керамики, найденных на стоянке. В основном это были обломки посуды, лопнувшей или покоробившейся при обжиге и выброшенной за ненадобностью, — «производственный брак». Отсюда следует, что обнаруженное на дне ямы сооружение из глины было в

свое время топочной камерой гончарного горна.

Две последние неглубокие ямы с покатыми стенами содержали небольшие фрагменты керамики и кости животных. Не вызвало сомнения, что из этих ям люди брали лёсс, служивший им сырьем для изготовления керамики, а также для обмазки домов. Со временем эти ямы заполнились мусором. В общей сложности в 11 ямах было собрано 198 кг спекшейся обмазки. Обмазка была обожжена либо в результате пожара построек, либо потому, что стена, на которую она была нанесена, примыкала к очагу или какому-либо другому источнику сильного жара. Остальная обмазка попросту выветрилась и смешалась с почвой после того, как постройки были заброшены.

**САМОЕ** наглядное представление о жизни обитателей Хашеркеллера дают остатки керамической посуды. При раскопках всего было собрано 14 853 обломка посуды. Большая часть их найдена в заполнении ям. Во рвах, в гумусных пластах, перекрывавших подстилающий лёссовый слой, и в других местах собрано 3828 черепков. Судя по ним, вся посуда в Хашеркеллере была простой и грубой, что характерно для ординарной сельской керамики. Орнаментированных черепков найдено немного, менее четырех процентов от общего числа, хотя богато украшенные сосуды часто встречаются в местах захоронений этого периода на территории Центральной Европы.

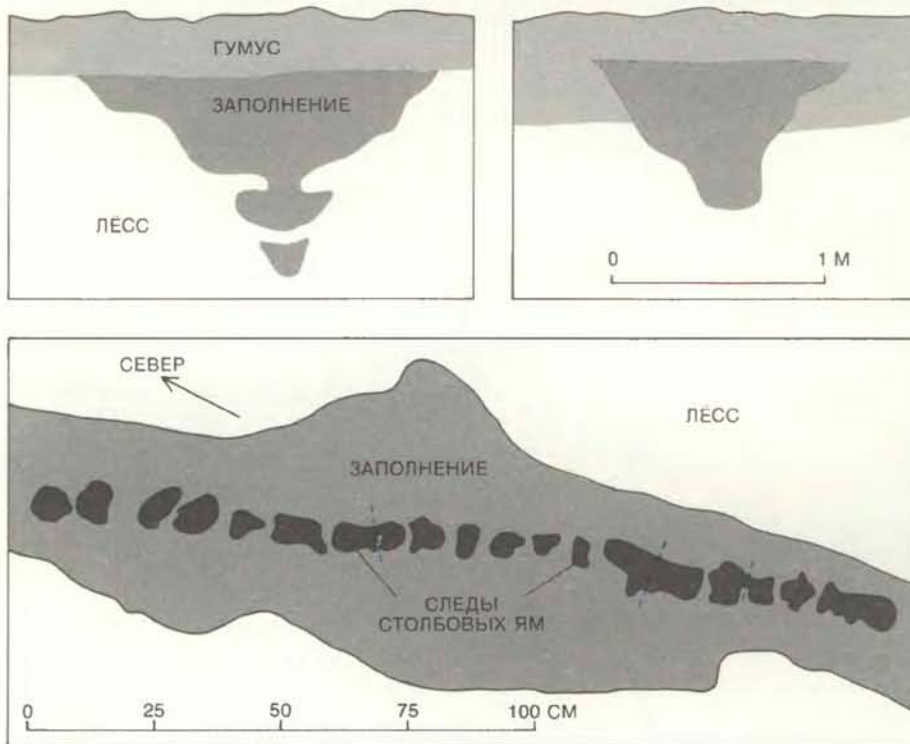
Найденные фрагменты керамики можно разделить по толщине на три группы. Черепки первой группы — это остатки сравнительно тонкостенной посуды. Ко второй группе были отнесены черепки толщиной от 4,5 до 9 мм. Более толстые черепки составляли третью группу. В первой группе оказались обломки чашек, небольших кубков и мисок. Их было сравнительно немного, и они чаще других украшены орнаментом. Обломки больших по размеру мисок и высоких кувшинов с широким горлом принадлежали ко второй группе. В третью группу вошли в основном обломки кувшинов с грубой поверхностью, которые, по всей вероятности, применялись для хранения пищи. Подобные сосуды с остатками зерна внутри нередко находят в ямах-хранилищах при раскопках поселений этого периода.

Помимо обожженной обмазки, обилие которой позволяло узнать о расположении построек Хашеркеллера, наиболее многочисленными находками здесь были фрагменты костей животных. Всего обнаружено 1435 таких фрагментов. При исследовании этого материала докторант Нью-Йоркского университета Бренда Бенефит выявила 235 фрагментов, поддававшихся идентификации. Определенные кости при-

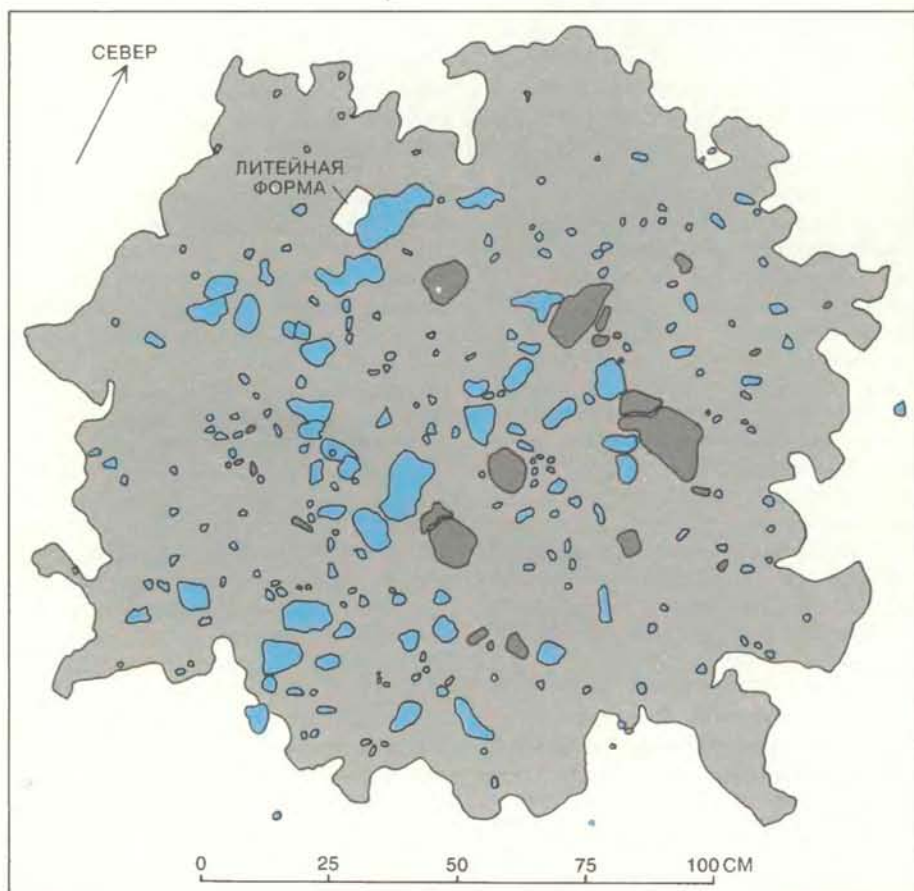








РВЫ V-ОБРАЗНОЙ ФОРМЫ В ПОПЕРЕЧНОМ СЕЧЕНИИ (вверху) заполнены темным гумусом. На плане части одного из рвов (внизу) видны 19 столбовых ям, расположенные на отрезке длиной 1,6 м. Цветным пунктиром обозначены двойные ямы. На плане часть внутреннего рва западного участка.



«ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ» ЯМА в прямоугольнике N помимо литейного и ткацкого инвентаря содержала многочисленные фрагменты керамики (темный тон) и обмазки (синий цвет). Судя по количеству найденной обмазки, ею были покрыты стены «мастерской». Вверху показано место находки литейной формы.

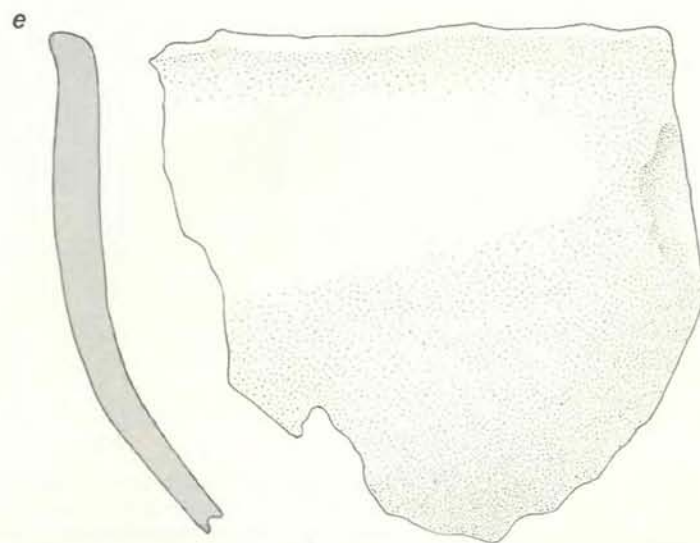
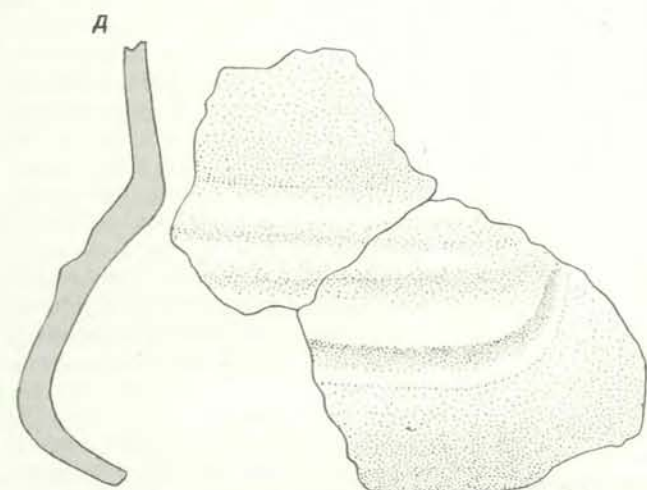
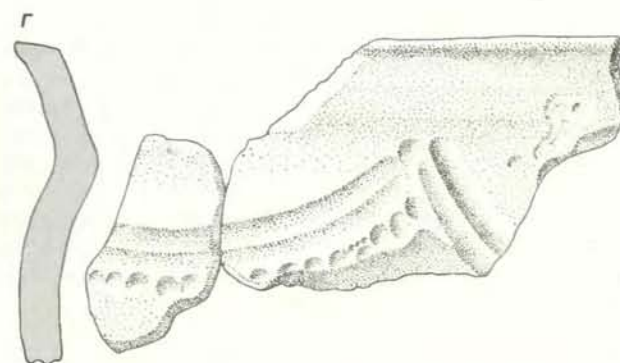
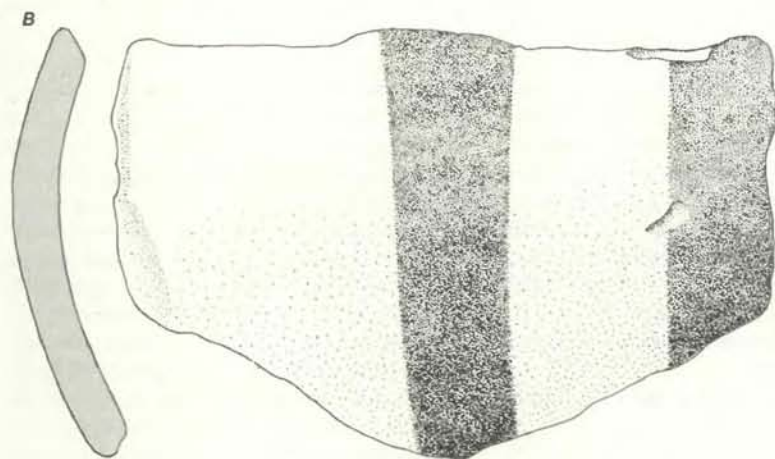
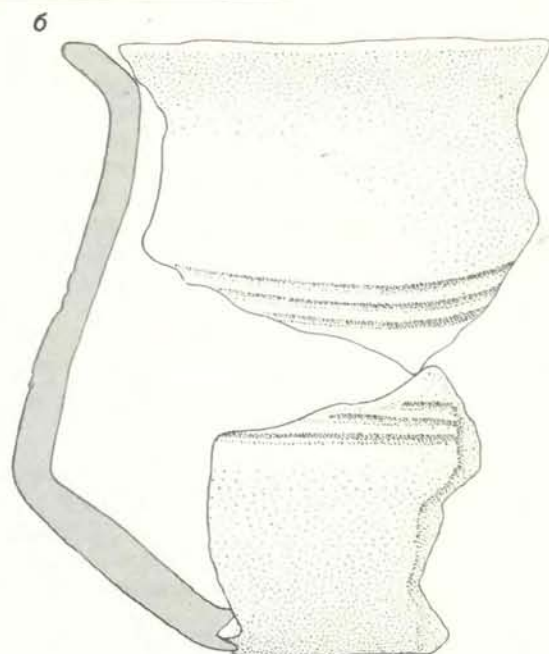
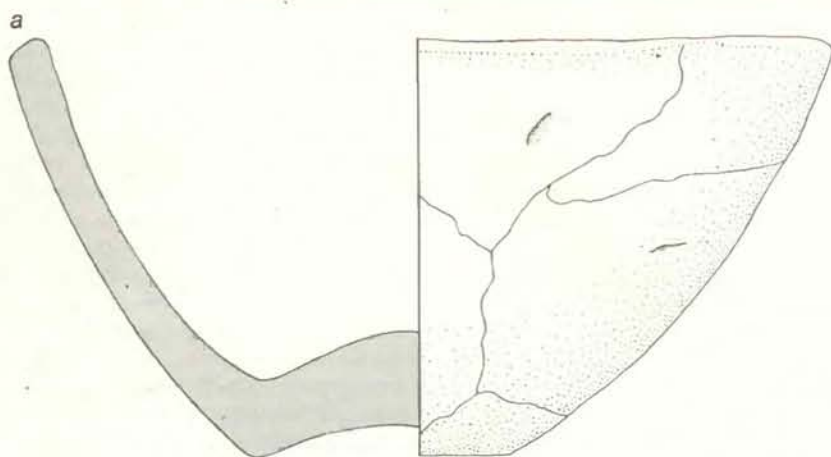
ные усадьбы Хашеркеллера, площадь каждой из которых равна 3 тыс. м<sup>2</sup> и определяется границами обнесенного рвами участка, по размеру примерно соответствуют отдельным усадьбам многих других более ранних поселений Европы. Представляется, что на каждом участке жила семья численностью от пяти до десяти человек, которая имела жилище, хлев и более мелкие сооружения (сарай, кустарные мастерские и т.д.). Свидетельством того, что все три усадьбы функционировали в одно и то же время, служат опоясывающие их по периметру рвы. Они хорошо стыкуются друг с другом и нигде не пересекаются.

Представить себе уклад жизни пятнадцати или тридцати жителей поселения можно, лишь выяснив, каким было хозяйство, которое они вели. Для этого необходимо ответить на три вопроса: что давало им средства к жизни, знали ли они ремесла и торговали ли они? Многочисленные находки свидетельствуют о натуральном способе ведения хозяйства. Занимаясь скотоводством, дававшим мясные и молочные продукты, и выращивая злаковые и бобовые культуры, каждая семья получала необходимые средства к жизни. Подсобную роль по отношению к скотоводству играли охота и рыболовство, а по отношению к земледелию — собирательство диких растений. Неизвестно, получали ли они избыток мяса и зерна, однако вполне вероятно, что такие виды деятельности, как приготовление сыра и выделывание кож, позволяли им получать и иметь в запасе продукты и предметы потребления в количествах, превышавших их нужды.

Какие же еще предметы потребления, помимо сыров, кож и, возможно, мяса, могли производиться здесь в избыточных количествах? Керамика не могла входить в их число. В Хашеркеллере каждый глиняный сосуд, будь то миска, чашка или кувшин, изготавливали без гончарного круга. Посуду лепили вручную: к донцу сосуда приращивали глиняный жгут и, сплющивая его, по кругу наращивали стенки, постоянно сглаживая их ладонью. Процесс этот был трудоемким и вряд ли мог обеспечить избыток посуды. Однако, судя по найденным деталям ткацкого станка (грузики и пряслица) и принимая во внимание установленный факт, что овец жители поселения держали на протяжении ряда лет, справедливо допустить, что предметом потребления, производившимся в избытке, была шерстяная ткань.

Теперь, ответив на два первых вопроса, перейдем к вопросу о торговле. Указанием на то, что жители поселения пользовались материалами, ввезенными из других мест, являются найденные бронзовые изделия, в частности перстни, изготовленные из привоз-





ПРОФИЛИ ШЕСТИ СОСУДОВ полностью или частично восстановлены по черепкам. Орнаментированные черепки тоньше, чем без орнамента (а). Один из сосудов украшен черными полосами (в). Для этого сосуд перед обжигом натира-

ли графитом. До ближайших источников графита 100 км, поэтому можно предположить, что графит завозили как предмет торговли.



ного лома. Несколько найденных бронзовых булавок также могли быть предметами ввоза. С другой стороны, при раскопках обнаружено пять обломков железных предметов. Определить, что это были за предметы, не удалось, так как обломки были слишком малы и сильно повреждены ржавчиной. Хотя эти находки позволяют считать Хашеркеллер поселением железного века, они отнюдь не дают основания полагать, что его жители ввозили предметы из железа. Железная руда встречается повсюду, чего нельзя сказать о сырье для получения компонентов бронзы, в особенности олова. Найденный в Хашеркеллере кусок железного шлака свидетельствует о том, что местные люди умели получать железо. В то же время свидетельств выплавки бронзы в этих местах не обнаружено.

**П**РЕДМЕТАМИ ввоза были также стеклянные бусы и графит, который использовался для украшения немногих здешних сосудов. Натертая графитом глина после обжига приобретает черную лощеную поверхность. Обычно графитом покрывали либо весь сосуд, либо в виде орнамента на него наносили графитовые полосы. Украшение керамики таким способом получило особенно широкое распространение в Центральной Европе и в начале первого тысячелетия до н.э. Ближайшие к Хашеркеллеру залежи графита находятся по меньшей мере в ста километрах от него, к западу от г. Пассау на Дунае, и на севере Чехии. Что касается бус, то о них можно судить по найден-

ным среди прочих вещей четырем бусинам голубовато-зеленого цвета. Две из них были найдены в заполнении ямы, содержащей гончарный горн, и две — в заполнении соседней ямы. Где было налажено производство стеклянных изделий — неизвестно, но ни в Хашеркеллере, ни в каком-либо другом исследованном центральноевропейском поселении этого периода следов производства стеклянных изделий не выявлено. Однако, судя по сравнительно широкому распространению таких бусин, можно предположить, что было несколько центров их производства, которые поставляли свои изделия сельским жителям данного региона.

Для понимания причин, определивших последующее развитие в железном веке городов на территории Европы к северу от Альп, исключительно важно то обстоятельство, что все предметы ввоза, будь то бронзовый лом, графит или бусы, были предметами роскоши. Изготавливавшиеся в Хашеркеллере металлические серпы и другие земледельческие орудия, несмотря на их кажущуюся изящность, были предметами труда. Однако, для того чтобы разводить свиней, земледельцу не нужны были ни бронзовые браслеты, ни булавки, ни украшенная графитовым орнаментом посуда, а выращивать просо можно и без голубовато-зеленых бус. Для приобретения предметов первой необходимости торговля с внешним миром здешним жителям была не нужна. Она была нужна им для приобретения предметов роскоши.

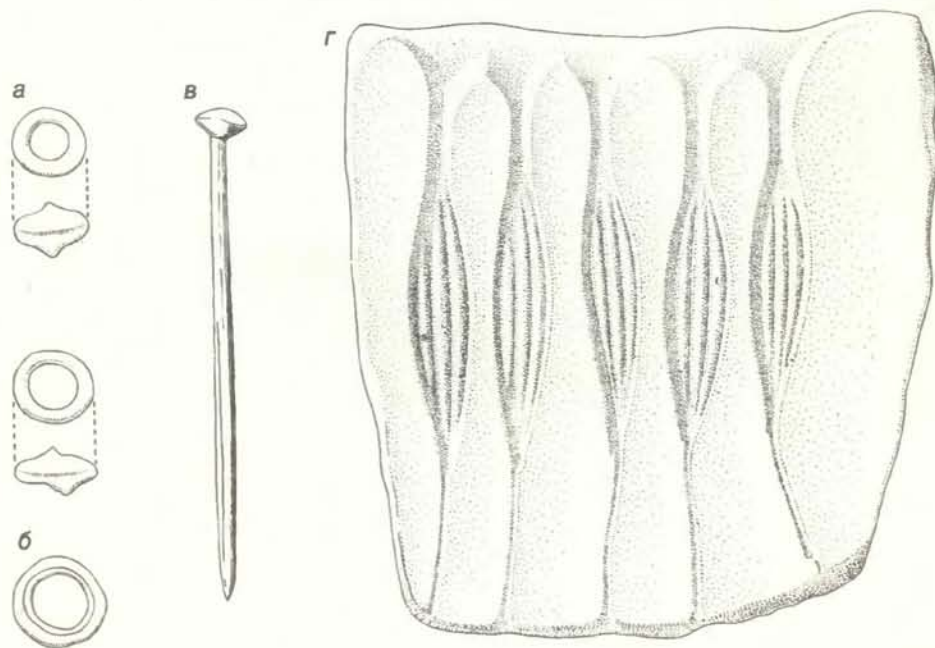
Когда и как долго существовало по-

селение? С помощью анализа на содержание радиоуглерода в шести образцах древесного угля, взятых из трех ям, установлено, что люди поселились здесь в период между 1000 и 800 гг. до н.э. Найденные здесь керамические и бронзовые предметы, а также привозные стеклянные бусины указывают в свою очередь на археологический период, который в истории Центральной Европы носит название гальштат Б. На основании сопоставления археологического материала этого периода с материалом средиземноморских культур, исторические сведения о котором хорошо известны, принято считать, что период гальштат Б продолжался три столетия — с 1000 по 700 г. до н.э. Таким образом, данные абсолютной и относительной хронологий хорошо согласуются.

Мы, однако, не можем опереться на столь же прямые данные при ответе на вопрос о длительности существования исследуемого поселения. Рвы были перекопаны, и можно предположить, что это потребовалось для замены сгнивших палисадов. Но, прежде чем прийти в негодность, бревна палисадов должны были простоять в земле несколько десятилетий. Следовательно, и срок жизни поселения не мог оказаться меньшим. Определить этот срок помогают куски обожженной обмазки, которые указывают на то, что стены некоторых сооружений обмазывались и окрашивались дважды или трижды. Следовательно, в поселении Хашеркеллер люди жили на протяжении двух или трех поколений. Мог ли этот период оказаться еще более длительным? И данные радиоуглеродного анализа, и анализ керамики указывают на то, что это поселение не могло существовать более двухсот лет. Керамика, найденная здесь, полностью однородна по стилю. Трудно представить, что в течение более двух столетий уклад жизни обитателей поселений мог оставаться неизменным.

**П**ОСЛЕ четырех сезонов раскопок стало окончательно ясно, что обитатели Хашеркеллера жили общиной, которая была экономически независима от внешнего мира, так как ее хозяйство давало ей все необходимое, но все же имела торговые связи с Центральной Европой, откуда завозились скромные предметы роскоши в обмен на шерстяную одежду, ткань или пряжу, возможно масло, солонину и шкуры (или готовые изделия из кожи).

В тот период в Центральной Европе повсеместно наблюдался подъем земледельческого производства. Независимо от того, было ли поселение Хашеркеллер обитаемо в течение полных двух веков, другие сельские поселения в ту пору существовали на протяжении такого же или гораздо большего срока. Унавоживание, пары и севооборот со-



ПРЕДМЕТЫ РОСКОШИ, найденные при раскопках в Хашеркеллере: стеклянные бусины (а), бронзовое кольцо (б) и бронзовая булавка (в). Обнаружена также форма для отливки полос (г), которые служили заготовками для изготовления перстней; самих перстней найти не удалось. По-видимому, и бронзовая булавка, и кольцо, и бусины, а также графит, который использовался для украшения посуды, были приобретены в обмен на излишки сельскохозяйственной продукции.



хранили плодородие почвы. Орудий из металла стало намного больше; изготавливали не только серпы, но и топоры, пилы, долота, молотки и другие предметы, повышавшие производительность труда древнего человека.

Представим на миг, что в результате развития металлургии стали возникать объединения кузнецов, которые сами уже не занимались сельским хозяйством. Судя по находкам в погребениях, в этот период из металла изготавливали не только орудия труда. Умерших хоронили вместе с богатым оружием и предметами быта: мечами, шлемами, большими бронзовыми сосудами и золотыми украшениями. Как же кузнецы обеспечивали себя продуктами питания? Скорее всего они обменивали свои изделия на избыточный сельскохозяйственный продукт все более производительных сельских поселений. Можно даже предположить, что были странствующие посредники, с помощью которых осуществлялись торговые связи.

Согласно археологическим источникам, подобное объединение ремесленников существовало между 800 и 400 гг. до н.э. на территории нынешней Австрии, в 160 км от Хашеркеллера. На соляных копиях Гальштата (в окрестностях города Гальштат, от которого получила свое название западноевропейская культура раннего железного века. — *Перев.*) эта община примерно из двухсот человек занималась исключительно тем, что добывала соль и торговала ею. Чрезвычайно богатый сопровождающий инвентарь гальштатских погребений этого периода красноречиво свидетельствует об успехе рискованного эксперимента по ведению однотоварного хозяйства этой общиной. Первые гальштатские соледобытчики появились около 1000 г. до н.э., и вполне возможно, что они были земледельцами или скотоводами и сначала добывали соль главным образом для собственных нужд, точно так же, как в последующие столетия обитатели небольшого поселения Хашеркеллер помимо земледелия и скотоводства занимались бронзолитейным делом, пряли шерсть, ткали и готовили сыр.

Как бы то ни было, возникновение города Гальштата не было случайным. В этот период в пограничном районе Альп на территории современной Словении один за другим появляются города с сотнями жителей, в которых бурно развивается металлургия и обработка железа. Ближе к Хашеркеллеру, в юго-западной Германии, хорошо изученное поселение Хейнебург в свое время стало крупным торговым центром. Это тесное скопление крепких деревянных построек немногим отличалось от торговых городов раннего средневековья, до появления которых оставалось еще

четырнадцать столетий. Ремесленники Хейнебурга, как и подобных ему торговых городов Центральной Европы, занимались разными ремеслами, а не специализировались в одной какой-то области. Однако отличительной функцией городов была торговля. Ни один из этих больших населенных пунктов не мог существовать без поддержки тысяч небольших поселений типа Хашеркеллера, которые имели возмож-

ность получать все больший избыток сельскохозяйственной продукции и желание обменивать его на товары горожан. Герой шекспировской «Бури» Антонио говорит: «Все, что прошло, — пролог». Вот и Хашеркеллер раннего железного века был прологом урбанизации средневековья и эпохи Возрождения, которая в конечном счете определила облик современного мира.

## Издательство МИР предлагает:

### Р. Хейвуд ТЕРМОДИНАМИКА РАВНОВЕСНЫХ ПРОЦЕССОВ

Перевод с английского



Среди достаточно многочисленных монографий и учебных руководств, посвященных рассматриваемому предмету, книга профессора Кембриджского университета Хейвуда выделяется тем, что она заставляет по-иному взглянуть на совершенное «здание» термодинамики. Этот труд — плод многолетнего преподавания инженерной термодинамики. В нем логика аксиоматических построений и доказа-

тельства теорем сочетаются с анализом действия конкретных тепловых машин. Такое органическое сочетание абстракции с инженерным расчетом — явление редкое в современной научной литературе.

Книга адресована в большей мере инженерам, чем научным работникам, хотя многие ее разделы представляют интерес как для физиков, так и для химиков.

1983, 35 л. Цена 5р. 20к.





# Спираль ДНК

*Рентгеноструктурный анализ кристаллов трех типов двуспиральных молекул ДНК показал, что генетическая информация, закодированная в последовательности нуклеотидов, может проявляться в локальной структуре спирали*

РИЧАРД Э. ДИКЕРСОН

**Д**ВОЙНАЯ спираль ДНК содержит информацию двух разных типов, которые кодируются и считываются по-разному. Собственно генетическая информация, т.е. информация, определяющая структуру белков, записана привычным триплетным кодом. Этот код линейен, а расшифровка его происходит вне ДНК. Последовательность триплетов (триплет — это тройка оснований) в одной из цепей двойной спирали ДНК кодирует последовательность аминокислот в полипептидной цепи молекулы белка. Однако прямого структурного соответствия между определенным триплетом оснований и той аминокислотой, которую он кодирует, по-видимому, не существует, и реализация информации этого типа осуществляется не самой ДНК, а с помощью целого набора «устройств»: матричных РНК, рибосом, транспортных РНК и необходимых ферментов.

В ДНК записана не только наследственная информация, но и «инструкции» для избирательного чтения того или иного фрагмента записи. Все то немногое, что известно об этом аспекте кодирования, получено при изучении генетической регуляции в бактериях. Оказалось, что сразу несколько генов, сгруппированных на бактериальной хромосоме, могут выключаться при связывании белка-репрессора с оператором — особым участком ДНК, содержащим последовательность оснований, узнаваемых репрессором. Гены снова становятся активными, когда определенные небольшие молекулы вступают во взаимодействие с репрессором и отсоединяют его от оператора. Хотя о генетическом контроле у более сложных организмов известно пока немного, большинство молекулярных биологов считают, что основные принципы генетической регуляции у них такие же, как и у бактерий.

Узнавание оператора репрессором происходит непосредственно, вероятно, благодаря образованию водородных связей между атомами азота и кислорода аминокислотных остатков репрессора, с одной стороны, и парами комплементарных оснований двойной спирали оператора — с другой. При этом структура ДНК в операторном

участке должна быть точно подогнана к специфической конформации белка-репрессора. Следовательно, информация, определяющая генетическую регуляцию, трехмерна, ее расшифровка происходит непосредственно на ДНК и зависит от структурных свойств регуляторного белка и двойной спирали.

Еще четыре года назад о деталях строения ДНК мы знали так мало, что было бы некорректно даже ставить вопрос, играет ли ДНК только пассивную роль в процессе узнавания (т.е. боковые цепи аминокислот белка проникают в статичную двойную спираль, узнавая определенный ее участок) или же последовательность оснований влияет на геометрию спирали так, что обеспечивает связывание регуляторного белка с нужным участком ДНК.

Модель ДНК в виде двойной спирали была предложена в 1953 г. Дж. Уотсоном и Ф. Криком на основании анализа полученных Р. Франклином и М. Уилкинсом картин рентгеновской дифракции волокон ДНК. Дальнейшие исследования показали, что ДНК может существовать в двух формах: В (при высокой влажности) и А (при низкой). Для обеих форм были построены молекулярные модели. Однако, изучая дифракционные картины волокон ДНК, можно получить лишь ограниченный объем информации о ее структуре, так как цепи ДНК расположены вдоль оси волокна беспорядочно. Самое большее, что удалось понять — это что ДНК в целом имеет спиральную структуру. Никаких локальных вариаций конформации спирали, зависящих, возможно, от последовательности оснований, заметить было нельзя.

В настоящее время тонкие особенности структуры ДНК могут быть выявлены и точно измерены. Исследователи научились синтезировать в необходимом количестве и получать в достаточно чистом виде короткие участки ДНК заданной последовательности, что в свою очередь дало возможность закристаллизовать фрагменты ДНК длиной от 4 до 24 пар оснований и исследовать такие кристаллы с помощью методов рентгеноструктурного анализа. В этой статье пойдет речь о некоторых неожиданных результатах, кото-

рые были получены при изучении кристаллов коротких двуспиральных молекул ДНК.

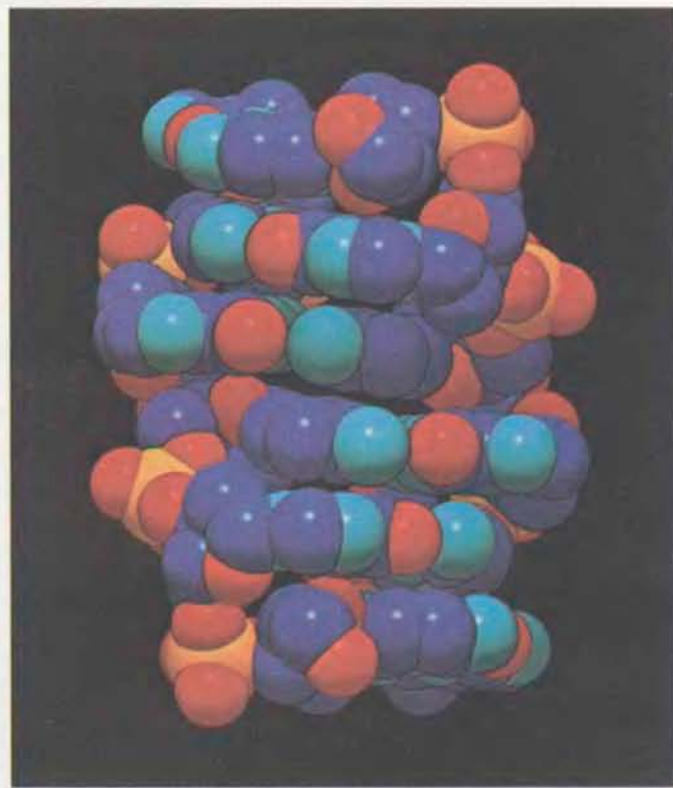
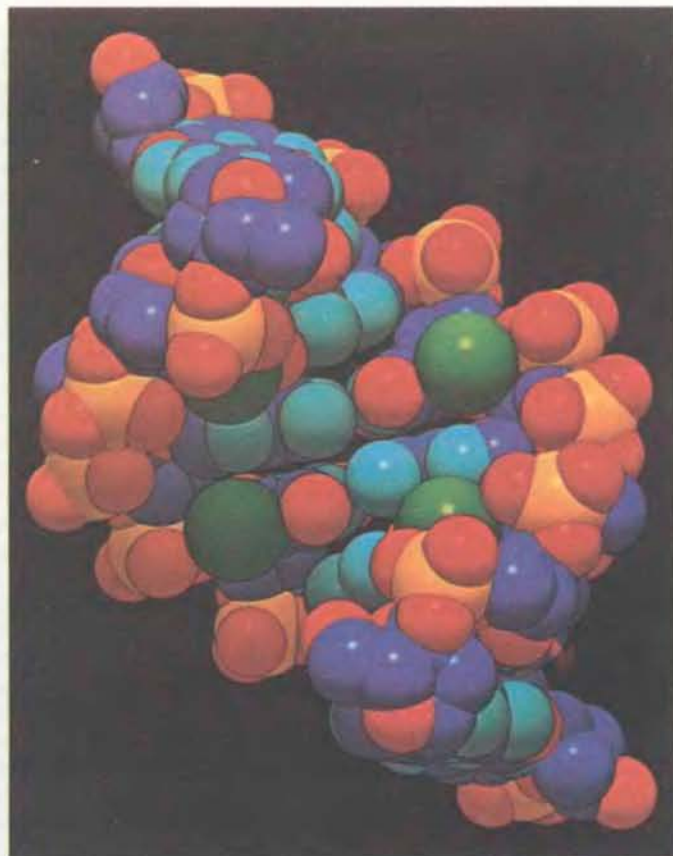
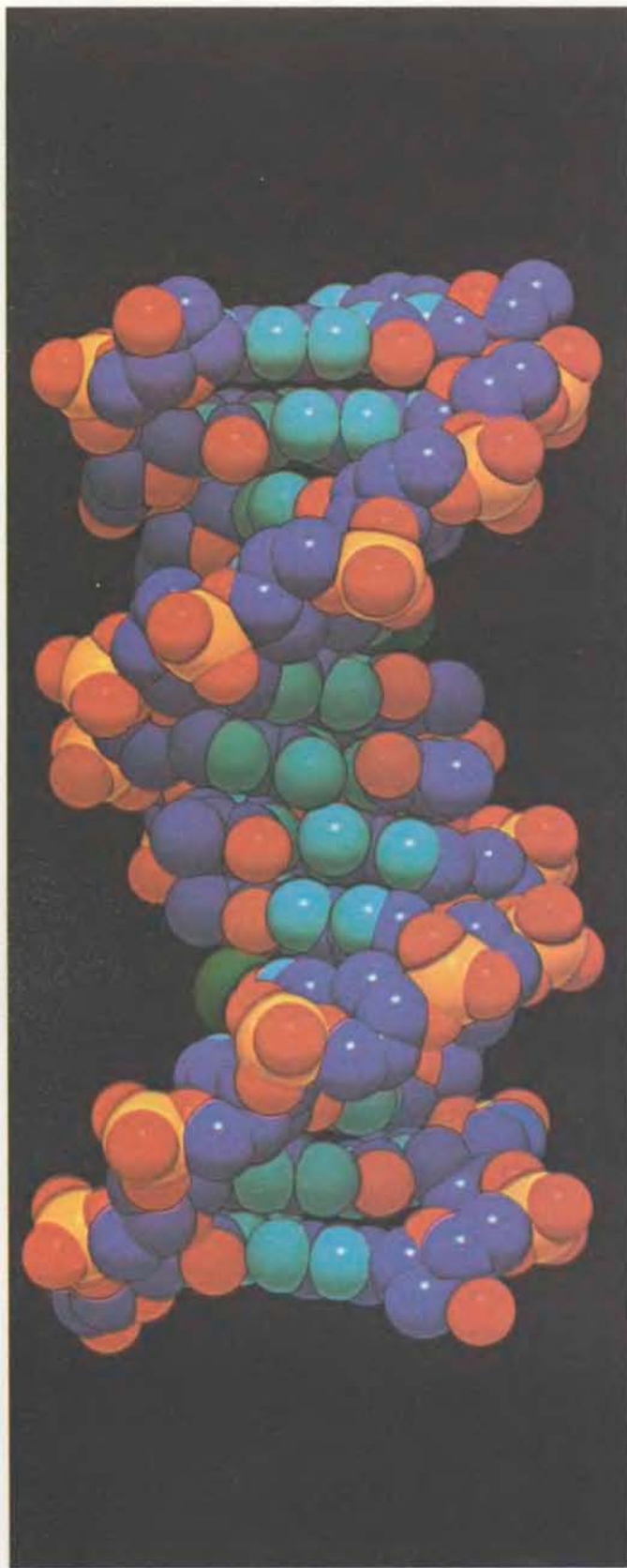
## Дифракция волокон

При исследовании рентгенограмм вытянутых волокон и тонких пленок природных ДНК были выявлены основные параметры двух главных типов структуры двойной спирали: В-формы, которая устойчива при относительной влажности выше 92%, и А-формы, которую принимает большинство нуклеотидных последовательностей, когда влажность падает ниже 75%. Обе формы похожи на гибкую лестницу, спирально закрученную вокруг центральной оси. Перилами «лестницы» служат чередующиеся остатки дезоксирибозы и фосфатные группы, а ступеньками — пурин-пиримидиновые пары оснований. (В состав ДНК входят нуклеотиды четырех типов: А, G, C и T; аденин (А) и гуанин (G) являются пуринами, в структуру молекулы у них входят два конденсированных кольца, а тимин (Т) и цитозин (C) являются пиримидинами — у них одно кольцо. Основания соединены в пары водородными связями: аденин обычно образует две связи с тиминном, а гуанин — три связи с цитозином.)

Точки присоединения оснований к сахарным остаткам в разных цепях ДНК расположены не строго друг против друга по отношению к оси спирали (см. рис. на с. 37). Это важно для всей геометрии двойной спирали ДНК. С той стороны от оси спирали, где угол между сахарными кольцами меньше 180°, имеется желоб\*, называемый малой бороздкой; с противоположной стороны находится большая бороздка. Когда пары нуклеотидов собраны в

\* Иногда малый желоб называют гликозидным, поскольку в его сторону направлены гликозидные связи, соединяющие сахарные остатки с основаниями; большой желоб называют соответственно негликозидным. Делается это во избежание путаницы. Дело в том, что если в В-форме малая бороздка узкая, а большая — широкая, то в А-форме, наоборот, малый (гликозидный) желоб шире большого (негликозидного). — *Прим. ред.*





МОДЕЛИ ТРЕХ ТИПОВ ДВОЙНОЙ СПИРАЛИ, построенные Н. Максом (Ливерморская национальная лаборатория им. Лоуренса) с помощью ЭВМ. Изображены короткие двухцепочечные молекулы ДНК, структура которых была расшифрована методом рентгеноструктурного анализа кристаллов. Атомы углерода *темно-синие*, азота *голубые*, кислорода *красные*, фосфора — *желтые*. К некоторым основаниям присоединены атомы брома (*зеленые*). Слева: В-ДНК из 12 звеньев. Спираль обращена к зрителю большой бороздкой.

Хорошо видно, что сахаро-фосфатный остов закручен в правую спираль. *Справа вверху*: А-спираль из 8 звеньев. Это также правая спираль. В глубине большой бороздки хорошо видно, как наклонены пары оснований к вертикальной оси спирали. *Справа внизу*: Z-ДНК. Это левая спираль (обратите внимание на фосфатные группы в верхнем правом углу и нижнем левом). Остов ее зигзагообразен, единицей спирали является не одна пара оснований, как в А- и В-ДНК, а две.



спираль, фосфатные группы составляют как бы стенки большого и малого желобков, закручивающихся вокруг оси спирали, а «края» оснований образуют в них дно.

Дно большой бороздки выстлано атомами азота и кислорода, которые могут соединяться водородными связями с боковыми цепями аминокислотных остатков белка и, следовательно, играть существенную роль в непосредственном узнавании. Расположение групп, способных образовывать водородные связи, в пуриновых и пиримидиновых основаниях различно. Так, в паре А — Т, двигаясь от пурина к пиримидину, мы встретим сначала атом азота (акцептор водорода), затем  $\text{NH}_2$ -группу — донор водорода и, наконец, атом кислорода — снова акцептор. В паре G — С имеются те же группы, но в другом порядке: сначала идет атом азота — акцептор, затем кислород — опять акцептор и, наконец,  $\text{NH}_2$ -группа — донор. Так как каждую пару (А — Т и G — С) можно еще и перевернуть (соответственно получатся пары Т — А и С — G), то всего возможны четыре варианта сочетаний донорных и акцепторных группировок в цепи ДНК, которые могут узнаваться репрессором или другими регуляторны-

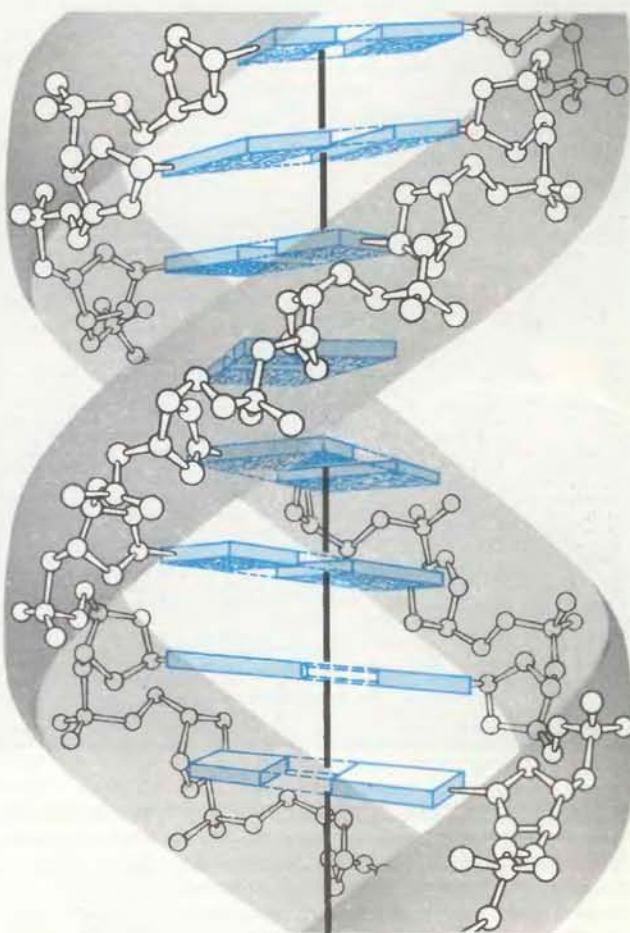
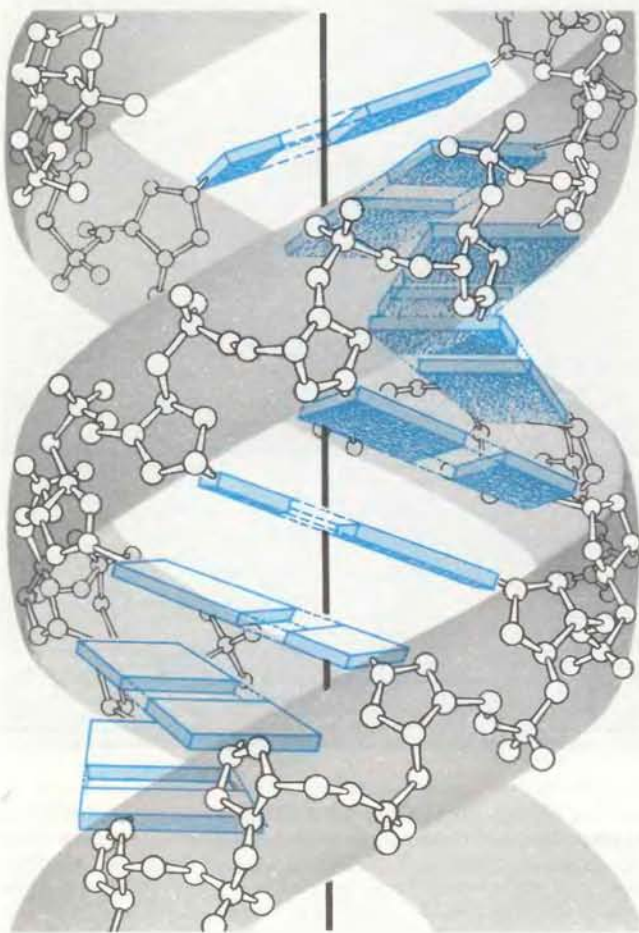
ми белками. Таким образом, со стороны большой бороздки информация, закодированная в ДНК в виде последовательности оснований, может быть непосредственно расшифрована какой-либо другой большой молекулой.

Малая бороздка менее информативна. Здесь узор из донорных и акцепторных групп не зависит от перестановки оснований: в паре А — Т это акцептор — акцептор, а в паре G — С между двумя акцепторами есть еще донор —  $\text{NH}_2$ -группа. В связи с этим малая бороздка вряд ли важна как носитель информации. Как станет ясно из дальнейшего, в В-форме ДНК она играет другую роль.

А- и В-формы ДНК отличаются в основном расположением и углом наклона пар оснований по отношению к оси спирали. В В-форме угол наклона близок к нулю, т.е. плоскости основания почти перпендикулярны оси спирали, которая в В-ДНК проходит через центры пар оснований. Малая бороздка уже большой из-за несимметричности точек присоединения оснований к сахарным остаткам, но глубина обеих бороздок приблизительно одинаковая, т.е. в большой и в малой бороздке «края» пар оснований находятся приблизительно на одинаковом расстоянии

от внешней поверхности цилиндра спирали. В А-форме ДНК плоскость пары оснований отклоняется от перпендикуляра к оси спирали на  $13 - 19^\circ$ . Кроме того, пары оснований сдвинуты к наружной поверхности, так что ось спирали лежит в большой бороздке, не пронизывая пар оснований. Вследствие этого малая бороздка очень мелкая, а большая намного глубже.

В В-ДНК на один виток спирали приходится в среднем 10 пар оснований. Расстояние между соседними парами составляет  $3,4 \text{ \AA}$ . В А-ДНК виток состоит примерно из 11 пар оснований, а уложены они так, что расстояние по оси между соседними парами составляет всего  $2,9 \text{ \AA}$ . Эти цифры, полученные при исследовании волокон ДНК, являются усредненными. При исследовании же кристаллов ДНК иногда обнаруживаются значительные локальные отклонения от усредненных значений. (Заметим, что в первоначальной модели Уотсона—Крика на 1 виток приходилось 10 пар оснований, а плоскость оснований располагалась перпендикулярно оси спирали, что характерно для В-формы, однако пары оснований были сдвинуты относительно оси, в результате чего имелся центральный канал, более свойственный А-форме. По-



АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ ДНК В ВОЛОКНАХ был проведен С. Арноттом до описанных в этой статье исследований. На основании его данных были построены модели А-ДНК (слева) и В-ДНК (справа). Пары оснований изображены в виде ступе-

нек лестницы, а сахаро-фосфатный остов — в виде ее перил. В А-ДНК основания наклонены и сдвинуты в сторону от оси спирали. В В-ДНК пары оснований пересекают ось спирали и перпендикулярны ей. (Рисунки И. Гейса.)



ложение сахарных остатков в первоначальной модели также больше напоминало их расположение в А-ДНК.)

Приблизительно такими были представления о структуре ДНК в течение 25 лет после открытия Уотсона и Крика. Многие вопросы оставались без ответа, а на некоторые ответить невозможно было в принципе. Почему при высокой влажности предпочтительнее В-форма? Какую форму имеет ДНК в хромосоме и возможен ли переход между разными формами в живом организме? Действительно ли белки, взаимодействующие с ДНК, например репрессоры, узнают определенную последовательность нуклеотидов, считывая информацию со «дна» бороздки?

В конце 70-х годов, когда научились синтезировать короткие фрагменты ДНК с заданной последовательностью нуклеотидов и получать их кристаллы, А. Рич и его сотрудники (Массачусетский технологический институт), а также мои коллеги и я в Калифорнийском технологическом институте независимо синтезировали (G — C)-сополимеры — короткие молекулы, состоящие только из чередующихся цитозинов и гуанинов. Для выбора именно такой последовательности были причины: результаты экспериментов в растворе говорили о том, что (G — C)-сополимер претерпевает какие-то структурные изменения при повышении концентрации соли или спирта, и, стало быть, можно было ожидать, что в этом полимере имеют место переходы между разными типами спирали.

## Исследование кристаллов

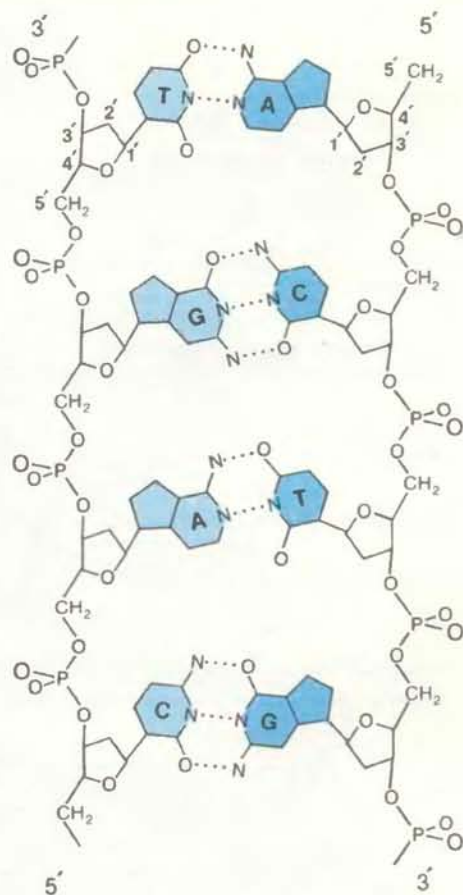
В 1979 г. Э. Уонг (Массачусетский технологический институт) расшифровал структуру кристалла гексамера CGCGCG, а несколькими месяцами позже Х. Дрю в нашей лаборатории — структуру кристалла тетрамера CGCG. Ко всеобщему удивлению, ни одна из этих молекул не соответствовала ни А-, ни В-форме ДНК. Более того, они даже не были правозакрученными спиралями. Их структура представляла собой левую спираль характерной зигзагообразной формы, из-за чего ее и назвали Z-спиралью. Имея опыт исследования волокон ДНК, мы, начиная нашу работу с кристаллами, ждали ответа на четко сформулированный, как нам казалось, вопрос: А- или В-конформацию имеют исследуемые молекулы? Природа дала совершенно неожиданный ответ: «Ни ту и ни другую!».

Однако вскоре были синтезированы и последовательности, которые в кристаллах имели В- или А-форму. Сначала Дрю получил додекамер CGCGAATTCGCG. Выбор последовательности диктовался двумя соображениями. Во-первых, в этой молекуле имеются одновременно CGCG-концы,

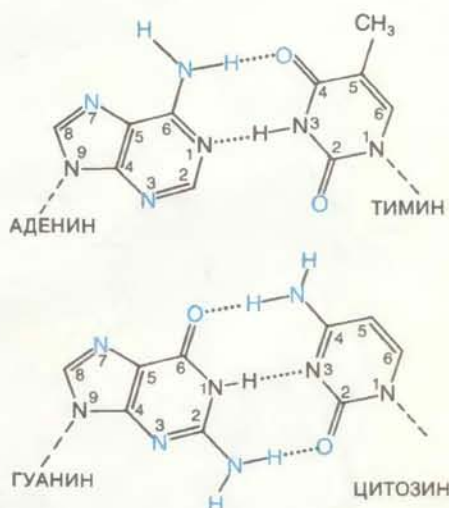
которые могут принимать структуру Z-спирали, и середина AATT, несовместимая с Z-формой. Это давало возможность оценить, в какой мере склонность CGCG-концов образовывать Z-ДНК влияет на конформацию всего фрагмента. Во-вторых, центральная последовательность GAATTC интересна тем, что она узнается и расщепляется рестриктазой *Eco RI* — одним из ферментов, которые разрезают молекулу ДНК в определенных сайтах. (Читатель может заметить, что олигомер CGCGAATTCGCG, как и другие синтезированные для этих исследований, самокомплементарен: последовательность, прочитанная слева направо, комплементарна последовательности, прочитанной справа налево, так что любые две цепи могут объединиться и образовать двунитевую структуру. Это экономит много труда и времени, так как для получения двуспиральной молекулы достаточно синтезировать только одну цепь.) Оказалось, что структура додекамера CGCGAATTCGCG не имеет ничего общего с Z-спиралью, а является собой типичный пример В-формы ДНК. Б. Коннер в нашей лаборатории изучил также тетрамер CCGG и показал, что это фрагмент А-спирали.

Вскоре в других лабораториях были исследованы еще некоторые двунитевые молекулы. В Массачусетском технологическом институте синтезировали последовательности CCGG и GGCCGGCC, которые имели структуру А-типа. Другая группа исследователей, в том числе О. Кеннард из Кембриджского университета и З. Шаккед из Вейцмановского института, получили последовательность GGTATACC, также являющуюся А-формой. Уонг показал, что структурой А-типа обладает и молекула (GCG)TATACGC, представляющая собой гибридную двойную спираль, состоящую из фрагментов ДНК и РНК (буквы, взятые в скобки, обозначают рибонуклеотиды; таким образом, на обоих концах двойной спирали три пары являются гибридом РНК—ДНК, а четыре пары в середине — истинной двунитевой ДНК). В-форма ДНК в настоящее время известна только для фрагмента CGCGAATTCGCG и его производных. Z-форма найдена у уже описанных выше молекул CGCG и CGCGCG, а также у модифицированной последовательности CGCGCG, в которой к цитозинам присоединены метильные группы, что способствует формированию Z-структуры.

Теперь можно рассмотреть, в какой мере эти молекулы соответствуют предсказаниям о параметрах А- и В-форм ДНК, сделанным при анализе дифракции волокон, насколько велики отклонения от средних значений параметров спирали и как эти отклонения коррелируют с последовательностью оснований ДНК.



**РАЗВЕРНУТАЯ СПИРАЛЬ.** Показаны сахаро-фосфатный остов и «ступеньки» пар оснований. Цепи в двойной спирали направлены в противоположные стороны (концы цепей обозначены 3' и 5'). Каждая пара оснований состоит из пурина (А или G) и пиримидина (Т или С), соединенных водородными связями (показаны точками).

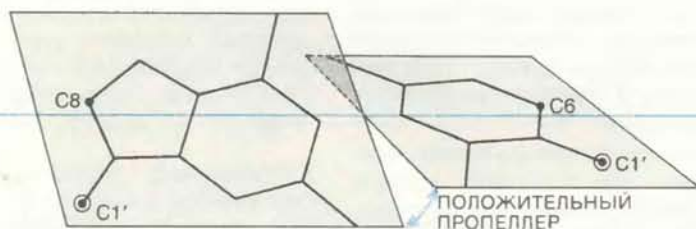


**ДВЕ ПАРЫ ОСНОВАНИЙ.** Пунктиром показаны гликозидные связи, идущие к сахарным остаткам, точками — водородные связи внутри пар. У каждой пары оснований один край обращен в большую бороздку (на рисунке сверху), а другой — в малую (здесь снизу). При образовании водородных связей с регулярными молекулами  $\text{NH}_2$ -группы могут играть роль доноров водорода, атомы кислорода и азота — роль акцепторов (выделено цветом).



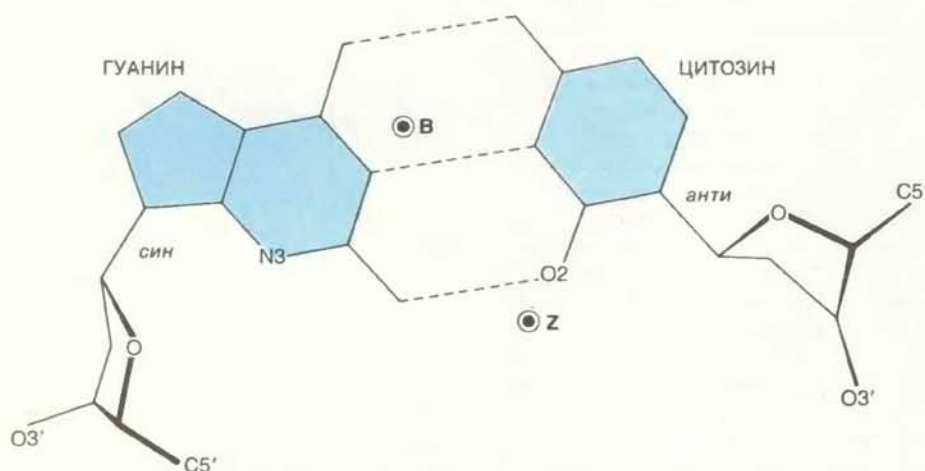
|                                                        | А-ДНК           | В-ДНК           | З-ДНК                                        |
|--------------------------------------------------------|-----------------|-----------------|----------------------------------------------|
| ЗНАК СПИРАЛИ                                           | ПРАВАЯ          | ПРАВАЯ          | ЛЕВАЯ                                        |
| УГОЛ СПИРАЛЬНОГО ВРАЩЕНИЯ, ГРАДУСЫ                     |                 |                 | G-C: $-51, 3 \pm 1,6$<br>C-G: $-8,5 \pm 1,1$ |
| СРЕДНЕЕ ЗНАЧЕНИЕ И СТАНДАРТНОЕ ОТКЛОНЕНИЕ              | $33,1 \pm 5,9$  | $35,9 \pm 4,3$  |                                              |
| НАБЛЮДАЕМЫЕ ЗНАЧЕНИЯ                                   | 16,1–44,1       | 27,7–42,0       |                                              |
| ЧИСЛО ПАР ОСНОВАНИЙ НА 1 ВИТОК СПИРАЛИ                 | 10,9            | 10,0            | 12,0                                         |
| РАССТОЯНИЕ МЕЖДУ ПАРАМИ ОСНОВАНИЙ ВДОЛЬ ОСИ СПИРАЛИ, Å | $2,92 \pm 0,39$ | $3,36 \pm 0,42$ | G-C: $3,52 \pm 0,22$<br>C-G: $4,13 \pm 0,18$ |
| УГОЛ НАКЛОНА ОСНОВАНИЙ, ГРАДУСЫ                        | $13,0 \pm 1,9$  | $-2,0 \pm 4,6$  | $8,8 \pm 0,7$                                |
| УГОЛ ПРОПЕЛЛЕРА, ГРАДУСЫ                               | $15,4 \pm 6,2$  | $11,7 \pm 4,8$  | $4,4 \pm 2,8$                                |
| УГОЛ «ОТКРЫТИЯ» ПАР, ГРАДУСЫ                           | $5,9 \pm 4,7$   | $-1,0 \pm 5,5$  | $3,4 \pm 2,1$                                |

УСРЕДНЕННЫЕ ПАРАМЕТРЫ СПИРАЛИ и стандартные отклонения от них. Приведены данные, полученные при исследовании кристаллов ДНК.



УГОЛ ПРОПЕЛЛЕРА пары пурин — пиримидин. Поворот ближайшего к наблюдателю основания по часовой стрелке (с любой стороны) соответствует положительному пропеллеру. Обратите внимание, что в результате такого поворота сдвигается вверх или вниз 1'-углеродный атом, через который основание соединено с сахаро-фосфатным остовом.

● A



ДВЕ КОНФОРМАЦИИ связи C—N, соединяющей основание с сахарным остатком. Анти-конформацию (справа) имеют все нуклеотиды в А- и В-формах ДНК и цитозины в Z-спирали. Син-конформация (слева) встречается только у гуанинов в Z-ДНК. Благодаря чередованию гуанина и цитозина вдоль каждой цепи в Z-ДНК чередуются син- и анти-конформация связей C—N, в результате спираль зигзагообразна. Точками А, В и Z показано положение оси по отношению к паре оснований в соответствующих типах ДНК: в А-ДНК ось проходит в большой бороздке, в В-ДНК она пересекает плоскость пары оснований, а в Z-форме лежит в малой бороздке.

## Структурные свойства

Средние значения параметров спирали каждого типа были определены при рентгеноструктурном анализе кристаллов ДНК (см. таблицу слева). А- и В-ДНК — это правозакрученные спирали. Угол спирального вращения, т.е. угол поворота между двумя соседними парами оснований, составляет в А-ДНК  $33,1^\circ$ , в В-ДНК —  $35,9^\circ$ . Это соответствует 10,9 и 10,0 парам оснований на виток, что хорошо согласуется с предсказаниями, сделанными на основании исследований волокон ДНК. Расстояние между соседними парами оснований вдоль оси спирали также близко к предсказанным значениям. Вызывало, однако, удивление то, что локальные значения угла спирального вращения сильно варьировали по сравнению со средним значением: стандартное отклонение этого параметра для А-ДНК  $\pm 6^\circ$ , а для В-ДНК  $\pm 4^\circ$ . В некоторых случаях угол спирального вращения для А-формы составлял всего лишь  $16^\circ$ , а иногда, напротив, возрастал до  $44^\circ$ . В В-форме ДНК его значение может изменяться от 28 до  $42^\circ$ . (Как оказалось, локальные вариации угла спирального вращения можно предсказать исходя из нуклеотидной последовательности ДНК, о чем пойдет речь дальше. Не исключено, что такие вариации являются одним из тех элементов, которые узнает репрессор или другой регуляторный белок.) Исследования кристаллов показали, что плоскость основания отклонена от положения, перпендикулярного оси спирали, на  $2^\circ$  в В-ДНК и на  $13^\circ$  в А-ДНК, что в первом приближении достаточно хорошо соответствует результатам, полученным на волокнах.

Значительные отклонения от предсказаний, сделанных на основании анализа волокон, обнаружились в значении такого параметра, как угол пропеллера. Этот угол измеряет поворот двух оснований пары в противоположных направлениях вокруг соединяющей их продольной оси. Говорят, что пропеллер положителен, если основание, ближе к наблюдателю, смотрящему вдоль продольной оси, повернуто по часовой стрелке (см. рисунок на этой странице). При изучении волокон на угол пропеллера обращали мало внимания. В фибриллярной модели А-формы ДНК, предложенной в 1972 г., угол пропеллера имел отрицательное значение; в 1981 г. эти результаты были пересмотрены и знак пропеллера изменили на правильный, однако его величина оценивалась всего в  $8^\circ$ .

При исследовании кристаллов было показано, что угол пропеллера всегда положителен и в среднем составляет  $15^\circ$  для А-ДНК и  $12^\circ$  для В-ДНК, в то же время локально он может принимать значения от  $3^\circ$  до  $25^\circ$ . В правой



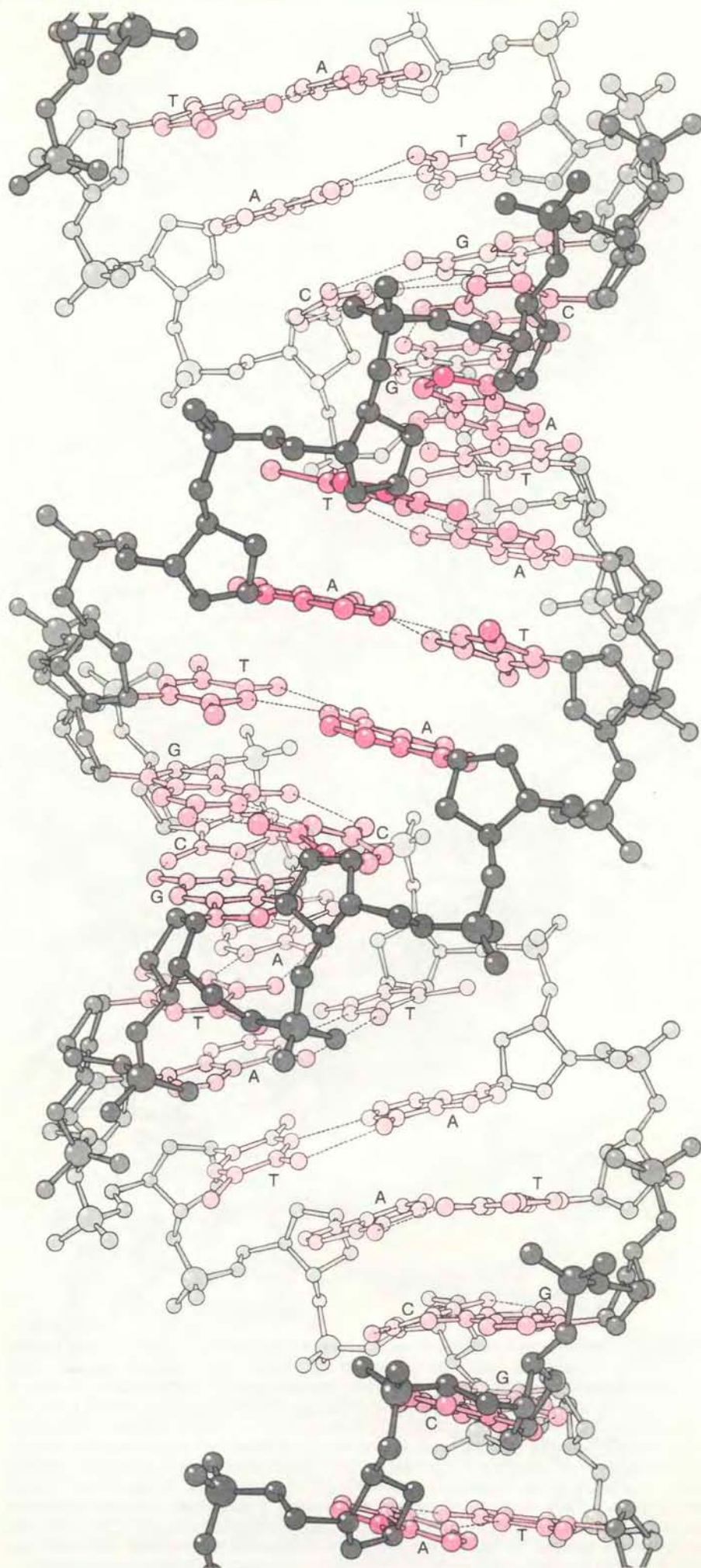
спирали положительный пропеллер улучшает стэкинг-взаимодействие оснований, так как увеличивается площадь перекрывания данной пары оснований с соседними, расположенными выше и ниже вдоль спирали. В то же время положительный пропеллер приводит к тому, что между пуринами (А и G) противоположных цепей, принадлежащими двум соседним парам оснований, возникает слишком тесный контакт. Как считает К. Калладин из Кембриджского университета, это и определяет зависимость от последовательности некоторых важных параметров спирали, таких как сам пропеллер пары, угол спирального вращения и угол крена оснований.

Креном называют поворот пары оснований как целого (рассматривается усредненная плоскость, проходящая через спаренные пурин и пиримидин) относительно ее продольной оси. Если две соседние пары оснований наклонены в противоположные стороны, то между ними образуется щель, открытая в сторону той или другой бороздки. Угол «открытия» пар считается положительным, если щель между основаниями открыта в малую бороздку, и отрицательным, если в большую. При изучении волокон не было возможности измерить локальные углы крена оснований, и только при исследовании кристаллов стало ясно, что это один из основных параметров двойной спирали. Так как в В-форме ДНК пары оснований расположены практически перпендикулярно оси спирали, то в ней средние углы крена и «открытия» пар должны быть близки к нулю.

В А-форме «лестница» ДНК огибает центральную ось, вследствие чего между парами оснований имеются щели, которые открываются в малую бороздку напоподобие мехов аккордеона. В результате средний угол «открытия» пар в А-ДНК равен  $6^\circ$ . Как и в случае других параметров, локальные значения этого угла и в А-, и в В-форме могут значительно отклоняться (до  $5^\circ$  в обе стороны) от среднего значения.

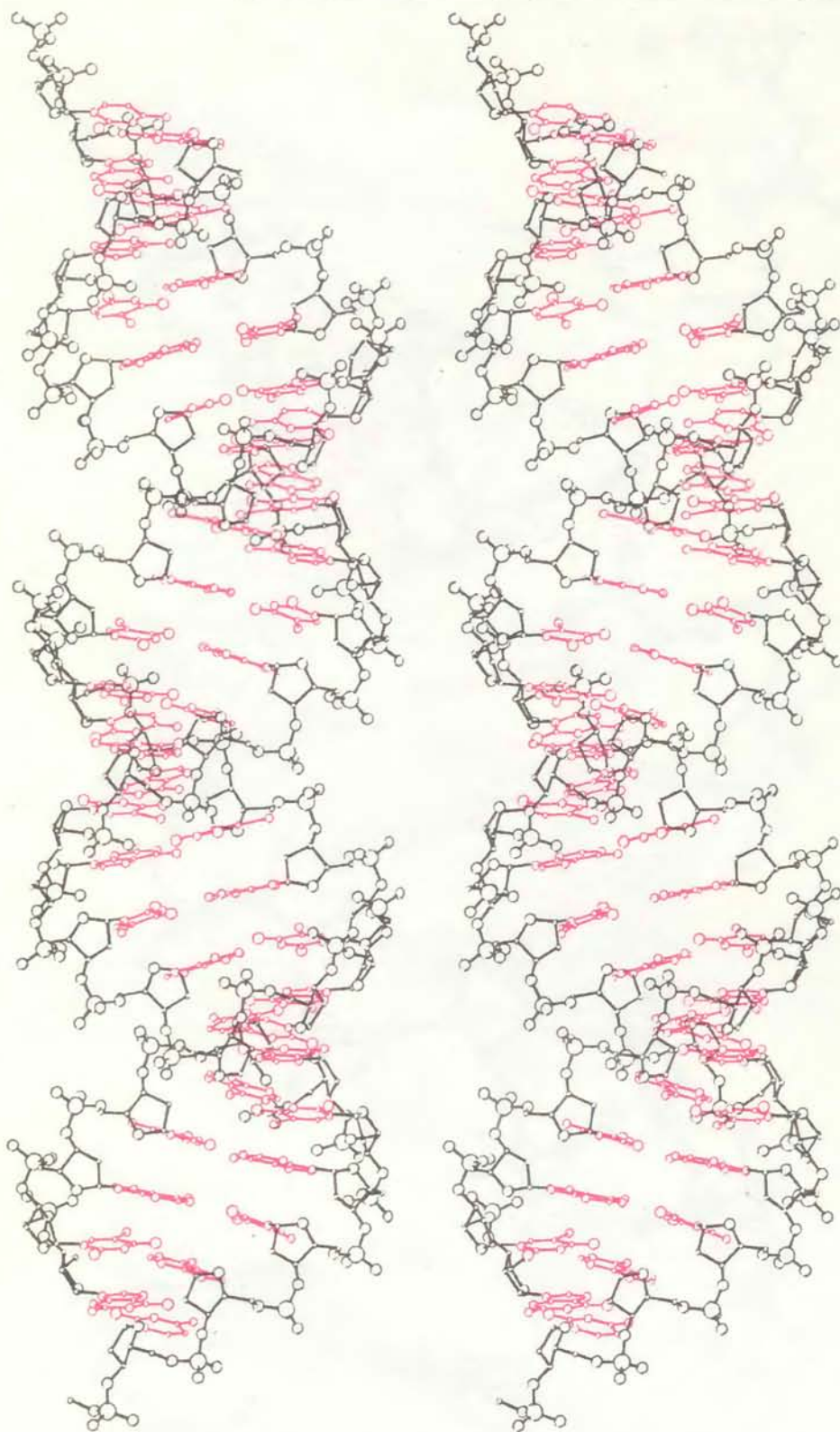
### Построение бесконечной спирали

Самая длинная молекула двойной спирали ДНК из тех, что исследованы к настоящему времени на уровне кри-



А-ДНК. Изображение построено на основании стереопары, нарисованной компьютером (см. следующий рисунок). Пары оснований не идеализированы, а точно соответствуют тем, которые реально существуют в кристалле ДНК. Обратите внимание, что противоположные фосфатные группы «смотрят» друг на друга через большую бороздку.





СТЕРЕОПАРА, нарисованная ЭВМ по координатам двойной спирали А-ДНК гексамера GTATAC (концевые пары октамера GGTATACC, не имеющие фосфатных групп, были исключены из рассмотрения). Изображение гексамера вращали и сдвигали вдоль продольной оси до тех пор, пока нижняя пара фосфатов вращаемого изображения не совпала с верхней парой фосфатов исходного изображения. При многократном повторении этого цикла получается изображение бесконечной спирали; оно содержит все локальные отклонения от средних параметров спирали, определяемые последовательностью нуклеотидов. Стереопару лучше рассматривать через стереочки (при некоторой тренировке стереозффекта можно достичь и без них: надо «развести» глаза, как будто вы смотрите вдаль, но сфокусировать взгляд на рисунке). Обратите внимание на глубину большой бороздки. В целом спираль напоминает винтовую лестницу, огибающую цилиндр.

стала, — это додекамер CGCGAATTCGCG. Представление о том, как будет выглядеть более протяженная молекула, можно получить, экстраполировав три типичные структуры ДНК (см. рисунки на с. 35 и 39—44). Это достигается с помощью ЭВМ: используя графический терминал, сдвигают фрагмент двойной спирали вдоль оси, а затем вращают вокруг нее до тех пор, пока атомы на одном конце фрагмента не совместятся с атомами на другом конце исходной молекулы. Естественно, этот процесс можно продолжать сколько угодно. Четырежды повторенное таким способом изображение центральных шести пар А-спирали GGTATACC дало изображение 24-членной спирали, имеющей последовательность GTATACGTATACGTATACGTATAC. Таким образом по данным, полученным для кристаллов коротких молекул, впервые стало возможным моделировать структуру протяженной двойной спирали, не усредняя локальные флуктуации параметров спирали, зависящие от нуклеотидной последовательности.

Как и ожидалось на основании исследований волокон, А-спираль оказалась довольно сжатой и толстой, с глубокой большой бороздкой и мелкой, но широкой малой бороздкой. В-спираль уже и при том же числе пар оснований более вытянутая, имеет широкую большую бороздку и узкую малую, причем обе приблизительно одинаковой глубины. В отличие от А- и В-ДНК Z-форма очень тонкая и растянутая, с узкой и глубокой малой бороздкой и настолько мелкой большой, что ее трудно назвать бороздкой в прямом смысле этого слова.

Так как сахаро-фосфатный остов Z-формы зигзагообразен, повторяющейся единицей спирали является не пара оснований, а две последовательные пары G — C и C — G. Причина этого в том, что в Z-ДНК цитозин и гуанин поразному прикрепляются к сахарным остаткам. В каждом цитозине сахар так повернут относительно связи, соединяющей его с основанием, что сахарный остаток отклоняется из малой бороздки (см. нижний рисунок на с. 38). Эта конформация, называемая *анти*, присуща всем основаниям в А- и В-формах ДНК. В то же время в Z-ДНК во всех гуанинах сахарные остатки повернуты на  $180^\circ$  и поэтому «смотрят» в сторону малой бороздки. Такая *син*-конформация стереохимически возможна только в случае пурина, так как сахар в нем присоединен к пятичленному кольцу, которое меньше, чем шестичленное кольцо пиримидина (в пиримидине — цитозине или тимине — расстояние между сахарным остатком, находящимся в *син*-конформации, и атомом кислорода во 2-м положении кольца было бы слишком маленьким,

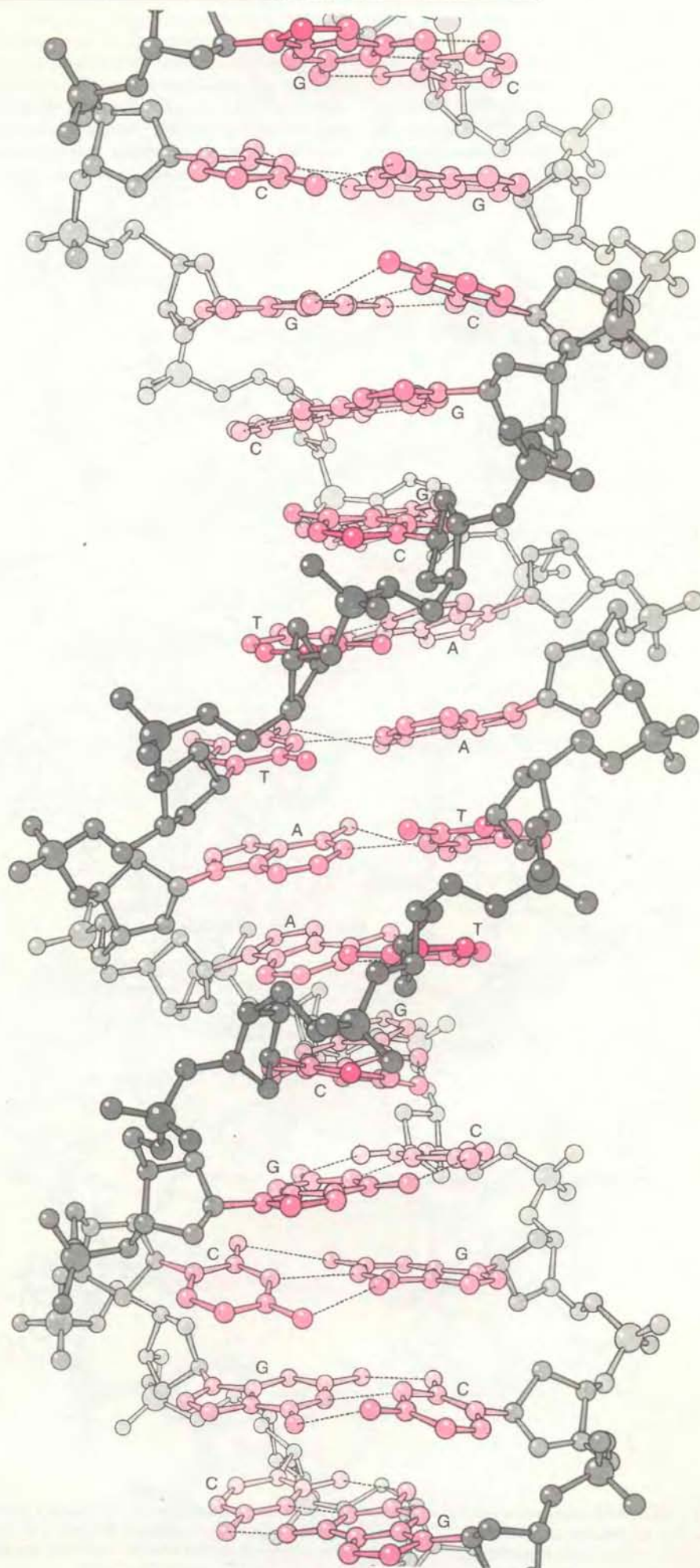


что стереохимически запрещено). Чередование пуринов (G) и пиримидинов (C) в каждой цепи двойной спирали Z-ДНК делает возможным чередование *син*- и *анти*-конформаций связей, соединяющих сахар с основанием, что приводит к зигзагообразности остова спирали. Ход спирали от одного фосфата к другому через гуанин практически параллелен главной оси, а через цитозин — касателен к цилиндрической поверхности спирали и перпендикулярен ее оси. В результате истинной повторяющейся единицей Z-ДНК является димер — две последовательные пары оснований. Хотя в Z-спирали на один виток приходится 12 пар оснований, формально это шестиэлементная левая спираль — в ней шесть димеров на один оборот спирали.

## РНК

До сих пор мы рассматривали только дезоксирибонуклеиновую кислоту (ДНК) — хранилище генетической информации в ядре клетки. Реализуется эта информация при участии другой нуклеиновой кислоты — рибонуклеиновой (РНК). Последовательность оснований одной из цепей ДНК «переписывается» — транскрибируется в последовательность оснований одноцепочечной матричной (информационной) РНК. На рибосоме молекулы транспортных РНК «читают» последовательность мРНК, доставляют к ней соответствующие аминокислоты, и происходит сборка белков. В состав самой рибосомы также входит РНК. РНК и ДНК отличаются друг от друга тем, что, во-первых, в РНК вместо тимина стоит урацил, в котором отсутствует метильная группа, и, во-вторых, вместо остатков дезоксирибозы в остов РНК входят кольца рибозы (в дезоксирибозе нет гидроксильной группы при 2'-углеродном атоме).

Важное следствие наличия в РНК дополнительного гидроксила заключается в том, что РНК, по-видимому, не может сворачиваться в двойную спираль В-типа. В гипотетической двойной В-РНК ОН-группа попадает в своеобразную клетку, образованную атомами соседней фосфатной группы, сахарного остатка и основания. При этом расстояние между атомом кислорода 2'-гидроксильной группы и некоторыми из окружающих ее атомов становится недопустимо малым, что делает В-форму стереохимически невы-



В-ДНК. Это изображение получено по стереопаре, построенной ЭВМ для додекамера CGCGAATTCGCG (см. следующий рисунок). Видно, что пропеллер в парах оснований улучшает стэкинг-взаимодействие оснований.



годной. Напротив, в А-форме 2'-ОН-группа находится на поверхности спирали, далеко от соседних атомов. Значит, самокомплементарные двунитевые участки в транспортной РНК должны быть вариантами А-спирали. Если короткие самокомплементарные участки в матричной РНК также об-

разуют двунитевые структуры (так называемые шпильки), то и они, скорее всего, представлены А-формой. (Есть только один-единственный пример участия РНК в образовании В-формы — в синтетическом гибриде, состоящем из цепи адениновых рибонуклеотидов и цепи тиминового дезоксирибо-

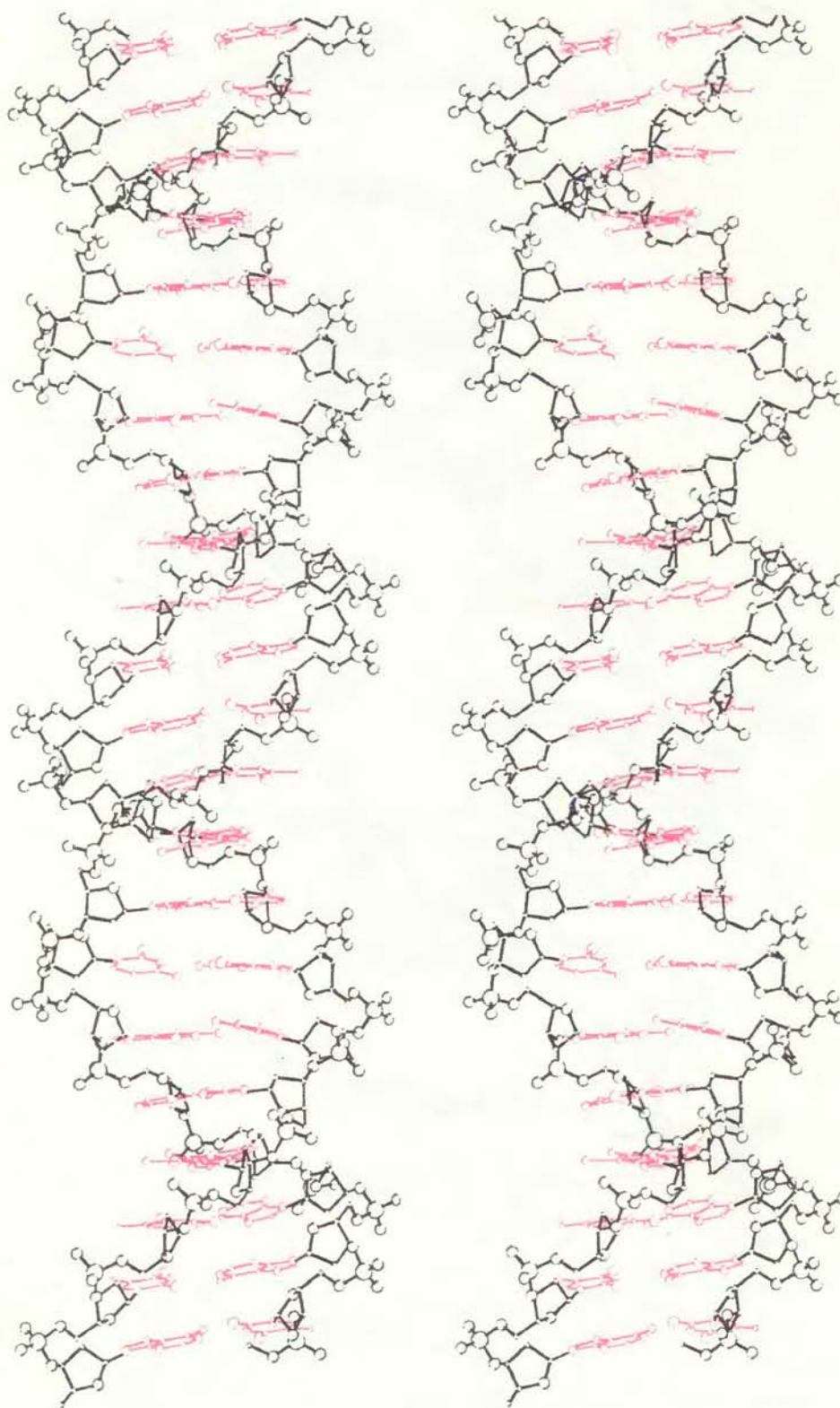
нуклеотидов. В этом случае дополнительная ОН-группа образует водородную связь с 4'-кислородным атомом соседнего остатка рибозы.) Пока что никто серьезно не занимался вопросом существования Z-формы РНК; можно сказать только, что в цитозине дополнительная ОН-группа сахарного остатка будет находиться в этом случае слишком близко к кислородному атому во 2-м положении пиримидинового кольца.

### Стабилизация гидратацией

Рентгеноструктурный анализ кристаллов показал, что существуют три типа двойной спирали ДНК и один тип двойной спирали РНК. При высоком содержании воды В-ДНК более устойчива, поэтому в клеточном ядре ДНК существует, скорее всего, в В-форме. Когда в процессе транскрипции на какое-то время образуется гибрид ДНК-РНК, он, вероятно, имеет структуру А-спирали. При определенных условиях правая спираль ДНК с последовательностью чередующихся пуринов и пиримидинов может перейти в левозакрученную Z-форму. Для большинства нуклеотидных последовательностей в водных растворах нормальной, по-видимому, является все-таки В-форма. Каким же образом вода стабилизирует В-спираль?

С помощью рентгеноструктурного анализа можно было попытаться исследовать упорядоченное расположение тех молекул растворителя (воды), которые настолько прочно связаны с ДНК, что в кристалле всегда занимают одни и те же места вокруг молекул ДНК. (Менее прочно связанные молекулы воды располагаются на разных молекулах ДНК по-разному, и их сигналы на дифракционной картине кристалла практически неотличимы от фона.) Распределение молекул растворителя исследовалось для всех трех типов спирали, однако детальные результаты были опубликованы только для В-формы. В В-ДНК молекулы воды имеются вблизи практически каждого атома, который может образовывать с ними водородные связи: гидратированы не занятые в химических связях кислородные атомы фосфатных групп, атомы кислорода и азота оснований, а также (в несколько меньшей степени) те кислородные атомы фосфатных групп, которые участвуют в формировании остова полинуклеотидной цепи. В результате спираль ДНК, по существу, покрыта слоем воды толщиной в одну молекулу.

Малая бороздка В-ДНК гидратирована сильнее (см. нижний рисунок на с. 45). Вследствие ненулевого пропеллера в парах оснований и спирального пово-



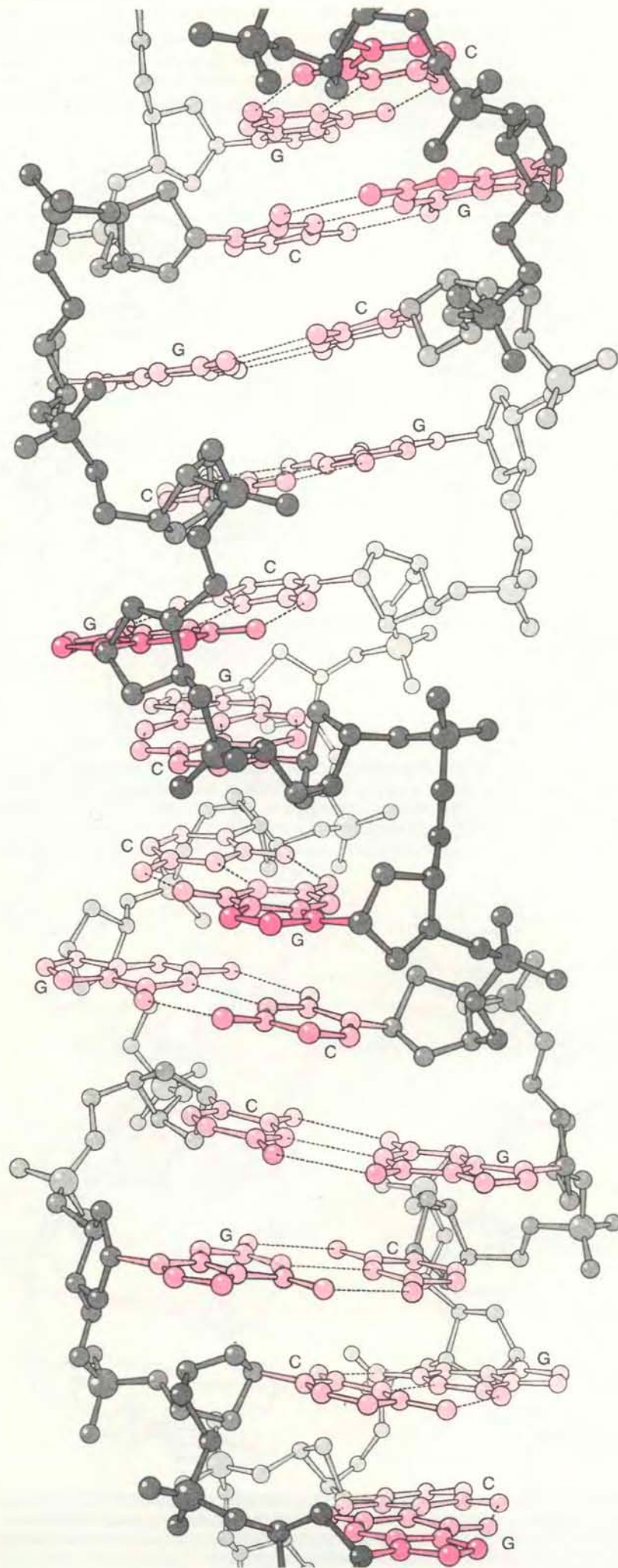
СТЕРЕОПАРА получена сдвигом и состыковкой изображения центральных десяти пар додекамера CGCGAATTCGCG (концевые пары исключены). Видно, что в В-спирали большая и малая бороздки приблизительно одинаковой глубины, но малая уже. Она сужается в участках AATT и расширяется возле G—C-пар.



рота соседних пар атомы кислорода или азота одной цепи сближены с атомами кислорода или азота другой цепи в соседних парах оснований. Между оказавшимися близко друг от друга акцепторами водорода образуется мостик из молекулы воды. Молекулы воды «первого слоя» соединены в свою очередь мостиками из молекул воды «второго слоя». Оба слоя образуют зигзагообразный «хребет», следующий вдоль малой бороздки. Эта структура хорошо выражена в районе А — Т-пар, но нарушается возле G — C-пар, вероятно, из-за того что в малую бороздку выступают  $\text{NH}_2$ -группы гуанинов. И действительно, в синтетических волокнах ДНК пары оснований, в которых гуанин заменен модифицированным основанием — инозином, не имеющим  $\text{NH}_2$ -группы, — ведут себя подобно А — Т-парам, способствуя стабилизации В-формы.

Мы считаем, что водный «хребет» в малой бороздке является основным фактором, стабилизирующим В-ДНК, и, для того чтобы спираль перестроилась в А-форму, он должен быть разрушен. В лабораторных условиях этого можно достигнуть, удалив молекулы воды, т.е. дегидратировав волокна ДНК. Другой путь — ввести в малую бороздку больше  $\text{NH}_2$ -групп. Как показало дифракционное исследование волокон ДНК, проведенное С. Арноттом (Университет Пардю), увеличение содержания G — C-пар облегчает переход из В- в А-форму при дегидратации.

Упорядоченной водной оболочки нет ни в А-, ни в Z-форме ДНК. Хотя молекулы воды могут свободно располагаться вокруг тех атомов в ДНК, которые способны образовывать водородные связи, ничего похожего на гидратационную структуру В-ДНК в А- и Z-ДНК не обнаружено. Малая бороздка А-ДНК, по-видимому, даже менее гидратирована, чем остальные участки А-спирали. Впрочем, о реальной картине гидратации А-спирали уверенно говорить пока трудно. Дело в том, что во всех трех кристаллических октамерах А-ДНК: CCGG/CCGG (два тетрамера состыкованы, так что фактически образуется октамер, в середине которого нет ковалентной связи между нуклеотидами), GGCCGGCC и GGTATACC — концевая пара основа-



Z-ДНК является левой спиралью, состоящей из чередующихся гуанинов и цитозинов. Изображение получено по стереопаре, построенной ЭВМ для 4 центральных пар гексамера CGCGCG (см. рис. на с. 44). Угол пропеллера меньше, чем в правых спиральях. Фосфатные группы противоположных цепей «смотрят» друг на друга через малую бороздку, а не через большую, как в А-ДНК.



ний одного октамера всегда располагается в малой бороздке соседнего, нарушая тем самым нормальную картину гидратации, которую можно было бы ожидать, если бы молекулы находились в растворе по отдельности. Тем не

менее на сегодняшний день есть вполне ясное представление о том, почему В-форма ДНК в нормальных условиях гидратации устойчивее и почему в результате дегидратации она переходит в А-форму.

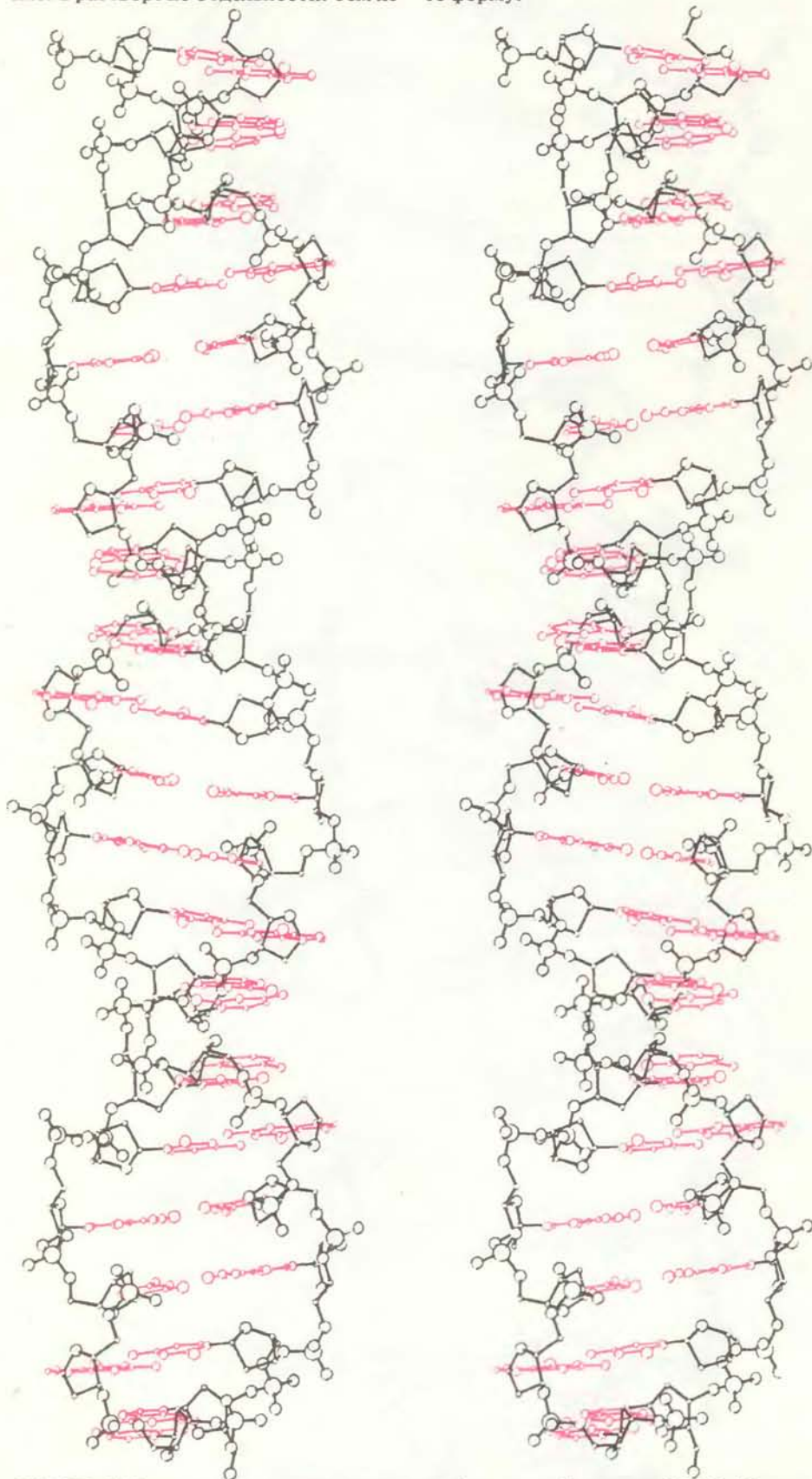
## Генетическая регуляция

Перейдем теперь к наиболее важному, пожалуй, биологическому аспекту тех данных, которые были получены при исследовании кристаллов ДНК, — а именно, рассмотрим влияние последовательности оснований на локальную структуру спирали и роль, которую этот эффект может играть в регуляции экспрессии генетической информации.

Если действительно Z-спираль характерна только для последовательностей с чередующимися пуринами и пиримидинами, то вряд ли она часто встречается в тех участках ДНК, которые кодируют белки. В то же время, как предполагают Рич и другие исследователи, локальный переход определенных регуляторных участков из правоспиральной В-конформации в левоспиральную Z-форму может существенно влиять на доступность генетической информации и на процесс ее считывания (например, изменяя степень суперспирализации ковалентно замкнутых кольцевых ДНК).

Такой механизм был бы примером влияния последовательности нуклеотидов не на саму генетическую информацию, а на регуляцию ее экспрессии. Здесь стоит заметить, что избирательное использование или, наоборот, «отключение» той или иной части генома в определенных клетках в определенное время (неважно, каковы конкретные механизмы такой регуляции) является важнейшим принципом развития у многоклеточных. Есть основания считать, что именно нарушение регуляции и искажение нормальной экспрессии генов приводят к развитию раковых опухолей, а также участвуют в процессе старения. Наше понимание того, как регулируется экспрессия генов у высших организмов находится сейчас примерно на таком же уровне, на каком в 1953 г., когда Уотсон и Крик построили модель двойной спирали ДНК, находились представления о кодировании генетической информации.

Изменение знака спирали при переходе В-ДНК в Z-форму — это очень сильное конформационное изменение, и зависит оно от нуклеотидной последовательности. Другой тип влияния структуры ДНК на считывание генетической информации выявляется при детальном исследовании локальных вариаций А- и В-форм. Как уже отмечалось выше, средние значения параметров спирали оказались близкими к тем, которые ожидалось на основании исследования волокон. Удивительными были именно величины локальных отклонений от средних значений. Угол спирального вращения в А-ДНК составляет в среднем  $33,1^\circ$  на пару оснований, что соответствует почти 11 парам оснований на виток. Но кто пред-



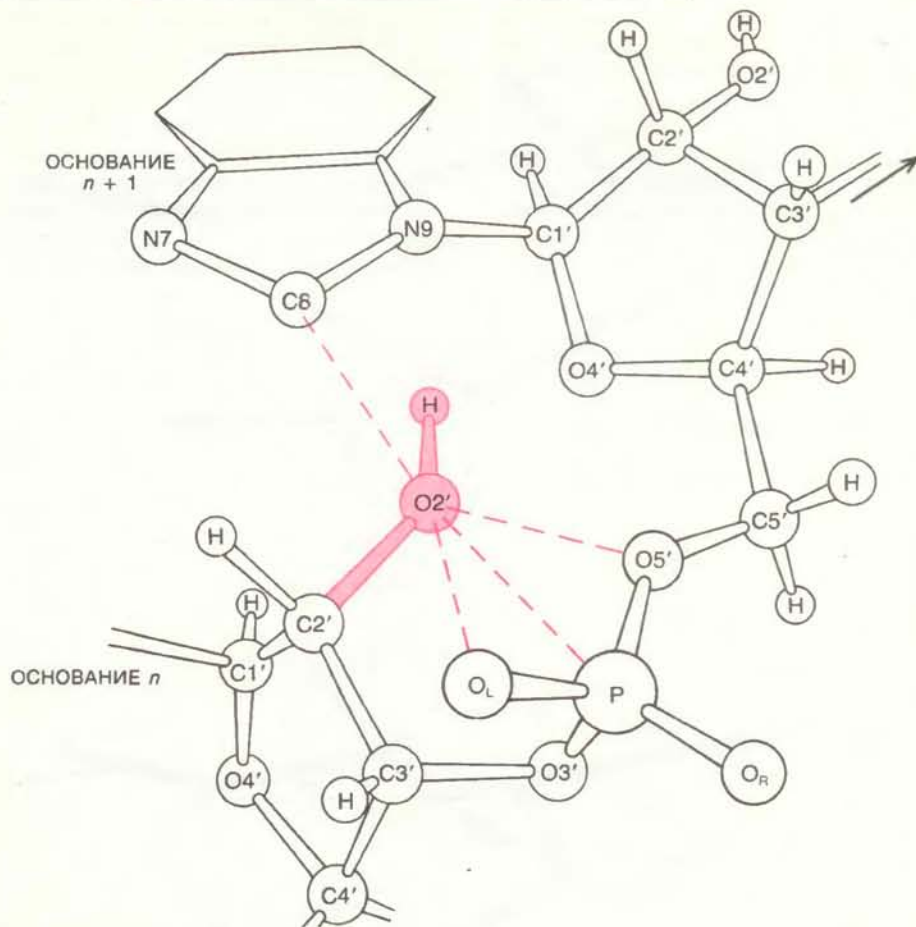
СТЕРЕОПАРА многократно повторенного изображения Z-спирали GCGC. Обратите внимание, что по ряду свойств Z-форма противоположна А-форме. Z-ДНК тонкая и растянутая, с глубокой малой бороздкой, уплощенной большой бороздкой и маленьким углом пропеллера. А-спираль сжатая и толстая, имеет глубокий большой желоб, очень мелкий малый желобок и большой угол пропеллера.



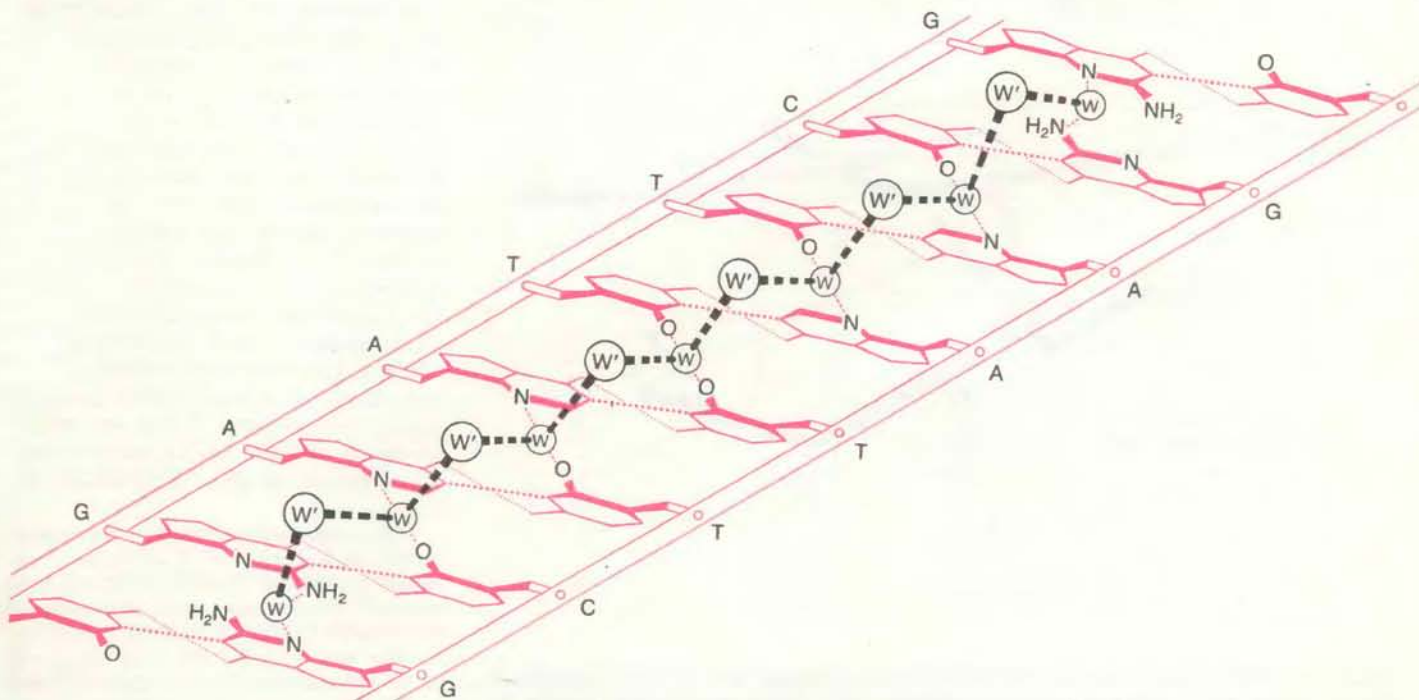
полагал, что в некоторых случаях в А-ДНК этот угол уменьшается до  $16^\circ$  или увеличивается до  $44^\circ$ ? Соседние пары «открыты» в среднем на  $0^\circ$  в В-ДНК и на  $6^\circ$  в А-ДНК — это вполне согласуется с тем, что можно было ожидать, зная ход спирали вокруг ее главной оси. Однако величина стандартного отклонения от этого среднего значения  $\pm 5^\circ$  ставила в тупик. Такие значительные локальные флуктуации были настолько неожиданны, что исследователи прежде всего тщательно проверили данные, чтобы убедиться, что это не просто артефакт анализа. Когда же сомнения в правильности результатов окончательно отпали и появились независимые данные о разных кристаллах, возник вполне естественный вопрос: детерминированы ли эти флуктуации?

### От нуклеотидной последовательности к структуре спирали

Было сделано несколько попыток объяснить наблюдаемые локальные отклонения в параметрах спирали ДНК исходя из ее нуклеотидной последовательности. Наиболее удачным пока что остается подход Калладина, который применил к двойной спирали принципы механики упругого стержня. Согласно Калладину, локальные вариации углов спирального вращения и «открытия» пар появляются из-за того, что положительный пропеллер в парах оснований вызывает стерические



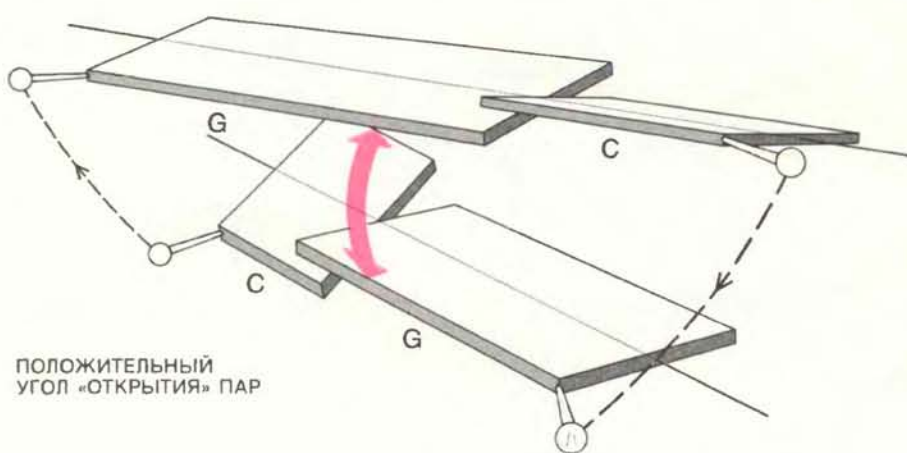
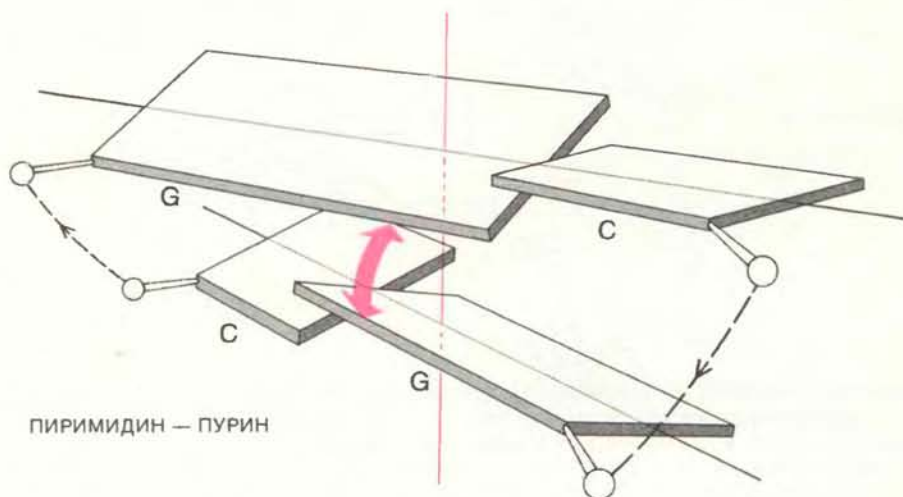
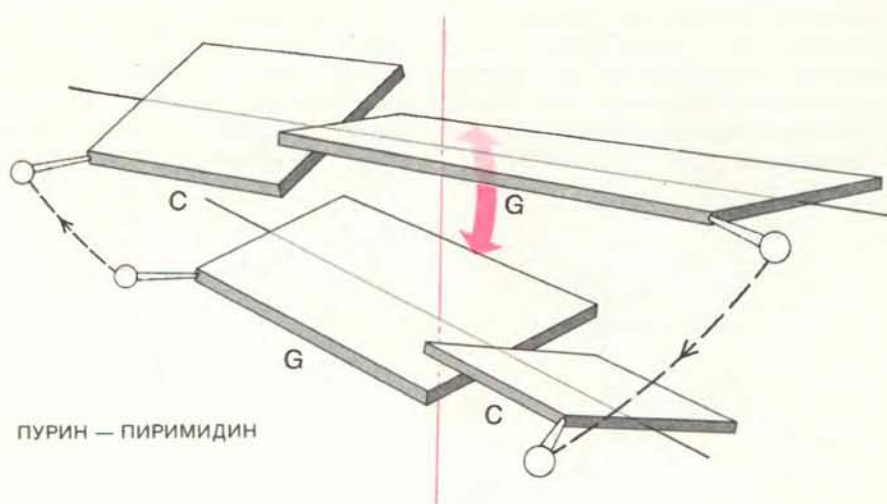
РНК НЕ ОБРАЗУЕТ В-СПИРАЛЬ при формировании двойной спирали в самокомплементарных участках. В состав РНК входит сахарный остаток рибозы, имеющей ОН-группу в том месте, где в дезоксирибозе ДНК стоит только Н. На этом рисунке показано, что 2'-ОН-группа в В-спирали создала бы слишком тесный контакт между атомом кислорода и атомами соседних фосфата, сахара и основания.



ГИДРАТАЦИЯ В-ДНК такова, что образуется зигзагообразная структура из молекул воды. На этом рисунке спираль додекамера развернута и показана со стороны малой бороздки. Остов изображен схематично, а угол пропеллера сильно увеличен. Молекулы воды первого слоя (W) соедине-

ны водородными связями с атомами кислорода и азота соседних пар оснований; эти молекулы связаны в свою очередь с молекулами воды второго слоя ( $W'$ ), в результате получается своего рода гребень. Такая структура стабилизирует В-форму в условиях высокой влажности.





**УГОЛ ПРОПЕЛЛЕРА** влияет на контакт пуринов, принадлежащих противоположным цепям в двух соседних парах оснований. Основания изображены в виде дощечек. С1'-атомы — в виде шариков, а сахаро-фосфатный остов отмечен пунктирной линией (стрелка указывает направление 5' — 3'). Для димера пурин-пиридин (вверху) пропеллер слишком сближает края пуринов в большой бороздке. Для последовательности пиридин-пуридин (в середине) тесный контакт происходит в малой бороздке. Избежать контакта можно, «открыв» пары в направлении соответствующего желобка (внизу). В данном случае увеличен угол со стороны малой бороздки.

препятствия при сближении больших пуриновых оснований. (Напомним, что сам по себе пропеллер улучшает стэкинг-взаимодействие оснований в каждой цепи.)

Из-за того что пуриновое основание (G или A) больше по размерам, чем пиридинозное (C или T), в паре оснований пуридин всегда «выступает» за ось спирали. Когда в соседних парах оснований пурины расположены в разных цепях ДНК, их проекции немного перекрываются, если смотреть вдоль оси спирали. Если каждой паре оснований теперь придать положительный пропеллер, то края пуриновых оснований настолько сблизятся, что неизбежно их «столкновение». Для последовательности пуридин — пиридин (берется направление от 5' — к 3' — концу цепи ДНК) сближение происходит в большой бороздке; для последовательности пиридин — пуридин — в малой (см. рисунок слева). Как можно избежать «столкновения» пуриновых оснований?

Одна из возможностей — просто увеличить угол «открытия» пар в сторону пуридин-пуринового тесного контакта. В случае последовательности пиридин — пуридин надо открыть пары в сторону малой бороздки, т.е. сделать угол «открытия» более положительным. В случае последовательности пуридин — пиридин следует, наоборот, сделать этот угол более отрицательным. Дрю и я тоже обратили внимание на зависимость угла «открытия» пар от нуклеотидной последовательности, но объяснили ее сложнее и менее убедительно, чем Калладин.

Независимо от того, с какой стороны от пары оснований возникает угроза тесного контакта пуринов, его всегда можно избежать, если уменьшится закручивание спирали в этом месте. Следовательно, вариации локальных значений угла спирального вращения со стереохимической точки зрения объясняются так же, как и вариации угла «открытия». Кроме того, пуридин-пуриновое «столкновение» может быть ослаблено непосредственно — если уменьшится угол пропеллера в одной или обеих парах оснований, или же косвенно — если пара сдвинется вдоль своей продольной оси так, что пуридин частично выйдет из спирали «наружу»\*. Калладин пришел к выводу, что

\* Есть еще по меньшей мере два пути ослабить пуридин-пуриновый контакт — локально растянуть спираль вдоль оси либо изогнуть ось спирали в месте напряжения (в додекамере CGCGAATTCGCG реализованы оба этих способа). Двойная спираль В-ДНК легче гнется в сторону большого желоба, если основания расположены в последовательности пиридин — пуридин; в случае же последовательности пуридин — пиридин предпочтительнее изгиб в обратном направлении — в сторону малого желоба. Такая анизотропия гибкости двойной спирали оказывается существенной для укладки ДНК в нуклеосоме. — Прим. ред.



в малой бороздке «столкновение» пуринов вдвое сильнее, чем в большой и, следовательно, требует вдвое больших изменений параметров спирали.

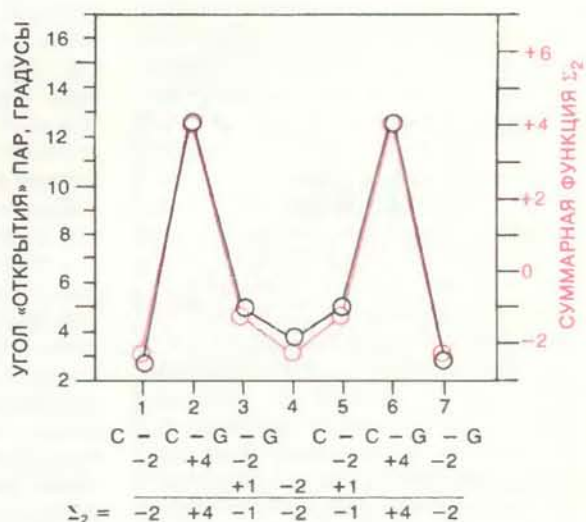
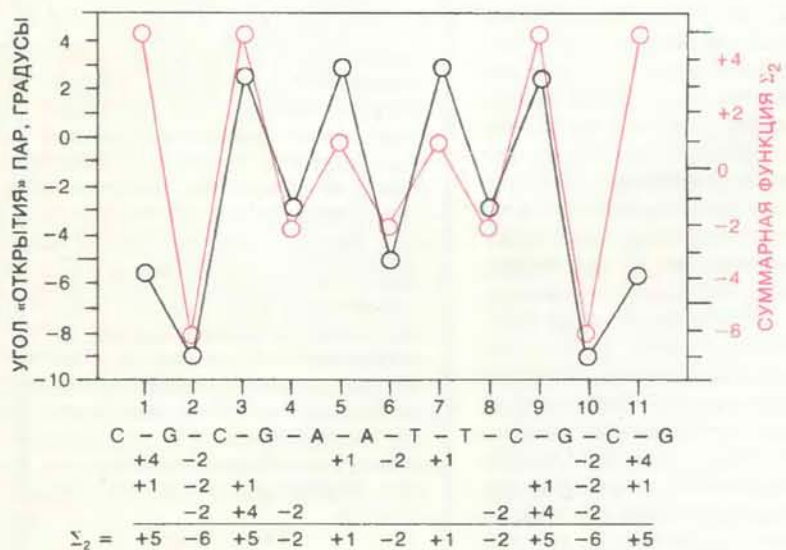
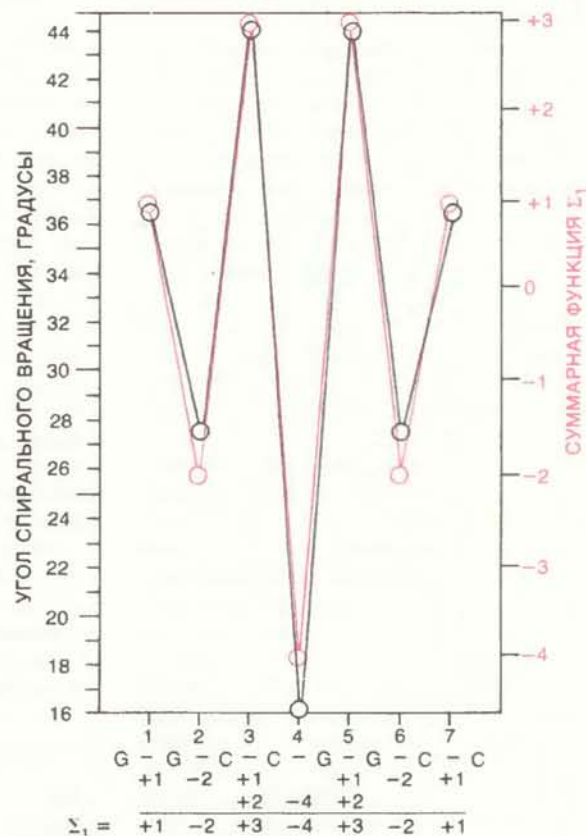
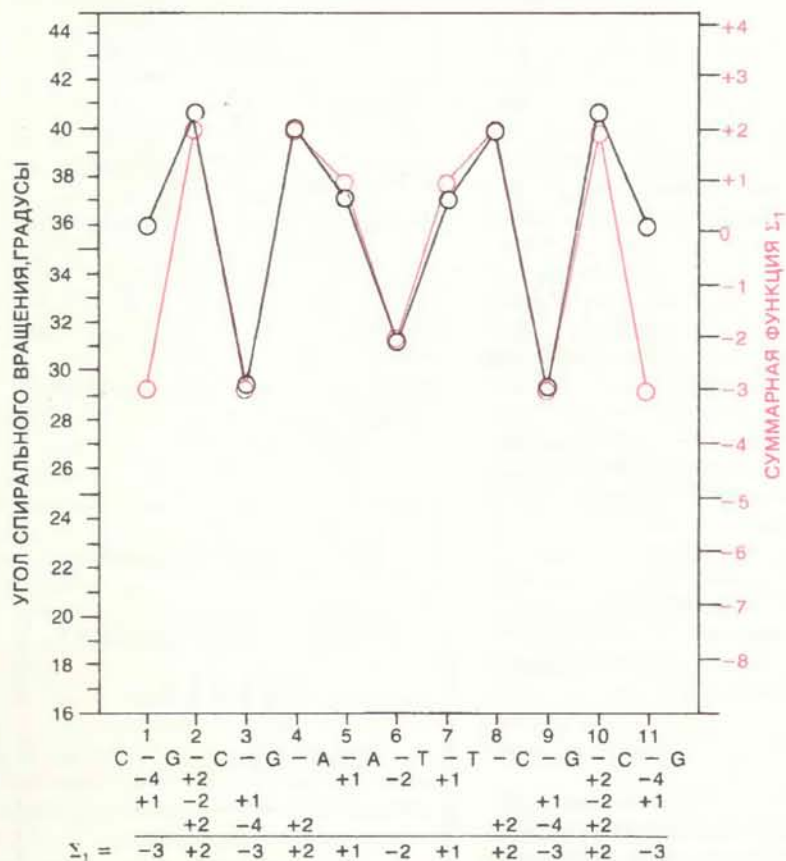
## Предсказание локальных вариаций

Исходя из идей Калладина, наша группа (в настоящее время мы работа-

ем в Калифорнийском университете в Лос-Анджелесе) разработала простые математические функции, с помощью которых на основании нуклеотидной последовательности ДНК можно предсказать локальные вариации четырех углов: спирального вращения, «открытия» пар, пропеллера и вращения вокруг связи  $C3'-C4'$  (последняя характеризует конформацию сахарного коль-

ца). Функции для пропеллера и торсионного угла  $C3'-C4'$ , по-видимому, применимы только к В-ДНК, а функции для первых двух параметров — как для В-, так и для А-формы спирали. В качестве примера рассмотрим, как строится суммарная функция  $\Sigma_1$  для угла спирального вращения.

1. Для каждого перехода от одной пары оснований к следующей выберем



ЛОКАЛЬНЫЕ ВАРИАЦИИ углов спирального вращения и «открытия» пар оснований можно предсказать с помощью суммарных функций  $\Sigma_1$  и  $\Sigma_2$ . На этом рисунке метод проиллюстрирован на примере додекамера, имеющего структуру В-спирали (слева), А-спирального октамера (справа вверху) и «псевдооктамера» — двух состыкованных тетрамеров (справа внизу). Под графиками показано, как рассчитывается суммарная функция для каждого перехода. Экспериментальные значения обозначены черными кружками (см. ле-

вые шкалы), а расчетные значения — цветными (правые шкалы). Экспериментальные и расчетные графики очень похожи: коэффициент корреляции составляет 0,994 для угла спирального вращения В-ДНК, 0,917 для угла «открытия» пар в В-ДНК; 0,991 для угла спирального вращения А-октамера и 0,995 для угла «открытия» в А-псевдооктамере. Псевдооктамер ведет себя в данном случае как истинный октамер; по-видимому, для локальной структуры спирали стэкинг оснований важнее, чем фосфатные связи.



число, отражающее тенденцию к уменьшению закручивания спирали, которое должно снять стереохимические напряжения. Примем это число равным  $-2$  для перехода пурин  $\rightarrow$  пиримидин (стереохимические препятствия в большой бороздке),  $-4$  для перехода пиримидин  $\rightarrow$  пурин («столкновения» в малой бороздке) и  $0$  для переходов пурин  $\rightarrow$  пурин и пиримидин  $\rightarrow$  пиримидин, при которых не возникает напряжений.

2. Припишем в два раза меньшие числа противоположного знака для предыдущего и последующего переходов, так как, когда мы уменьшаем внутренний угол, вращая две соседние пары оснований, мы тем самым на половину этого значения увеличиваем внешние углы с обеих сторон от этих двух пар. Таким образом, общий вклад в суммарную функцию для каждого перехода пурин  $\rightarrow$  пиримидин и двух прилежащих переходов составит  $+1, -2, +1$ ; соответствующие значения для перехода пиримидин  $\rightarrow$  пурин будут  $+2, -4, +2$ .

3. Сложим теперь вклады всех переходов: получится суммарная функция  $\Sigma_1$ , которая характеризует локальные, зависящие от нуклеотидной последовательности отклонения угла спирального вращения от его среднего значения. Рисунок на с. 47 иллюстрирует определение функции  $\Sigma_1$  для додекамера CGCGAATTCGCG. На этом рисунке сравниваются также вычисленные и реальные значения параметра. Сопоставление этих величин методом линейной регрессии дает коэффициент корреляции  $0,994$ , что свидетельствует о хорошем согласии расчетов с экспериментальными данными. Суммарная функция  $\Sigma_1$  надежно воспроизводит локальное закручивание и раскручивание спирали всюду, за исключением концов молекулы, где межмолекулярные взаимодействия, существующие в кристалле ДНК, искажают структуру спирали.

Аналогичным образом можно вычислить суммарную функцию  $\Sigma_2$ , отражающую локальные вариации угла «открытия» пар.  $\Sigma_2$  отличается лишь тем, что для перехода пиримидин  $\rightarrow$  пурин значения чисел должны быть изменены на противоположные ( $-2, +4, -2$ ), так как в этом случае стерические препятствия снимаются при образовании щели между парами оснований, открытой в стороны малой бороздки, т.е. обсуждаемый угол должен возрастать. Поведение функции  $\Sigma_2$  и сравнение вычисленных значений с экспериментальными данными приведены на рисунке для той же последовательности. Как и в предыдущем случае, функция  $\Sigma_2$  хорошо предсказывает локальные вариации значения параметра и в ту и в другую сторону всюду, за исключением самых концов спирали.

Если бы наш метод предсказания го-

дился только для одной-единственной спирали единственного типа, то пользы от него было бы не больше, чем от тех «гениальных» открытий, которые кроме их авторов никто и никогда не может воспроизвести. Однако применение разработанных нами правил к четкому известным примерам А-спирали дало такие же хорошие результаты, как и в случае В-ДНК. Одна из рассмотренных структур, имеющих А-форму, оказалась особенно интересной проверкой метода. Речь идет о двух тетрамерных фрагментах CCGG/CCGG, соединенных в кристалле стык в стык, так что образуется октамер, в котором две центральные пары оснований не соединены фосфатом. Несмотря на отсутствие ковалентной связи и угол спирального вращения, и угол «открытия» пар на этом переходе полностью соответствуют значениям, предсказанным по суммарным функциям, которые рассчитаны для нормального октамера с ковалентной связью в середине. Видимо, дело в том, что при формировании структуры двойной спирали ДНК силы стэкинга между парами оснований превалируют над влиянием сахара-фосфатного остова. Функции для обоих углов «работают» также и для А-спирали GGATATACC. И только в случае гибридных пар РНК — ДНК в смешанной спирали (GCG)TATACGC функция для угла спирального вращения неприменима.

### От структуры к регуляции

Могут ли в действительности локальные флуктуации в структуре спирали влиять на узнавание определенных нуклеотидных последовательностей ДНК репрессором или другими регуляторными белками? Если считать, что в основе такого узнавания лежит образование водородных связей между боковыми группами аминокислотных остатков белка и атомами кислорода и азота оснований ДНК, то трудно себе представить, что отклонения параметров спирали от среднего значения, достигающие  $15^\circ$ , не важны в этом процессе. Возможно, флуктуации спирали, определяемые последовательностью нуклеотидов, нужны для тонкой «подгонки» друг к другу взаимодействующих молекул белка и ДНК и тем самым обеспечивают более точное узнавание, чем то, которое определяется расположением доноров и акцепторов водорода в парах оснований. Действительно ли это так, можно решить только с помощью рентгеноструктурного анализа кристаллических комплексов белков с узнаваемыми ими последовательностями ДНК. В настоящее время исследуются комплексы ДНК с *lac*-, *lambda*- и *cro*-репрессорами, белком-активатором катаболизма и различными рестрикта-

зами. Дж. Розенберг (Питтсбургский университет) недавно рассчитал карту электронной плотности для комплекса рестриктазы *Eco RI* с ее участком узнавания на додекамере CGCGAATTCGCG. По его данным, в этом комплексе ДНК остается в В-форме, но структура спирали несколько изменена.

Вопросы, которые ставят перед собой исследователи, всегда определяются уровнем знания в той или иной области науки. Новые данные порой переносят проблему из владений чистой фантазии в сферу истинно научного рассмотрения. В результате рентгеноструктурных исследований кристаллов ДНК именно это и произошло с вопросами о том, как последовательность оснований ДНК влияет на структуру спирали и насколько важен такой эффект для считывания генетической информации. Нет сомнения, что эти вопросы стоят того, чтобы искать на них ответы: быть может, они приведут нас в итоге к пониманию механизмов генетической регуляции.

## Издательство МИР предлагает:

### Дж. Дривер ГЕОХИМИЯ ПРИРОДНЫХ ВОД

Перевод с английского  
Монография посвящена геохимическим проблемам, связанным с изучением всех генетических типов природных вод (речных, озерных, морских, подземных) и содержит как известные теоретические положения геохимии вод, так и их приложение к конкретной природной обстановке с описанием большого числа примеров. Дана характеристика процессов формирования химического состава вод, процессов растворения, ионного обмена. Рассматриваются возможности математического моделирования геохимических процессов, связанных с природными водами.

1984 г., 29 л.  
Цена 4 р. 65 к





## 50 и 100 лет назад

SCIENTIFIC  
AMERICAN

ДЕКАБРЬ 1933 г. Вина за нехватку телевизионных передатчиков удовлетворительного качества может быть возложена непосредственно на Федеральную комиссию по радиосвязи. Комиссия запретила передачу рекламных объявлений по телевидению, считая, что оно должно служить «только научным целям». Эта мера вполне оправданна, так как она позволит избежать повторения рекламного бума, ставшего причиной спада популярности радиовещания. В то же время из-за введенного ограничения производство телепередатчиков становится нерентабельным, а телеприемники без них превращаются в ненужную вещь.

Вполне вероятно, что Юпитер и Сатурн в значительной степени состоят из свободного водорода. Водород в огромных количествах имеется на Солнце, а сила гравитации этих планет достаточна для того, чтобы не позволить даже этому легкому газу покинуть их и рассеяться в мировом пространстве. Облака, наблюдающиеся в атмосфере Юпитера и Сатурна, возникают, должно быть, в результате конденсации некоторых газов, охлажденных до температуры около  $-100^{\circ}\text{C}$ . Почему эти облака, в частности на Юпитере, имеют такую яркую и разнообразную окраску — белую, коричневую и красную? Ответ на этот вопрос — дело будущего.

В Калифорнии у подножия знаменитых Кеттлмэн-Хиллс недавно пробурена нефтяная скважина глубиной более 11 тыс. футов. В связи с этим событием возникают три вопроса: можно ли достичь еще больших глубин, какие проблемы стоят на пути развития глубинного бурения и будут ли найдены нефтяные залежи на таких глубинах? Известно, что нефтяники уже обсуждают возможность достижения глубины до трех миль. Несмотря на их уверенность в возможности освоения глубинных горизонтов, лишь немногие осмелятся бурить огромную земную толщу, пока производство нефти не упадет до уровня, когда цены на нее оправдают связанные с этим высокие капиталовложения.



ДЕКАБРЬ 1883 г. Согласно последнему ежегодному отчету Edison Electric Light Company, первая районная электростанция в Нью-Йорке «Пирл-стрит стэйшн» выходит сейчас на полную мощность. Из 12 379 электрических ламп накаливания, подключенных к этой сети, на сегодняшний день используется 9811. Эта компания имеет теперь 246 работающих электростанций, которые дают ток для 61 366 ламп.

Хранение и транспортировка нефти находятся сейчас в ведении двух компаний. Принадлежащие им трубопроводы проходят по территории нефтепромысловых районов в шт. Пенсильвания и доставляют нефть в удаленные на сотни миль хранилища. Крупнейшая из этих компаний United Pipe Lines контролируется Standard Oil Company. Из шести ее трубопроводов два соединяют Орлеан с Коммунипо, расположенным на берегу Нью-Йоркского залива, по трем нефть доставляется в Буффало, Кливленд и Питтсбург, и еще один проложен вдоль дороги Reading Road к хранилищу Milton Station. Общая длина всех трубопроводов составляет 3000 миль; кроме того, компания владеет 600 нефтехранилищами суммарной емкостью 20 млн. баррелей. По трубопроводам доставляется сырая нефть, а ее очистка производится в Кливленде, Буффало, Ойл-Сити, Питтсбурге и недалеко от Нью-Йорка. На экспорт поставляется в основном уже очищенная нефть.

Два года назад М. Гастон Тиссандье, убедившись в преимуществах новых динамоэлектрических двигателей на азростатах, продемонстрировал на Электротехнической выставке небольшой электроуправляемый воздушный шар. За последние годы ему удалось разработать новую батарею, в которой используется хромпик. Эта батарея имеет небольшой вес и в течение короткого времени может давать сильный ток. Вслед за этим М. Альберт Тиссандье приступил к разработке принципов конструирования больших удлиненных азростатов, которые должны быть легкими и устойчивыми в атмосфере. В результате им был построен азростат длиной 28 м и диаметром 9,2 м. В гондоле азростата помещена батарея из 24 хромпиковых элементов и питающаяся от нее динамомашинка Сименса, которая через специальную передачу вращает пропеллер. Мощность двигателя 100 килограммометров в секунду (1 киловатт). Пропеллер диаметром около 3 м вращается со скоростью 180 об/мин. Восьмого октября азростат наполнили водородом и в 3 ч 20 мин дня под аплодисменты многочисленных зрителей он медленно поднялся в воздух. Азростат долгое

время находился над Булонским лесом, легко разворачиваясь вправо и влево с помощью пропеллера и руля.

Двадцатого числа истекшего месяца от разрыва сердца скончался сэр Чарлз Уильям Сименс, известный ученый, инженер и специалист в области электротехники. Сименс родился в 1823 г. в Ленте (герцогство Ганновер). Дважды, в 1843 и 1844 гг., приезжал в Англию для практического внедрения методов серебрения и золочения, разработанных его братом Вернером. В 1859 г. получил британское гражданство. С 1856 по 1861 г. совместно с братом Фредериком занимался разработкой регенеративной газовой печи для выплавки из железной руды стали и железа. В 1866 г. Сименс построил в Бирмингеме опытный сталелитейный завод, на котором сталь выплавлялась в открытом горне созданной им регенеративной газовой печи. В 1868 г. основал Лэндорский сталелитейный завод, производящий более 1000 т стального литья в неделю. Начиная с 1848 г. Сименс стал проявлять интерес к телеграфной связи и внес значительный вклад в развитие устройств электросвязи. В 1858 г. совместно с братьями Вернером и Карлом, а также с Гальске из Берлина учредил фирму Siemens Brothers. Он же по собственному проекту построил парокорпус «Фарадей», предназначенный для прокладки кабелей по дну океанов. На принадлежащей братьям Вулвичской фабрике было изготовлено несколько трансатлантических кабелей. Никто в Англии не превзошел его достижений, связанных с электрическим освещением. Множество изобретений в других областях также связано с именем Сименса.

Издательство  
МИР  
предлагает:

Т. Браун, Г. Лемей  
ХИМИЯ — В ЦЕНТРЕ  
НАУК

Перевод с английского

Продолжение серии учебных пособий, промежуточных между программами для высших и средних учебных заведений и заполняющих некоторый разрыв в химической литературе между школьными и вузовскими учебниками.

1983, 75 л. Цена бр. 40к. за комплект



# Квантовая гравитация

*В квантовой теории гравитации сама геометрия пространства-времени должна непрерывно флуктуировать, так что может стереться даже различие между прошлым и будущим*

БРАЙС С. ДЕ ВИТТ

**П**О-ВИДИМОМУ, среди фундаментальных сил природы гравитация отличается особым статусом. Другие силы, например электромагнитные, действуют в пространстве-времени, которое служит простымместилищем физических событий, декорацией, на фоне которой они происходят. Совершенно иной характер имеет гравитация. Она не является силой, действующей на пассивном фоне пространства и времени; скорее, она представляет собой искажение самого пространства-времени. Гравитационное поле — это «кривизна» пространства-времени. Таковы представления о гравитации, установленные А. Эйнштейном в результате тяжелейшей, как он сам говорил, работы в его жизни.

Качественные различия между гравитацией и другими силами становятся еще более ясными, если попытаться сформулировать теорию гравитации согласующуюся с основами квантовой механики. Квантовый мир никогда не находится в состоянии покоя. Например, в квантовой теории электромагнетизма значения электромагнитных полей непрерывно флуктуируют. Во Вселенной, подчиняющейся законам квантовой гравитации, кривизна пространства-времени и даже сама его структура тоже должны будут флуктуировать. Возможно, что последовательность каких-то событий в мире и самый смысл понятий прошедшего и будущего окажутся подверженными изменениям.

Можно возразить, что если бы такие явления существовали, то наверняка уже давно были бы обнаружены. Однако квантовомеханические эффекты гравитации должны проявляться только в исключительно малых масштабах; впервые на такие масштабы обратил внимание М. Планк. В 1899 г. он ввел свою знаменитую постоянную, называемую квантом действия и обозначаемую  $h$ . Планк пытался объяснить спектр излучения абсолютно черного тела, т.е. светового излучения, испускаемого горячей замкнутой полостью через небольшое отверстие. Он отметил, что его константа вместе со скоростью света ( $c$ ) и ньютоновской гра-

витационной постоянной ( $G$ ) образуют абсолютную систему единиц. Эти единицы служат естественными масштабами для квантовой теории гравитации\*.

Планковские единицы никак не связаны с обычными физическими представлениями. Например, единица длины составляет  $1,6 \cdot 10^{-33}$  см. Это на 21 порядок меньше диаметра атомных ядер. Грубо говоря, соотношение планковской длины и размера ядер такое же, как и соотношение размеров чело века и диаметра нашей Галактики. Еще более фантастично выглядит планковская единица времени:  $5,4 \cdot 10^{-44}$  с. Для исследования этих пространственно-временных масштабов с помощью экспериментальных установок, сооруженных на основе современной технологии, необходим ускоритель элементарных частиц размером с Галактику!

В этой области науки из экспериментов нельзя получить окончательных выводов, поэтому квантовая теория гравитации имеет в какой-то степени спекулятивный характер, что необычно для физики. Однако по своей сути эта теория консервативна. В ней используются хорошо проверенные теории для того, чтобы получить из них строгие логические выводы. Если отбросить частности, то главная цель квантовой гравитации — соединение в одну теорию трех компонент: специальной теории относительности, эйнштейновской теории гравитации и квантовой механики. Такой синтез еще не удался полностью осуществить, однако на этом пути мы узнали много нового. Более того, развитие реалистической теории квантовой гравитации указало на единственный пока путь к пониманию Большого взрыва и окончательной судьбы черных дыр, т.е. начала и далекого будущего Вселенной.

\* Приведем выражения для планковских единиц:

длина  $l_{пл} = (hG/c^3)^{1/2} \approx 10^{-33}$  см,  
время  $t_{пл} = l_{пл}/c \approx 10^{-43}$  с,  
масса  $m_{пл} = (hc/G)^{1/2} \approx 10^{-5}$  г,  
энергия  $E_{пл} = m_{пл}c^2 \approx 10^{16}$  эрг (или  $10^{28}$  электронвольт). — Прим. перев.

**И**З ВСЕХ составных частей квантовой гравитации специальная теория относительности исторически появилась первой. В этой теории пространство и время объединяются на основе экспериментально проверенного постулата о независимости скорости света для разных наблюдателей, движущихся в пустом пространстве, свободном от внешних сил. Следствия этого постулата, введенного Эйнштейном в 1905 г., можно описать с помощью пространственно-временных диаграмм, на которых кривые линии изображают положение объектов в пространстве в зависимости от времени. Эти кривые называют мировыми линиями объектов.

Для упрощения я не буду учитывать два пространственных измерения. Тогда мировая линия может быть изображена на двумерном графике, где пространственная ось направлена горизонтально, а временная вертикально. Вертикальная прямая на таком графике представляет собой мировую линию объекта, который покоится в выбранной для измерений системе отсчета, а наклонная прямая — мировую линию объекта, движущегося в этой системе отсчета с постоянной скоростью. Кривая мировая линия описывает движение объекта, испытывающего ускорение.

Любая точка на пространственно-временной диаграмме определяет положение объекта в пространстве в данный момент времени; она называется событием. Пространственное расстояние между двумя событиями зависит от выбранной системы отсчета, это же справедливо для временного интервала между ними. Само понятие одновременности зависит от системы отсчета. Если два события можно соединить горизонтальной линией, то они одновременны в данной системе отсчета, но не в других системах.

Для установления связи между системами отсчета, движущимися относительно друг друга, надо ввести общую единицу измерения пространственных расстояний и временных интервалов. Множителем для пересчета служит скорость света, связывающая данное расстояние с временем, необходимым свету для его преодоления. Я вы-



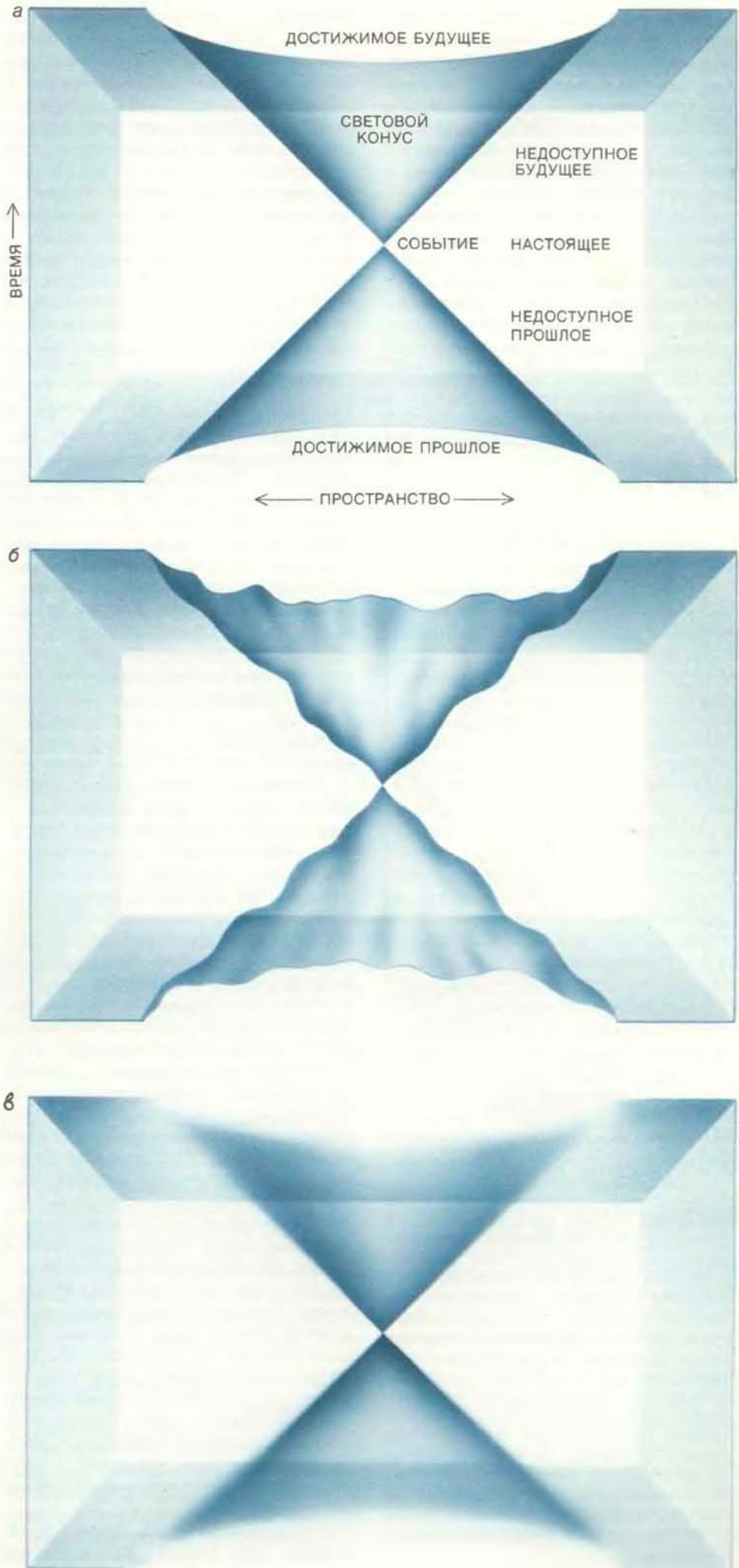
беру метры в качестве единиц измерения пространственных и временных интервалов. В такой системе единиц один метр времени равняется примерно  $3\frac{1}{3}$  наносекунды ( $1 \text{ нс} = 10^{-9} \text{ с}$ ).

Если пространство и время измеряются в одинаковых единицах, то мировая линия фотона (кванта света) наклонена под углом  $45^\circ$ . Мировая линия любого материального объекта отклонена от вертикали на угол, меньший  $45^\circ$ . Это просто иная формулировка утверждения, что скорость любого объекта всегда меньше скорости света. Если мировая линия какого-то объекта или сигнала отклонится от вертикальной оси больше, чем на  $45^\circ$ , то с точки зрения некоторых наблюдателей этот объект или сигнал будет двигаться во времени в обратном направлении. Создав излучатель сверхсветовых сигналов, можно было бы передать информацию в свое собственное прошлое, что нарушило бы принцип причинности. Такие сигналы в специальной теории относительности объявлены «вне закона».

Рассмотрим два события на мировой линии наблюдателя, движущегося без ускорения. Предположим, что в некоторой системе отсчета эти события разделены четырьмя метрами пространства и пятью метрами времени. Тогда наш наблюдатель движется в этой системе отсчета со скоростью, составляющей  $4/5$  скорости света. В другой системе его скорость будет иной, и изменятся соответствующие пространственные и временные расстояния. Есть, однако, величина, которая одинакова во всех системах отсчета. Эту инвариантную величину называют «собственным временем» между двумя событиями; она равна временному интервалу, измеренному по часам, которые наш наблюдатель взял с собой.

В выбранной системе отсчета мировая линия между событиями представляет собой гипотенузу прямоугольного треугольника с основанием 4 м и высотой 5 м. «Собственное время» равно

СВЕТОВОЙ КОНУС, который выделяет области Вселенной, достижимые из данной точки пространства-времени, в квантовой теории гравитации трудно определить. Конус (а) — поверхность в четырехмерном пространстве-времени, но здесь он изображен двумерным: изъято одно пространственное измерение. Если гравитационное поле проквантовано, то форма конуса может сильно флуктуировать на коротких расстояниях (б). На самом деле флуктуации непосредственно различить невозможно; вместо этого световой конус будет «выглядеть размытым». В результате на вопрос, смогут ли какие-то две точки пространства-времени быть соединены сигналом, движущимся медленнее света, можно будет дать только вероятностный ответ (в).





«длине» этой гипотенузы, но вычисленной необычным образом, с помощью «псевдопифагоровой» теоремы. Сначала возводят в квадрат катеты треугольника — так же, как и в обычной теореме Пифагора. Однако квадрат гипотенузы в специальной теории относительности равен не сумме, а разности квадратов катетов.

В нашем примере собственное время равно трем метрам. Оно и останется равным трем метрам в системе отсчета любого наблюдателя, движущегося без ускорения. Именно инвариантность собственного времени позволяет объединить пространство и время в одно реально существующее простран-

ство-время. Геометрия пространства-времени, основанная на «псевдопифагоровой» теореме, не является евклидовой, но во многом ей аналогична. В геометрии Евклида среди множества путей, соединяющих две точки, можно выбрать один экстремальный — прямую линию. То же верно и для геометрии пространства-времени. Однако в евклидовой геометрии этот экстремум всегда является минимумом (прямая — кратчайшее расстояние между точками), в то время как в пространстве-времени — это всегда максимум, если две точки могут быть соединены мировой линией, не содержащей сверхсветовых сигналов.

В 1854 г. немецкий математик Б. Риман обобщил евклидову геометрию на случай искривленных пространств. Двумерные искривленные пространства изучались со времен античности. Они назывались искривленными поверхностями и обычно рассматривались с позиций трехмерного евклидова пространства, в котором они помещены. Риман показал, что искривленные пространства могут иметь любое число измерений и что для их изучения нет необходимости считать, что они находятся в евклидовом пространстве высшей размерности.

Риман указал также, что физическое пространство, в котором мы существуем, может оказаться искривленным. По его мнению, этот вопрос может быть решен только экспериментально. Как же можно, хотя бы в принципе, выполнить подобный эксперимент? Говорят, что евклидово пространство плоское. Параллельные прямые в плоском пространстве образуют однородную прямоугольную сетку. Таково свойство плоского пространства. Что же произойдет, если попытаться нарисовать такую же сетку на поверхности Земли, считая, что она плоская?

Результат можно увидеть с самолета, если лететь в ясный день над обработанными полями Великих равнин. Дороги, проходящие с запада на восток и с севера на юг, поделили всю землю на одинаковые участки (скажем, площадью в одну квадратную милю). Восточно-западные дороги часто представляют собой практически прямые линии, простирающиеся на многие мили. Но северо-южные дороги выглядят иначе. Следуя взглядом вдоль такой дороги, через каждые несколько миль можно встретить неожиданный изгиб на восток или на запад. Эти изгибы появились из-за кривизны земной поверхности. Если их не делать, дороги, ведущие на север, будут сходиться и участки, которые они разделяют, будут иметь площадь меньше квадратной мили.

В трехмерном случае можно представить себе сооружение гигантской

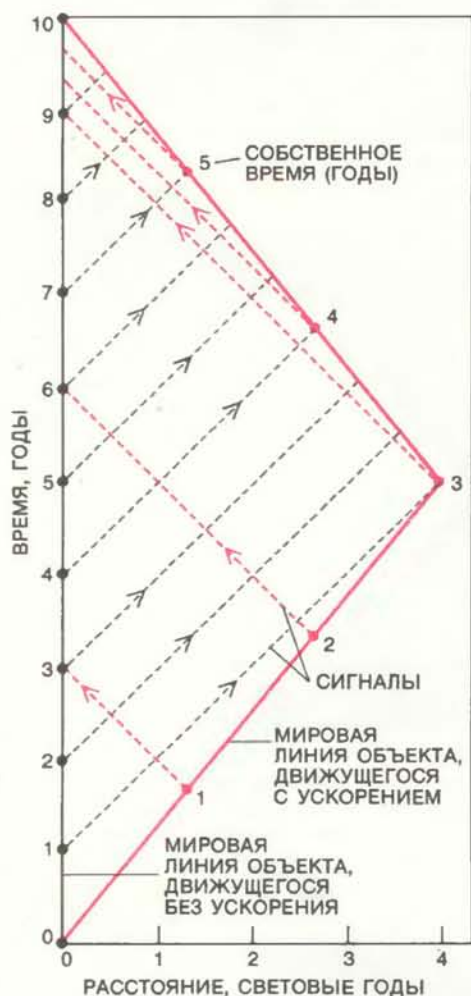
решетчатой конструкции (вроде строительных лесов), в которой ребра сходятся точно под углами  $90^\circ$  и  $180^\circ$ . Если пространство плоское, то сооружение таких лесов не вызовет трудностей. Если же пространство искривлено, то рано или поздно понадобится использовать ребра разной длины, удлиняя или укорачивая некоторые из них, чтобы подогнать друг к другу.

К геометрии специальной теории относительности можно применить такое же обобщение, какое Риман применил к евклидовой геометрии; оно было выполнено между 1912 и 1915 гг. А. Эйнштейном с помощью математика М. Гроссмана. Результатом явилась теория искривленного пространства-времени. В руках Эйнштейна она превратилась в теорию гравитации. В специальной теории относительности пространство-время считалось плоским, т.е. подразумевалось отсутствие гравитационных полей. В искривленном пространстве-времени есть гравитационное поле; в действительности «кривизна» и «гравитационное поле» — просто синонимы.

Поскольку теория гравитационного поля Эйнштейна является обобщением специальной теории относительности, он назвал ее общей теорией относительности. Это название применено неправильно. Общая теория относительности на самом деле менее «относительна», чем специальная теория. Плоское пространство-время лишено характерных особенностей, оно однородно и изотропно, и это обстоятельство гарантирует строгую относительность положений и скоростей. Но как только в пространстве-времени появляются «бугорки», или локальные области с кривизной, то положения и скорости приобретают абсолютный характер: их можно определять по отношению к этим «бугоркам». Пространство-время перестает быть просто пассивной ареной действия для физики, оно само приобретает физические свойства.

В ТЕОРИИ Эйнштейна кривизна создается материей. В принципе соотношение между количеством материи и степенью кривизны простое, но расчеты достаточно сложны. Чтобы описать кривизну в данной точке, надо узнать значения в этой точке двадцати функций пространственно-временных координат. Десять из этих функций соответствуют той части кривизны, которая свободно распространяется в форме гравитационных волн, т.е. в виде «ряби» кривизны. Оставшиеся десять функций определяются распределением масс, энергии, импульса, углового момента и внутренних напряжений в веществе, а также ньютоновской гравитационной постоянной  $G$ .

Постоянная  $G$  очень мала, если при-  
нять во внимание значения плотности



МИРОВАЯ ЛИНИЯ изображает путь в пространстве и во времени. Здесь изображены две мировые линии, демонстрирующие один из вариантов эйнштейновского парадокса близнецов. «Наклонная» мировая линия того из близнецов, который испытывает ускорение в точке поворота при возвращении из путешествия, кажется более длинной, но этот близнец зарегистрирует более короткое «собственное время». Действительно, прямая линия соответствует самому длинному интервалу между двумя точками на пространственно-временной диаграмме. На рисунке показаны времена отправления и прибытия сигналов, которыми обмениваются близнецы.





**КРИВИЗНА ПРОСТРАНСТВА-ВРЕМЕНИ** проявляется как гравитационное поле в присутствии масс. Если подбросить мяч вверх на 5 м (слева), то он будет находиться в полете 2 с. Его движение вверх и затем вниз является проявлением кривизны пространства-времени вблизи земной поверхности. Кривизну траектории мяча легко наблюдать, но в действительности она очень мала, если пространство и время

измерены в одинаковых единицах. Например, секунды можно превратить в метры простым умножением на скорость света, т.е. на 300 млн. м в секунду. Если это сделать, то траектория становится сильно пологой дугой, высота которой всего 5 м, а длина 600 млн. м (справа). На рисунке высота траектории увеличена.

масс, встречающиеся в земных условиях. Требуется очень много масс, чтобы заметно изогнуть пространство-время. Обратную величину  $1/G$  можно рассматривать как меру «жесткости» пространства-времени. С точки зрения повседневного опыта пространство-время очень жесткое. Вся масса Земли создает пространственно-временную кривизну, которая составляет лишь одну миллиардную кривизны земной поверхности.

В теории Эйнштейна тело, свободно падающее или свободно вращающееся по орбите, следует в своем движении по мировой линии, называемой геодезической. Геодезическая, соединяющая две пространственно-временные точки, является мировой линией экстремальной длины; это обобщение понятия прямой линии. Если мысленно поместить искривленное пространство-время в плоское пространство высшей размерности, то геодезическая будет кривой линией.

Влияние кривизны на движение тела часто иллюстрируют моделью, в которой мяч катится по искривленной резиновой поверхности. Эта модель вводит в заблуждение, поскольку может воспроизвести только пространственную кривизну. В реальной жизни мы вынуждены оставаться в четырехмерной Вселенной, в нашем обычном пространстве-времени. Более того, мы не можем избежать движения в этой Вселенной, так как неустанно несемся вперед во времени. Время — это ключевой элемент. Оказывается, что, хотя пространство и искривляется в гравитационном поле, гораздо более важно искривление времени. Причина этого кроется в большом значении скорости света, которая связывает масштабы пространства и времени.

Вблизи Земли кривизна пространст-

ва настолько мала, что не может быть обнаружена путем статических измерений. Но при нашей безудержной гонке за временем кривизна в динамических ситуациях становится заметной, подобно тому как бугорок на автостраде может быть незаметен для пешехода, но станет опасным для мчащегося автомобиля. Несмотря на то, что околоземное пространство можно считать с высокой степенью точности плоским, мы в состоянии обнаружить кривизну пространства-времени при простом броске мяча в воздух. Если мяч находится в полете 2 с, то он опишет дугу высотой 5 м. За эти же 2 с свет проходит расстояние 600 000 км. Если представить, что дугу высотой 5 м удлиняют по горизонтали до размеров 600 000 км, то кривизна получившейся дуги будет соответствовать кривизне пространства-времени.

**ВВЕДЕННЫЕ** Риманом идеи относительно искривленных пространств способствовали исследованиям в другой обширной области математики — топологии. Было известно, что безграничные двумерные поверхности могут существовать в бесконечном множестве вариантов, которые не приводятся друг к другу непрерывной деформацией поверхности; простой пример этого — сфера и тор. Риман указал, что то же справедливо для искривленных пространств высшей размерности, и предпринял первые шаги их классификации.

Искривленное пространство-время (более точно, его модели) также может относиться к одному из многих топологических типов. С точки зрения соответствия реальной Вселенной некоторые модели должны быть отвергнуты, поскольку они ведут к парадоксам, связанным с причинностью, или в них не-

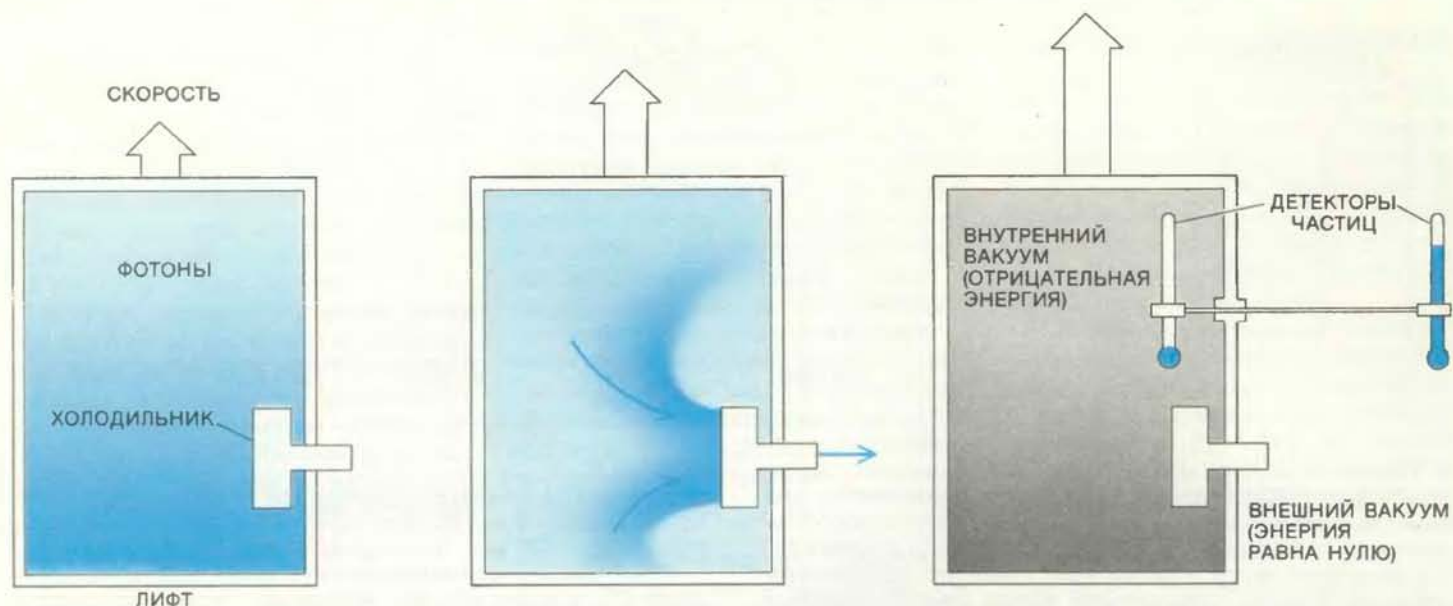
возможно сформулировать известные законы физики. Но все же остается еще огромное число возможностей.

Знаменитую модель Вселенной предложил в 1922 г. советский математик А. А. Фридман. В специальной теории относительности пространство-время не только плоское, но и бесконечное как во времени, так и в пространстве. В модели Фридмана любое трехмерное пространственное сечение пространства-времени имеет конечный объем и топологию трехмерной сферы. Трехмерная сфера — это пространство, которое можно вложить в четырехмерное евклидово пространство так, что все его точки будут находиться на данном расстоянии от заданной точки. С тех пор как Э. Хаббл открыл в 20-х годах расширение Вселенной, модель Фридмана стала любимой космологов. Вместе с эйнштейновской теорией гравитации модель Фридмана предсказывает Большой взрыв в начальный момент расширения Вселенной, когда давление было бесконечно велико. Далее следует расширение, скорость которого медленно уменьшается из-за взаимного гравитационного притяжения всей материи во Вселенной.

В пространстве-времени Фридмана любая замкнутая кривая может быть непрерывным образом стянута в точку. О таком пространстве-времени говорят, что оно односвязно. Реальная Вселенная такого свойства может и не иметь. По-видимому, модель Фридмана очень хорошо описывает области пространства, находящиеся в пределах нескольких миллиардов световых лет от Галактики, однако вся Вселенная недоступна нашему наблюдению.

Простым примером многосвязной вселенной является вселенная, структура которой в заданном пространственном направлении повторяется *ad infi-*





**УСКОРЯЕМАЯ КАБИНА ЛИФТА** — аппарат для мысленного эксперимента, который поясняет природу вакуума в квантовой механике и влияние на него ускорения или гравитационного поля. Предполагается, что кабина пуста и изолирована, так что первоначально внутри и снаружи имеется абсолютный вакуум. Когда кабина ускоряется, ее пол испускает электромагнитную волну и лифт наполняется разреженным газом квантов электромагнитного излучения — фотонов (слева). Холодильник, подключенный к какому-то внешнему источнику энергии, «выкачивает» фотоны (в середине). Когда все фотоны удалены, детекторы фотонов измеряют энергию вакуума внутри и снаружи (справа). По-

скольку наружный прибор ускоряется сквозь вакуум, он реагирует на квантовомеханические флуктуации полей, которыми пространство пронизано даже в отсутствие частиц. Внутренний детектор покоится по отношению к лифту и «не чувствует» флуктуаций. Отсюда следует, что вакуумы внутри и снаружи кабины не эквивалентны. Если положить, что энергия «стандартного» вакуума снаружи равна нулю, то вакуум внутри кабины должен иметь отрицательную энергию. Чтобы восстановить нулевое значение энергии вакуума внутри лифта, надо вернуть удаленные фотоны. Гравитационное поле также может породить вакуум с отрицательной энергией.

*nitum* (до бесконечности) подобно рисунку на обоях. Каждая галактика в такой вселенной является членом бесконечного ряда идентичных галактик, разделенных некоторым фиксированным (и с необходимостью огромным) расстоянием. Если члены этого ряда галактик действительно абсолютно идентичны, то встает вопрос, следует ли их вообще рассматривать как разные галактики. Более экономно представлять весь ряд как одну галактику. Тогда путешествие от одного члена ряда к другому означает возвращение путешественника в начальную точку. Траектория такого путешествия является замкнутой кривой, которую нельзя стянуть в точку. Она подобна замкнутой кривой на поверхности цилиндра, которая один раз охватывает цилиндр. Такая повторяющаяся вселенная называется цилиндрической.

Другим примером многосвязной структуры является модель «ручек»\*, предложенная в 1957 г. Дж. Уилером (теперь он работает в Техасском университете в Остине). Здесь многосвязность проявляется на гораздо меньшем расстоянии, чем в предыдущем случае. Двумерную «ручку» можно построить, если в двумерной поверхности про-

резать два круглых отверстия и гладко соединить края разрезов (см. рисунок на с. 55). В трехмерном пространстве процедура остается той же, но ее труднее представить наглядно.

Так как в первоначальном пространстве две дырки могут находиться на большом расстоянии друг от друга и все же соединяться через «горловину», такая «ручка» стала в научной фантастике излюбленным устройством для перемещений из одного места пространства в другое быстрее света: надо только «проколоть» в пространстве две дырки, соединить их и «проползти» через горловину. К сожалению, даже если удастся построить такой «дырокол» (что представляется весьма сомнительным), система не будет работать. Если геометрия пространства-времени подчиняется уравнениям Эйнштейна, то «ручка» должна быть динамическим объектом. Как оказалось, дырки, которые она соединяет, с необходимостью должны быть черными дырами, из которых нет возврата. Что же случится с путешественником? Горловина сожмется, и все, что находится внутри, спрессуется до бесконечно большой плотности, прежде чем достигнет выхода.

но в ее первоначальной формулировке не принималась во внимание теория относительности. Тем не менее ей сразу же сопутствовал блестящий успех, так как давно ждали своего объяснения многочисленных экспериментальных наблюдений, в которых доминировали именно квантовые эффекты, а релятивистские эффекты играли малую или вообще ничтожную роль. Было известно, однако, что в некоторых атомах электроны достигают таких скоростей, которыми уже нельзя пренебрегать даже по сравнению со скоростью света. Поэтому начало поисков релятивистской квантовой теории не заставило себя ждать.

К середине 30-х годов было полностью осознано, что соединение квантовой механики с теорией относительности приводит к некоторым совершенно новым фактам. Следующие два из них наиболее фундаментальны. Во-первых, каждая частица ассоциируется с некоторым типом поля, а каждое поле — с целым классом неразличимых частиц. Электромагнетизм и гравитация не могли уже рассматриваться как единственные фундаментальные поля в природе. Во-вторых, есть два типа частиц, различающихся значениями спинового углового момента. Частицы с полуцелым спином  $1/2\hbar$ ,  $3/2\hbar$  и т.п. подчиняются принципу запрета (никакие две частицы не могут быть в одинаковом квантовом состоянии).

\* Термин «ручка», употребляемый в отечественной научной литературе, заимствован из топологии. — Прим. перев.

**КВАНТОВАЯ** механика, третья составная часть квантовой теории гравитации, была создана в 1925 г. В. Гейзенбергом и Э. Шредингером,



Частицы с целым спином  $0, \hbar, 2\hbar$  и т.д. более «общительны» и могут собираться в группы с произвольным числом частиц.

Эти удивительные следствия соединения специальной теории относительности и квантовой механики неоднократно подтверждались за последние 50 лет. Квантовая теория в сочетании с релятивизмом произвели на свет теорию, которая величественнее простой суммы ее частей. Синергический, взаимно усиливающий, эффект выражен даже еще больше, когда в теорию включается гравитация.

В классической физике пустое плоское пространство-время называют вакуумом. Классический вакуум не имеет физических свойств. В квантовой физике название «вакуум» дается гораздо более сложному объекту со сложной структурой. Эта структура является следствием существования неисчезающих свободных полей, т.е. полей, далеких от своих источников.

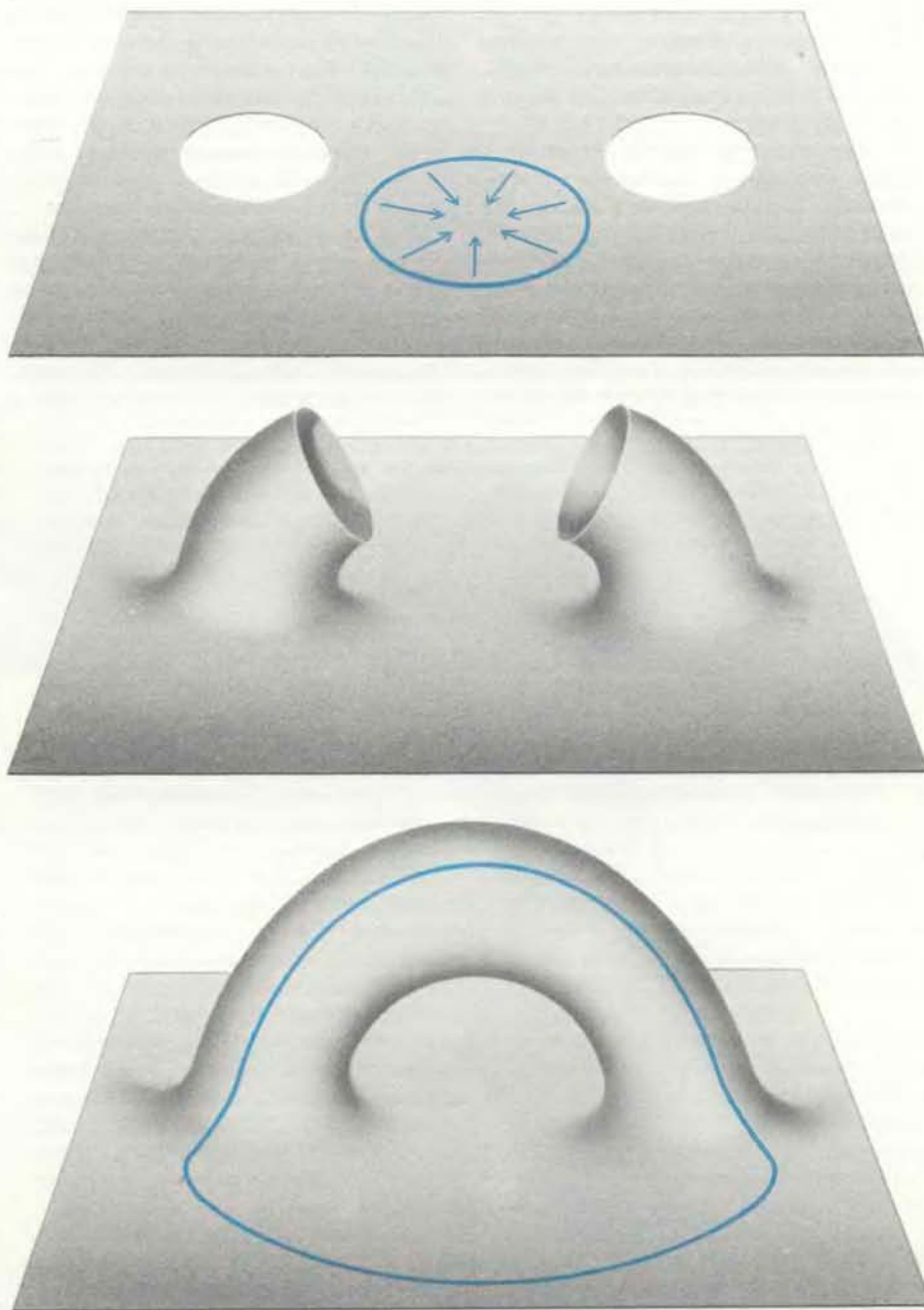
Свободное электромагнитное поле математически эквивалентно бесконечному набору гармонических осцилляторов, которые можно представить как пружинки с массами на концах. В вакууме каждый осциллятор находится в основном состоянии (в состоянии с минимальной энергией). Классический (не квантовомеханический) осциллятор в своем основном состоянии покоится в некоторой определенной точке, соответствующей минимуму потенциальной энергии. Но это невозможно для квантового осциллятора. Если бы квантовый осциллятор находился в определенной точке, то его положение было бы известно с бесконечной точностью. По принципу неопределенности осциллятор должен был бы тогда иметь бесконечно большой импульс и бесконечную энергию, что невозможно. В основном состоянии квантового осциллятора точно не определены ни его положение, ни импульс. И то и другое подвержены случайным флуктуациям. В квантовом вакууме флуктуирует электромагнитное поле (и любые другие поля).

Несмотря на то что флуктуации поля в вакууме случайны, они относятся к специальному классу флуктуаций. А именно, подчиняются принципу относительности в том смысле, что «выглядят» одинаково для любого наблюдателя, движущегося с произвольной скоростью, но без ускорения. Как можно показать, из этого свойства следует, что среднее значение поля равно нулю и что величины флуктуаций растут с уменьшением их длины волны. Окончательный результат состоит в том, что наблюдатель не сможет использовать квантовые флуктуации для определения своей скорости относительно вакуума.

Однако флуктуации можно исполь-

зовать для определения ускорения. В 1976 г. это показал У. Унру из Университета провинции Британская Колумбия (Ванкувер, Канада). Результат Унру состоял в том, что гипотетический детектор частиц, испытывающий постоянное ускорение, должен реагировать на вакуумные флуктуации так, как если бы он покоился в газовой среде (следовательно, не в вакууме) с температурой, пропорциональной ускорению. Неускоряемый детектор вообще не должен реагировать на квантовые флуктуации.

Возможность подобной связи между температурой и ускорением привела к переосмыслению термина «вакуум» и пониманию того факта, что существуют различные виды вакуума. Один из простейших нестандартных вакуумов может быть порожден повторением в квантовомеханическом варианте мысленного эксперимента, впервые предложенного Эйнштейном. Представим замкнутую кабину лифта, свободно дрейфующую в пустом пространстве. Некий «игривый дух» начинает «тянуть» кабину так, что она приходит в



«РУЧКА» В ПРОСТРАНСТВЕ-ВРЕМЕНИ представляет собой гипотетическое образование, которое может изменить топологию Вселенной. «Ручку» на плоскости можно создать, если прорезать два отверстия и вытянуть их края в трубки, которые затем соединяются. На первоначальной плоскости любая замкнутая кривая может быть стянута в точку (показано цветом). Однако кривая, проходящая сквозь «ручку», не может быть стянута. «Ручка» в трехмерном пространстве не имеет принципиального отличия от «ручки» в четырехмерном пространстве-времени.



состояние движения с постоянным ускорением в направлении своего толчка. Предположим также, что стены кабины сделаны из идеального проводника, непроницаемого для электромагнитного излучения, а из кабины полностью откачан воздух, так что в ней не содержится никаких частиц. Эйнштейн придумал это воображаемое место действия для иллюстрации эквивалентности гравитации и ускорения, однако анализ мысленного эксперимента с современных позиций показывает, что здесь следует ожидать некоторых чисто квантовых эффектов.

**Н**АЧНЕМ с того, что в момент, когда возникает ускорение, пол кабины испускает электромагнитную волну, которая распространяется к потолку и затем, отражаясь, мечется туда-сюда. (Чтобы показать, почему испускается волна, необходим детальный математический анализ свойств ускоряемого электрического проводника.) Эффект аналогичен рождению акустической волны давления в наполненной воздухом кабине. Если допустить на некоторое время возможность диссипации излучения в стенках кабины, то электромагнитная волна превратится в газ фото-

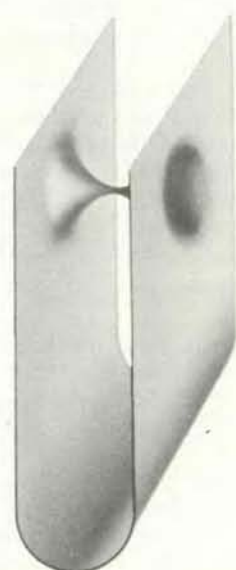
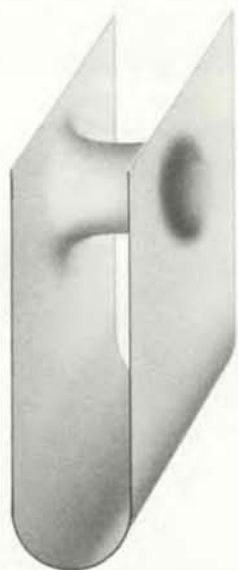
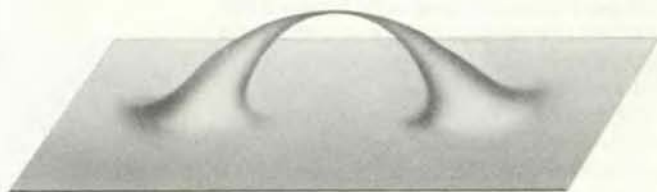
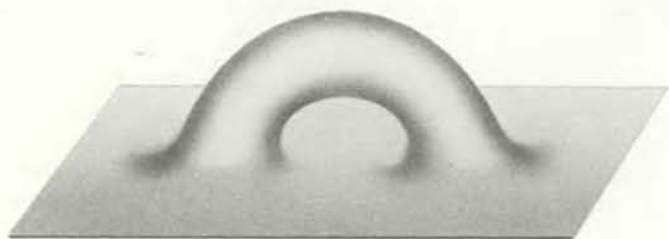
нов с тепловым спектром энергий, т.е. появится излучение абсолютно черного тела, характерное для некоторой температуры.

Теперь кабина содержит разреженный газ фотонов. Чтобы избавиться от них, можно использовать холодильник с радиатором, выведенным наружу. Это потребует определенных затрат энергии, которая подводится от внешнего источника. В результате, после того как будут откачаны все фотоны, образуется новый вакуум. Новый вакуум слегка отличен от стандартного вакуума снаружи кабины. Разница состоит в следующем. Во-первых, детектор Унру, который вместе с кабиной лифта участвует в ускоренном движении, должен был бы реагировать на флуктуации поля в стандартном вакууме, находящемся снаружи; однако он не обнаружит никакой реакции на новый вакуум внутри. Во-вторых, два вакуума различаются содержанием энергии.

Чтобы вычислить энергию вакуума, надо прежде разрешить некоторые фундаментальные вопросы квантовой теории поля. Я отмечал выше, что свободное поле эквивалентно набору гармонических осцилляторов. Флуктуации в основном состоянии создают у

вакуумного поля некоторую остаточную энергию, известную под названием энергии нулевых колебаний. Поскольку в единице объема сосредоточено бесконечное число осцилляторов поля, плотность энергии вакуума, по видимому, также должна быть бесконечной.

Бесконечное значение плотности энергии вакуума представляет собой серьезную проблему. Однако теоретикам удалось изобрести ряд технических средств для ее устранения. Эти средства — часть общей программы, называемой теорией перенормировок, которая дает рецепт борьбы с различными бесконечностями, возникающими в квантовой теории поля. Какие бы средства ни применялись, они должны быть универсальными в том смысле, что не должны специально создаваться для конкретной физической ситуации, а могут использоваться во всех случаях. Они также должны привести к исчезающей плотности энергии для стандартного вакуума. Последнее требование существенно для согласованности с теорией Эйнштейна, поскольку стандартный вакуум является квантовым эквивалентом пустого плоского пространства-времени. Если в нем со-



УДАЛЕННЫЕ ОБЛАСТИ ВСЕЛЕННОЙ в принципе могут быть соединены с помощью «ручки». Можно предположить, что это позволяет обмениваться сигналами, распространяющимися быстрее света, но в действительности такая схема не будет работать. На рисунке *вверху слева* расстояние между дырками во «внешнем мире» сравнимо с расстоянием через «горловину». Для «ручки», изображенной *слева внизу*, внешнее расстояние гораздо больше. На нижних рисунках пространство представлено искривленной плоскостью,

но таков ее вид с позиций наблюдателя, находящегося в пространстве более высокой размерности. Для наблюдателя, находящегося на плоскости, она будет казаться действительно примерно плоской. Какова бы ни была длина «горловины», пройти через нее невозможно. Причина заключается в том, что «ручка» всегда соединяет две черные дыры. «Горловина утончается», как изображено на рисунках *справа*, и все, что туда попало, будет сжато до бесконечной плотности, прежде чем достигнет противоположного конца.



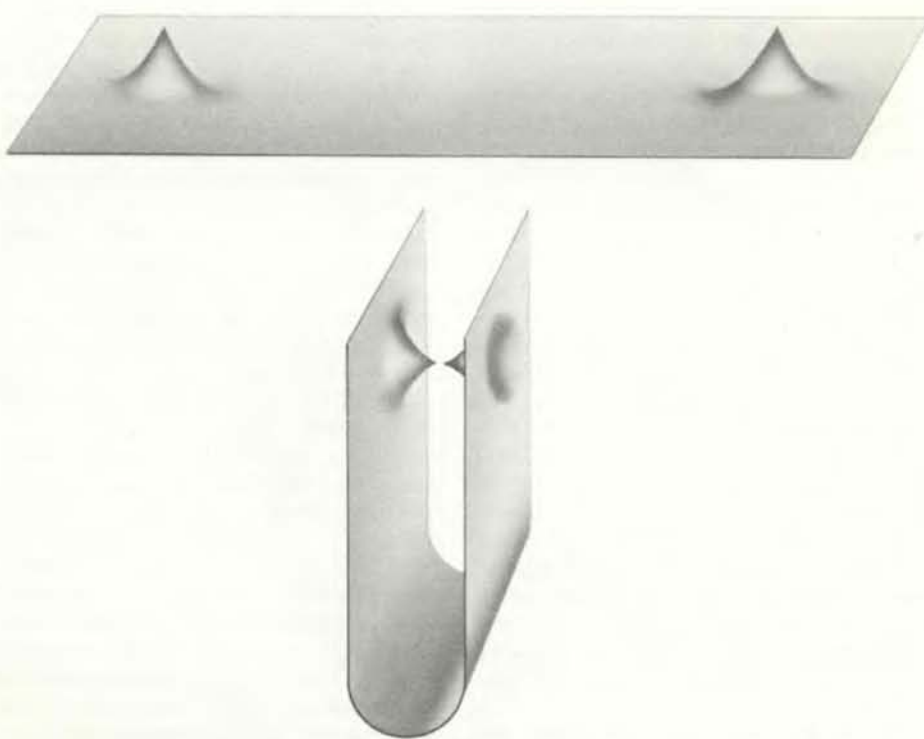
средоточена какая-то энергия, то пространство-время не будет плоским.

Как правило, различные подходы к теории перенормировок дают одинаковые результаты для одних и тех же задач. Это внушает веру в их справедливость. Если применить эти подходы к вакуумам внутри и снаружи кабины лифта, они приведут к нулевому значению плотности энергии снаружи и отрицательному значению плотности энергии внутри лифта. Сюрпризом является отрицательная энергия вакуума. Что может быть меньше, чем ничего? Однако немного размышлений, и становится ясной разумность отрицательного значения. Внутри кабины надо поместить тепловые фотоны, чтобы детектор Унру реагировал так же, как и детектор в стандартном вакууме снаружи. Добавление фотонов приведет к тому, что вместе с их энергией полная энергия внутри кабины станет равной нулю, т.е. такой же, как и для вакуума снаружи.

Следует подчеркнуть, что такие причудливые эффекты довольно трудно обнаружить. Ускорения, встречающиеся в повседневной жизни, и даже в случае высокоскоростных механизмов, слишком малы, чтобы отрицательная энергия вакуума могла быть зарегистрирована в опытах. Однако имеется один случай, когда отрицательная энергия вакуума наблюдалась, хотя и косвенным образом. Речь идет об эффекте, предсказанном в 1948 г. Х. Казимиром из исследовательской лаборатории фирмы "Philips" в Нидерландах. Две параллельные отполированные незаряженные металлические пластинки помещаются в вакууме очень близко друг к другу. Обнаружено, что они слабо притягиваются благодаря силе, происхождение которой связано с отрицательной плотностью энергии вакуума между пластинками.

**Е**СЛИ пространство-время искривлено, то вакуум становится еще более сложным. Кривизна влияет на пространственное распределение флуктуаций квантовых полей и, подобно ускорению, способна индуцировать отрицательную энергию вакуума. Поскольку кривизна может меняться от точки к точке, энергия вакуума тоже может изменяться, будучи положительной в одних местах и отрицательной — в других.

В любой самосогласованной теории энергия должна сохраняться. Предположим, что возрастание кривизны приводит к росту плотности энергии вакуума. Само существование флуктуаций квантовых полей означает тогда, что для искривления пространства-времени необходима энергия. Таким образом, пространство-время сопротивляется искривлению в точности так же, как в теории Эйнштейна.



**ФЛУКТУИРУЮЩАЯ ТОПОЛОГИЯ**, характерная для пространства-времени в некоторых вариантах квантовой теории гравитации, приводит к серьезным принципиальным трудностям. Здесь даны изображения «ручки», которая постепенно становилась тоньше и наконец исчезла, оставив после себя два «выроста». Если такой процесс возможен, то возможен и обратный процесс. Иными словами, «выросты» могут слиться в новую «ручку». Такое событие представляется вероятным, когда «выросты» находятся близко, и невозможным, если они удалены друг от друга. Однако представление о том, что находится «близко» или «далеко», связано с вложением поверхности в пространство высшей размерности. Для наблюдателя, находящегося на самой поверхности, оба случая, изображенные на рисунках, должны быть неразличимы.

В 1967 г. А. Д. Сахаров предположил, что гравитация может быть чисто квантовым явлением, возникающим вследствие энергии вакуума. Он предположил также, что ньютоновская постоянная  $G$ , или, что то же, жесткость пространства-времени может быть вычислена из первых принципов теории. Такое предложение встретилося с рядом трудностей. Во-первых, требовалось, чтобы гравитацию как фундаментальное поле сменило некое «калибровочное поле великого объединения», порожденное известными элементарными частицами. Чтобы по-прежнему получалась абсолютная шкала единиц, надо ввести некоторую фундаментальную массу. Следовательно, одна фундаментальная постоянная просто заменится другой.

Во-вторых, что, по-видимому, более важно, вычисленная зависимость энергии вакуума от кривизны, как оказалось, ведет к более сложной теории гравитации, чем теория Эйнштейна. Энергия вакуума зависит от числа и вида выбранных элементарных полей и метода перенормировки: выяснилось, что энергия может даже убывать с ростом кривизны. Такая обратная связь означала бы, что плоское пространство-время нестабильно и должно

стремиться сморщиться, как слива при высушивании. Далее будем считать гравитационное поле фундаментальным.

Истинный вакуум определяется как состояние теплового равновесия при температуре, равной абсолютному нулю. В квантовой гравитации такой вакуум может существовать только в случае, когда кривизна не зависит от времени. Если это не так, то в вакууме могут спонтанно появляться частицы (в результате чего вакуум, конечно, перестанет быть вакуумом).

Механизм рождения частиц можно опять-таки объяснить на языке модели гармонических осцилляторов. Когда изменяется кривизна пространства-времени, меняются и физические свойства осцилляторов поля. Предположим, что обычный осциллятор первоначально находится в основном состоянии и подвержен нулевым колебаниям. Если изменить одну из его характеристик, например величину массы или жесткость пружины, то нулевые колебания должны сами приспособиться к этим изменениям. После этого существует конечная вероятность обнаружить осциллятор не в основном, а в возбужденном состоянии. Такое явление аналогично возрастанию



колебаний фортепьянной струны при увеличении ее натяжения; эффект известен под названием параметрического возбуждения. В квантовой теории поля аналогом параметрического возбуждения является рождение частиц.

**ЧАСТИЦЫ**, генерируемые изменениями кривизны во времени, появляются случайным образом. Невозможно точно предсказать, когда и где родится данная частица. Однако можно рассчитать статистическое распределение энергии и импульса частиц. Рождение частиц наиболее обильно там, где больше кривизна и где она быстрее всего меняется. Возможно, самое обильное рождение частиц происходило во времена Большого взрыва, когда оно могло быть основным эффектом, определяющим динамику Вселенной на ранних стадиях ее развития. И совсем не кажется неправдоподобным, что рожденные тогда частицы ответственны за всю существующую во Вселенной материю!

Попытки рассчитать рождение частиц в Большом взрыве были впервые предприняты примерно 10 лет назад независимо советским академиком

Я. Б. Зельдовичем и Л. Паркером из Висконсинского университета в Милуоки. С тех пор этими вопросами занимались многие ученые. Хотя некоторые результаты выглядят многообещающими, ни один из них нельзя назвать точным. Более того, остается неразрешенным главный вопрос: что выбирается в качестве начального квантового состояния в момент Большого взрыва? Здесь физики могут взять на себя роль бога. Ни одно из сделанных до сих пор предложений не представляется безупречным.

Другое явление во Вселенной, когда кривизна может быстро изменяться, это коллапс звезды в черную дыру. Здесь квантовомеханические вычисления независимо от начальных условий привели к настоящему сюрпризу. В 1974 г. С. Хокинг из Кембриджского университета показал, что изменение кривизны вблизи коллапсирующей черной дыры порождает поток излученных частиц. Этот поток равномерен и продолжается долго после того, как черная дыра станет геометрически стационарной. Он может продолжаться из-за замедления времени в огромном гравитационном поле вблизи поверх-

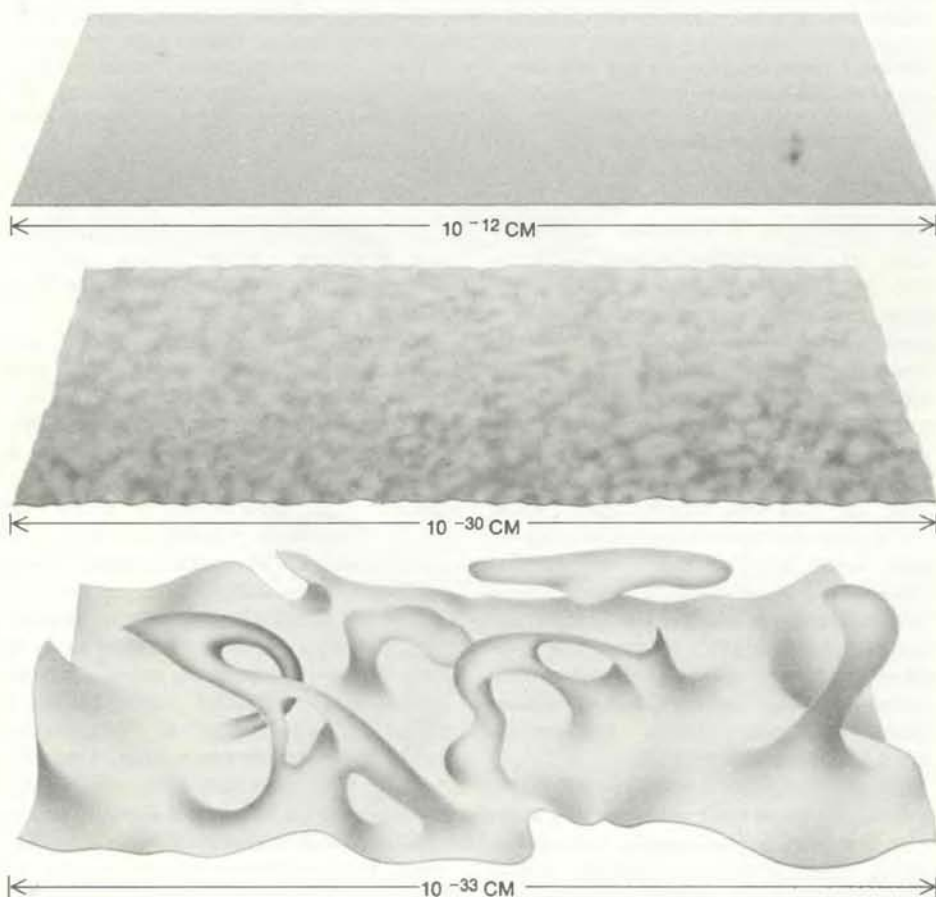
ности горизонта черной дыры, когда внешнему наблюдателю кажется, что все процессы замирают. Частицы, рожденные вблизи горизонта, медлят с путешествием во внешний мир.

Хотя задержка в испускании означает, что есть огромное число частиц, «толпящихся» около горизонта и ждущих своей «очереди» перед вылетом, полная плотность энергии в этой области все же отрицательна и довольно мала. Положительная энергия частиц в большей части скомпенсирована огромной отрицательной энергией вакуума, которая имела бы в отсутствие этих частиц (например, если черная дыра существовала всегда и никогда не была рождена в гравитационном коллапсе).

Можно показать, что испускание частиц статистически не коррелируется и что их энергетический спектр имеет характер теплового. Излучение Хокинга подобно излучению черного тела, что, быть может, является его основным свойством. Это позволяет приписать черной дыре как температуру, так и энтропию. Энтропия, являющаяся мерой термодинамического беспорядка в системе, оказывается пропорциональной площади поверхности горизонта. Она огромна для черной дыры с массой порядка массы звезд: на 19 порядков больше энтропии звезды, из которой возникла черная дыра. С другой стороны, температура обратно пропорциональна массе и в нашем примере должна быть на 11 порядков меньше температуры звезды-прародительницы.

Поскольку количество излучения, испускаемого объектом, зависит от его температуры, излучение Хокинга от астрофизических черных дыр совершенно ничтожно. Оно становится важным лишь для черных «мини-дыр» с массой, меньшей  $10^{10}$  граммов. Единственная мыслимая причина образования черных мини-дыр — это огромное давление в процессе Большого взрыва. Возможно, что тогда происходило их множественное рождение. В таком случае они должны вносить значительный вклад в энтропию Вселенной.

**ЭНЕРГИЯ** частицы, рожденной вследствие изменения кривизны во времени, не черпается из ничего. Она взята из самого пространства-времени. В свою очередь частица действует на пространство-время. Предпринимались различные попытки рассчитать эту «обратную реакцию» в случае Большого взрыва, чтобы определить ее влияние на динамику ранней Вселенной. В частности, может ли обратная реакция подавить (скомпенсировать) бесконечно большую начальную плотность материи, требуемую классической теорией Эйнштейна. Бесконечная плотность является барьером для всех дальней-



**КВАНТОВЫЙ ВАКУУМ**, как его представил в 1957 г. Дж. Уилер, становится все более хаотичным, если рассматривать его на все более малых расстояниях в пространстве. В масштабах атомных ядер (вверху) пространство выглядит очень гладким. На расстояниях порядка  $10^{-30}$  см начинают проявляться некоторые неровности (в середине). На расстояниях, примерно в 1000 раз меньших, т.е. в масштабах планковской длины (внизу), кривизна и топология пространства сильно флуктуируют.



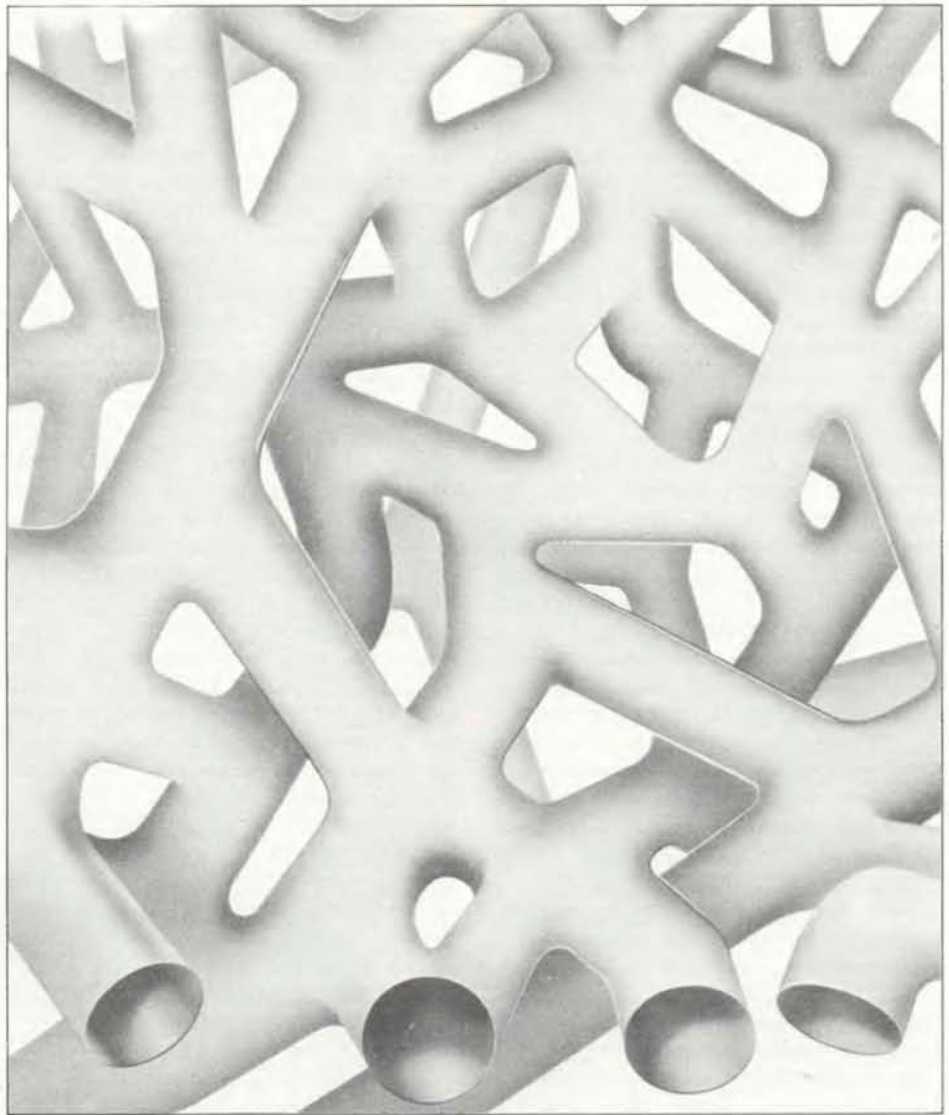
ших исследований. Если бы можно было заменить ее просто огромной плотностью, то возник бы вопрос: что происходило во Вселенной *перед* Большим взрывом?

В 60-х годах Р. Пенроуз из Оксфордского университета и С. Хокинг показали, что классическая теория Эйнштейна неполна. Она предсказывает появление в прошлом или будущем бесконечных плотностей и бесконечной кривизны при ряде физически приемлемых условий. Теория, приводящая к бесконечным значениям физически наблюдаемых величин, не в состоянии предсказать их поведение за этими точками. Поскольку физики верят в познаваемость природы, они считают, что такую теорию следует изменить, чтобы включить более широкий класс явлений. В настоящее время консервативный взгляд заключается в следующем: включение квантовых эффектов является единственно приемлемым средством, способным избавить теорию Эйнштейна от некоторой ограниченности.

Вычисления обратного влияния рожденных частиц на процесс Большого взрыва производились методами численного моделирования на компьютерах. Пока они дали неопределенные результаты. Одна из трудностей состояла в проблеме выбора (в качестве исходных данных для компьютера) достоверного значения общей плотности энергии рожденных частиц и квантового вакуума, в который они помещены.

Эффект обратного действия особенно важен для черных дыр. Излучение Хокинга «похищает» у черной дыры и температуру, и энтропию. Соответственно уменьшается масса черной дыры. Скорость уменьшения массы сначала невелика, но резко увеличивается по мере роста температуры. В конце концов скорость изменений становится столь большой, что нарушаются приближения, при которых рассчитывалось излучение Хокинга. Что происходит потом — неизвестно. Хокинг думает, что его приближение останется качественно справедливым, так что черная дыра прекратит свое существование в эффектной вспышке, после которой в причинной структуре пространства-времени останется «голая сингулярность».

Любая сингулярность (голая она или нет) означает несостоятельность теории. Если Хокинг прав, то неполна не только теория Эйнштейна, но и квантовая теория тоже. Дело в том, что любой частице, родившейся вне поверхности горизонта соответствует другая частица, рождающаяся внутри. Эти две частицы скоррелированы в том смысле, что наблюдатель мог бы обнаружить «интерференцию вероятности», если бы он был в состоянии общаться с обеими частицами одновременно. Хокинг предположил, что внут-



**РАЗМЕРНОСТЬ ПРОСТРАНСТВА** находится под вопросом из-за того, что пространство-время может иметь сложную топологию. Изображенная поверхность двумерна, но ее топологические связи таковы, что она кажется трехмерным объектом. Возможно, что трехмерное пространство, если рассматривать его на микроскопическом уровне, имеет на самом деле меньшее число измерений, но топологически составлено из переплетений.

ренние частицы сдвигаются до бесконечной плотности и прекращают свое существование. В этот момент нарушается стандартная вероятностная интерпретация квантовой механики: вероятность исчезает в столкновении с бесконечностью.

Альтернативное и столь же правдоподобное предположение заключается в том, что сами рамки квантовой теории поля, которые воздвигаются вокруг теории Эйнштейна, не дают вероятности и информации потеряться в коллапсе. Вполне возможно, что эффект обратной реакции становится настолько большим, что может помешать возникновению бесконечностей. Горизонт скорее математическая конструкция, нежели физическая. Его может и не существовать вовсе в качестве абсолютного одностороннего барьера. Материя, коллапсирующая до образования черной дыры, может

быть в конце концов полностью учтена, частица за частицей. Несомненно, что должны существовать огромные плотности внутри черной дыры и финальный всплеск излучения Хокинга. Однако давление, которому подвергаются ядерные частицы, может превратить их в фотоны и другие безмассовые частицы, которые в состоянии ускользнуть, унеся небольшую оставшуюся энергию и все квантовые корреляции. Эти конечные продукты не должны уносить с собой первоначальную энтропию черной дыры, поскольку вся она уже «похищена» излучением Хокинга.

**ТЕПЕРЬ** я подошел к более трудным разделам квантовой теории гравитации. Когда квантовые эффекты, например рождение частиц или энергия вакуума, оказывают обратное действие на кривизну пространства-времени, сама кривизна становится квантовым объек-



том. Самосогласованность теории требует квантования гравитационного поля. Для длин волн, больших планковской длины, флуктуации квантованного гравитационного поля малы. Их можно аккуратно учесть, рассматривая как малые возмущения на классическом фоне. Возмущения можно проанализировать, как если бы они были независимыми полями. Они вносят свою долю и в энергию вакуума, и в рождение частиц.

При планковских длинах волн и энергиях ситуация невероятно усложняется. Частицы, ассоциируемые со слабым гравитационным полем, называют гравитонами; они не имеют массы, а их спиновый угловой момент равен  $2\hbar$ . Маловероятно, что когда-нибудь непосредственно удастся зарегистрировать отдельный гравитон. Обычное вещество, даже если взять целую галактику, почти абсолютно прозрачно для гравитонов. Только при планковских энергиях они могут заметно взаимодействовать с веществом. Но при таких энергиях гравитоны способны породить планковскую кривизну в геометрии фона. Тогда поле, с которым ассоциируются гравитоны, не может считаться слабым, а при таких условиях плохо определено само понятие «частица».

При больших длинах волн энергия, которую несет гравитон, искажает геометрию фона. При более коротких длинах волн она искажает волны, ассоциируемые с самим гравитоном. Это является следствием нелинейности теории Эйнштейна: когда накладываются два гравитационных поля, результирующее поле не является суммой своих компонент. Все нетривиальные теории поля нелинейны. Для борьбы с нели-

нейностями в некоторых из них можно применять методы последовательных приближений, называемые теорией возмущений (такое название происходит из небесной механики). Суть метода — в уточнении первоначального приближения построением последовательности прогрессивно уменьшающихся поправок. Применение теории возмущений к квантованным полям приводит к появлению бесконечностей, которые можно устранить перенормировкой.

В случае квантовой гравитации теория возмущений не работает, причем по двум причинам. Во-первых, при планковских энергиях последовательные члены ряда теории возмущений (т.е. последовательные поправки) все сравнимы по величине. Оборвать ряд на каком-то конечном числе членов не означает здесь получить хорошее приближение; вместо этого надо просуммировать весь бесконечный ряд. Во-вторых, отдельные члены ряда не могут быть согласованно перенормированы. В каждом приближении появляются новые виды бесконечностей, которые не имеют аналогов в обычной квантовой теории поля. Они возникают, потому что при квантовании гравитационного поля квантуется само пространство-время. В обычной квантовой теории поля пространство-время является фиксированным фоном. В квантовой гравитации этот фон не только влияет на квантовые флуктуации, но и участвует в них.

Узкотехническим ответом на эти трудности явились некоторые попытки просуммировать определенные бесконечные подмножества ряда теории возмущений. Результаты, в особенно-

сти полное сокращение всех бесконечностей, обнадеживают и в то же время вызывают сомнения. К этим результатам надо относиться осторожно, так как при их получении были введены различные приближения, а ряд теории возмущений никогда не был просуммирован полностью. Тем не менее эти результаты использовались для расчета улучшенных оценок эффекта обратного влияния на Большой взрыв.

В более общем случае следует ожидать появления других проблем, решить которые нельзя даже суммированием ряда в целом. Причинная структура квантованного пространства-времени не определена и подвержена флуктуациям. На планковских расстояниях стирается само различие между прошлым и будущим. Можно ожидать, что станут возможными процессы, запрещенные в классической теории Эйнштейна, включая путешествия на планковские расстояния со сверхсветовой скоростью. Это может быть явлением, аналогичным туннелированию в атомных системах, когда электрон просачивается сквозь энергетический барьер, на который он не может «возбратся». Совершенно неизвестно, как рассчитать вероятность таких процессов в квантовой гравитации. Во многих случаях даже неясно, как надо правильно поставить вопросы и какие именно. Не существует экспериментов, которые указали бы нам правильный путь. Поэтому все еще можно позволить себе пуститься в полеты фантазии.

**О**ДНА ИЗ излюбленных фантазий, к которой неоднократно обращаются в литературе по квантовой гравитации, — это флуктуирующая тополо-



ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ, помимо известных трех, могут существовать, если они имеют «замкнутый» характер (компактифицируются). Например, четвертое пространственное измерение может быть свернуто в цилиндр с окружностью порядка  $10^{-32}$  см. На рисунке гипотетическое «замкнутое» измерение «не свернуто» и представляется вертикальной осью на пространственно-временной диаграмме. Поэтому путь частицы имеет циклическую компоненту: каждый раз, когда частица достигает максимального значения координаты в замкнутом измере-

нии, она оказывается снова в точке с начальной координатой в этом измерении. Наблюдаемый путь — это проекция истинного пути на пространство-время макроскопических измерений. Если путь является геодезической, он может выглядеть как путь заряженной частицы, движущейся в электрическом поле. Теория такого типа была предложена в 20-е годы Т. Калуцой и О. Клейном, которые показали, что она может объяснить и гравитацию, и электромагнетизм. В последнее время возрождается интерес к подобным теориям.



гия. Основная идея, предложенная Уилером в 1957 г., выглядит следующим образом. Вакуумные флуктуации гравитационного поля, равно как и флуктуации всех других полей, растут по величине при более коротких длинах волн. Если экстраполировать результаты, полученные в приближении слабого поля, на область планковских размеров, то флуктуации кривизны станут настолько интенсивными, что смогут, как представляется, «прорезать» дыры в пространстве-времени и изменить его топологию. Вакуум, по Уилеру, находится в состоянии нескончаемого беспорядка, когда постоянно рождаются и исчезают «ручки» и более сложные топологические образования. Размеры этих образований порядка планковских, так что беспорядок можно «увидеть» только на планковском уровне. При более грубом разрешении пространство-время кажется гладким.

Однако можно выдвинуть возражение: любое топологическое изменение с необходимостью сопровождается появлением сингулярности в причинной структуре пространства-времени, так что такой подход сталкивается с той же трудностью, которая следует из взглядов Хокинга на распад черных дыр. Однако предположим, что точка зрения Уилера правильна. Вот один из первых вопросов, которые следовало бы тогда задать: каков вклад топологических флуктуаций в энергию вакуума и как они влияют на сопротивление пространства-времени искривлению (хотя бы в грубом приближении)? До сих пор никто убедительно на этот вопрос не ответил в первую очередь из-за того, что не построено сколько-нибудь последовательной картины самого процесса топологического перехода.

Чтобы иметь возможность оценить, какого рода препятствия встают на пути построения такой картины, рассмотрим процесс, представленный на рисунке на с. 57. На рисунке — два представления одного и того же события: «ручка» стала настолько тонкой, что от нее остались два «выроста» на односвязном пространстве. В одном изображении пространство показано плоским, в другом — искривленным.

Теперь рассмотрим обратный процесс: образование «ручки». Если существует конечная вероятность того, что «ручка» все утончается и наконец просто исчезает, то имеется и конечная вероятность ее образования. Здесь возникает новая трудность. Если рассмотреть нашу иллюстрацию в обратном по времени направлении, мы увидим, что она изображает два «выроста», которые спонтанно образовались в квантовом вакууме. Для одного из представлений кажется приемлемой возможность соединения двух «выростов» в «ручку». Для другого это, по-видимому, невероятно. Тем не менее

физическая ситуация в обоих случаях одна и та же. Образование «ручки» в одном из случаев кажется вполне вероятным, так как «выросты» находятся близко друг к другу. Однако «близость» не является внутренним свойством данного расположения в пространстве, как следует из двух рассмотренных случаев. Понятие «близости» требует существования пространства высшей размерности, в которое вложено пространство-время. Более того, пространство высшей размерности должно обладать соответствующими физическими свойствами, чтобы «выросты» могли передать друг другу «ощущение близости». Но тогда пространство-время больше не является Вселенной. Вселенная теперь — это нечто большее. Если оставаться верным представлениям, что свойства пространства-времени должны быть его внутренними характеристиками, а не результатом чего-то, находящегося извне, то согласованной картины топологических переходов, по-видимому, невозможно построить.

Другая трудность при рассмотрении топологических флуктуаций заключается в том, что они могут нарушить макроскопическую размерность пространства. Если «ручки» в состоянии спонтанно образовываться, то они сами могут породить другие «ручки» и так *ad infinitum*. Пространство может развернуться в структуру, которая остается трехмерной на планковском уровне, но будет иметь четыре или больше измерений на больших масштабах. Знакомый пример такого процесса — образование пены, которая целиком построена из двумерных поверхностей, но имеет трехмерную структуру (см. рисунок на с. 59).

Из-за подобных трудностей некоторые физики предположили, что общепринятое описание пространства-времени как гладкого континуума перестает быть правильным на планковском уровне и должно быть заменено чем-либо другим. Из чего складывается это «другое» — никогда не было достаточно ясно. Принимая во внимание успех общепринятого описания на расстояниях, простирающихся более чем на сорок порядков (или даже на 60 порядков, если считать, что такое описание становится неверным только при планковских расстояниях), можно предположить, что оно справедливо на всех масштабах и что топологических переходов просто не существует. Это будет столь же разумным предположением.

**ДАЖЕ ЕСЛИ** топология пространства не меняется, она не обязана быть простой даже на микроскопическом уровне. Возможно, что с самого начала пространство имеет «пенистую» структуру. В этом случае его кажущаяся

размерность может отличаться от истинной размерности — быть больше или меньше ее.

Последняя возможность была предложена в теории, выдвинутой Т. Калуцей в 1921 г. и О. Клейном в 1926 г. В теории Калуцы — Клейна пространство четырехмерно, а пространство-время — пятимерно. Причина, по которой пространство кажется трехмерным, состоит в том, что одно из его измерений цилиндрическое, как во Вселенной, обсуждавшейся выше. Имеется, однако, существенное отличие от прежнего случая: окружность Вселенной в цилиндрическом направлении теперь не миллиарды световых лет, а несколько (возможно, 10 или 100) планковских единиц длины. В результате наблюдатель, который пытается проникнуть в четвертое пространственное измерение, почти мгновенно вернется назад в исходную точку. В действительности даже не имеет смысла говорить о такой попытке, поскольку атомы, из которых создан наблюдатель, гораздо больше, чем окружность цилиндра. Четвертое измерение как таковое просто ненаблюдаемо.

Тем не менее оно может проявить себя другим путем: как свет! Калуца и Клейн показали, что если пятимерное пространство-время описать с помощью точно таких же математических методов, какими описывается четырехмерное пространство-время в теории Эйнштейна, то их теория эквивалентна теории электромагнетизма Максвелла и теории гравитации Эйнштейна. Компоненты электромагнитного поля неявно содержатся в уравнении для кривизны пространства-времени. Таким образом, Калуца и Клейн изобрели первую успешную объединенную теорию поля; в их теории дано геометрическое объяснение электромагнитного излучения.

В некотором смысле теория Калуцы — Клейна была слишком успешна. Хотя она и объединила теории Максвелла и Эйнштейна, она не предсказывала ничего нового и поэтому не могла подвергнуться испытанию наряду с другими теориями. Причина заключалась в том, что Калуца и Клейн вводили ограничения на способы, которыми пространству-времени позволено искривиться в дополнительном измерении. Если устранить эти ограничения, теория должна была предсказывать новые эффекты, но, по-видимому, эти эффекты не соответствовали реальности. Поэтому эта теория рассматривалась просто как красивая диковинка и на долгие годы была положена под сукно.

О ней вспомнили в 60-е годы. Стало ясно, что новые калибровочные теории, популярность которых росла, могут быть переформулированы в стиле теории Калуцы — Клейна, когда пространство обладает не одним, а сразу



несколькими дополнительными микроскопическими измерениями. Создалось впечатление, что вся физика может получить объяснение в терминах геометрии. В результате возник вопрос: что произойдет, если снять ограничения на кривизну в замкнутых измерениях.

Одним из возможных следствий является предсказание флуктуаций кривизны в дополнительных измерениях; эти флуктуации проявляются как массивные частицы. Если длина окружности в дополнительных замкнутых измерениях порядка 10 планковских единиц, то массы этих частиц имеют величину, грубо говоря, порядка одной десятой планковской массы, т.е. около  $10^{-6}$  г. Поскольку для рождения таких тяжелых частиц необходима огромная энергия, они почти никогда и не рождаются. Поэтому для повседневной практики не имеет особого значения, налагаются ограничения на флуктуации кривизны или не налагаются. Проблемы остаются. Главная из них в том, что большие значения кривизны в дополнительных измерениях приводят к очень высокой плотности энергии в классическом вакууме. Наблюдения исключают большие значения энергии вакуума.

Модели Калуцы — Клейна никогда не привлекали пристального внимания и их роль в физике все еще не ясна. Однако в последние два или три года их снова стали тщательно исследовать на этот раз в связи с замечательным обобщением теории Эйнштейна, известным под названием супергравитации. Супергравитация изобретена в 1976 г. Д. Фридманом, П. ван Ньютенхейзем и С. Феррарой и (в улучшенном варианте) С. Дезером и Б. Зумино.

Одно из несоответствий моделей Калуцы — Клейна реальности состоит в том, что они предсказывают существование частиц только с целым спином 0,  $\hbar$  и  $2\hbar$ , причем даже эти частицы должны быть либо безмассовыми, либо сверхтяжелыми. В ней не нашлось места для частиц обычного вещества, большинство из которых имеют спиновый угловой момент  $\frac{1}{2}\hbar$ . Оказалось, что если теория Эйнштейна заменена на супергравитацию, а пространство-время рассматривается по типу модели Калуцы — Клейна, то достигается истинное объединение всех спинов.

В «супермодели» Калуцы — Клейна, которая сейчас наиболее популярна, к размерности пространства-времени добавляется семь дополнительных измерений. Эти измерения имеют топологию семимерной сферы, т.е. пространства, которое само по себе имеет очень интересные свойства. Получающаяся теория необычно сложна и богата по содержанию; она устанавливает существование огромных мультипле-

тов частиц. Массы этих частиц по-прежнему либо равны нулю, либо чрезвычайно велики. Возможно, что «нарушение» симметрии семимерной сферы приведет к появлению у некоторых частиц более реалистических значений масс. Выстояла и большая энергия классического вакуума, но она может сократиться с отрицательной энергией квантового вакуума. Пока еще неизвестно, увенчается ли успехом такая стратегия исправления теории. В действительности понадобится еще много труда, чтобы точно выяснить все следствия теории.

**Е**СЛИ бы Эйнштейн мог увидеть, что произошло с его теорией, он был бы, конечно, удивлен и, я полагаю, обрадован. Он был бы доволен, что после стольких лет сомнений физики, наконец, пришли к его точке зрения, что математически красивые теории заслуживают изучения, даже если в данный мо-

мент еще не ясно, имеют ли они отношение к физической реальности. Он был бы рад тому, что физики осмеливаются надеяться на достижимость объединенных теорий поля. И особенно он был бы удовлетворен, обнаружив, что его старая мечта — объяснить всю физику в терминах геометрии как будто бы сбывается.

Но главным образом он был бы удивлен. Удивлен тому, что квантовая теория все еще стоит в основе всего нетронутой и непоколебимой, обогащая теорию поля и в свою очередь обогащаясь ею. Эйнштейн никогда не верил, что квантовая теория выражает окончательную истину. Сам он так и не смирился с индетерминизмом, который внесла теория квантов, и полагал, что когда-нибудь ее заменит некая нелинейная теория поля. Случилось совершенно обратное. Квантовая теория поглотила и изменила теорию Эйнштейна.

## Издательство МИР предлагает:

### АНОРГАНИКУМ

В 2-х томах, 4-х частях

Перевод с немецкого

Под ред. Л. Кольдича

Книга из серии учебных лабораторных руководств типа «Органикум» (М.: Мир, 1979) и «Аналитикум» (в русском издании «Руководство по аналитической химии». — М.: Мир, 1975), выдержавшая в ГДР 11 изданий. В книге объединены теоретические основы исследования неорганических веществ и лабораторный практикум. Такое объединение позволяет излагать практическую химию с позиций физической химии как основы, необходимой для понимания любых химических процессов. Этим же достигается более тесная взаимосвязь практики с теоретическими положениями.

Для студентов и преподавателей высших и средних химических и химико-технологических учебных заведений.

1984, 75 л. Цена 5 р. 20 к.

за комплект.

### ЦЕНТР ГАЛАКТИКИ

Перевод с английского

Основными структурными элементами Вселенной являются галактики — гигантские звездные системы, нередко имеющие сложное строение, включающее ветви и во многом загадочные ядра, расположенные в центре. Поэтому всестороннее изучение центральных областей нашей собственной Галактики имеет большое научное значение. В коллективной монографии собран богатейший материал исследований центра Галактики, полученный при наблюдениях во всем диапазоне электромагнитных волн посредством мощных инструментов, в том числе вынесенных в космос.

Для астрономов, физиков — наблюдателей, экспериментаторов, теоретиков, а также лиц, планирующих и осуществляющих космические эксперименты; рекомендуется студентам старших курсов соответствующих специальностей.

1984, 28 л. Цена 4 р. 50 к.





# Наука и общество

## Эволюция доктрины ядерного вооружения США

**КАКОВО** основное назначение американского ядерного оружия — использовать его как средство для предотвращения войны с СССР, или же для ведения такой войны? Этот вопрос, всегда занимавший умы американских военных стратегов со времени возникновения гонки ядерных вооружений, приобрел в последнее время исключительную остроту в связи с явной попыткой администрации Рейгана перенести центр тяжести американской политики с первого варианта на второй. Начиная с 60-х годов если не во всех эшелонах военного «истэблишмента», то по крайней мере в официальном Вашингтоне преобладала стратегическая доктрина, заключавшаяся в том, что первейшая цель ядерных сил США — это сдерживать превентивный ядерный удар Советского Союза по США или их союзникам. И действительно, несмотря на наличие нескольких тысяч единиц тактического ядерного оружия, размещенных американцами в Европе, и на неоднократные заверения Соединенными Штатами Америки западноевропейских лидеров в том, что это вооружение частично предназначено для сдерживания вторжения в их страны с Востока с применением обычных, т.е. неядерных вооружений, имеются солидные основания считать, что в течение по крайней мере двух последних десятилетий ни один американский президент не отдал бы приказа об использовании ядерного оружия для какой-либо иной цели, кроме как в порядке нанесения ответного удара на первый ядерный удар со стороны СССР.

Подтверждение этому выводу можно найти в недавнем примечательном заявлении Роберта С. Макнамара, бывшего министра обороны США при президентах Кеннеди и Джонсоне и одного из главных творцов доктрины ядерного устрашения. В журнале "Foreign Affairs" Макнамара пишет, что в первой половине 60-х годов «в ходе долгих частных бесед с президентом Кеннеди, а затем Джонсоном, я рекомендовал им без каких бы то ни было оговорок никогда и ни при каких обстоятельствах не прибегать первыми к использованию ядерного оружия. Я думаю, что они прислушивались к моему совету». И хотя Макнамара, проявляя осторожность, не говорит о том, что все американские президенты будут вести себя подобным же образом, он весьма одобрительно цитирует любопытное заявление другого влиятельного советника президентов — Генри

Киссинджера. «Европейским союзникам США, — заявлял Киссинджер в одной из речей в 1979 г., — не следует упорно требовать от нас больших стратегических гарантий, чем мы можем реально себе позволить, а если мы и сможем дать им повышенные гарантии, то должны быть против их реализации, ибо если мы их реализуем, то рискуем уничтожить цивилизацию».

Другая альтернативная точка зрения, которой отдается предпочтение в настоящее время, наиболее четко изложена министром обороны США Каспаром Уайнбергером, который делает упор на применимость ядерного оружия для ведения различного вида «ограниченных» или «затяжных» ядерных войн, из чего вытекает нежелательность отказа от применения ядерного оружия первыми. И хотя Уайнбергер и другие представители администрации с приходом Рейгана несколько приглушили тон своих высказываний по этому вопросу, свидетельства планируемой ими переориентации военных приоритетов страны четко прослеживаются в увеличении числа все более обширных и разнообразных программ в области ядерных вооружений, включенных администрацией в прошлые и перспективные военные бюджеты.

Согласно результатам исследования, проведенного специалистами по бюджету в Центре информации в области обороны, расходы на ядерное вооружение за три года пребывания у власти президента Рейгана увеличились более чем вдвое. В предстоящие шесть лет, сообщают авторы исследования, расходы на приготовление к ядерной войне будут стремительно расти и составят примерно 450 млрд. долл., или 22% всех ассигнований на военные цели на указанный период. В докладе говорится, что к 1992 г. в США будет произведено примерно 17 тыс. единиц нового ядерного оружия. Это означает, что в среднем на протяжении предстоящего десятилетия ежедневно в США будет изготавливаться пять единиц ядерного вооружения. Если учесть, что за это время примерно 11 тыс. устаревших единиц будет снято с вооружения, то «запасы ядерного оружия США увеличатся примерно на 6 тыс. бомб и боеголовок».

Администрация планирует выделить из военного бюджета на ближайшие десять лет ассигнований на разработку 15 новых типов ядерных боеголовок, авиационных бомб и артиллерийских снарядов. Девять из них уже находятся в стадии создания, а разработка других начнется в ближайшее время. Не вдаваясь в подробности, специалисты из Центра информации в

области обороны отмечают, что «системы доставки, к которым будут приспособлены эти новые типы вооружений, будут более совершенными, более точными и более разрушительными, чем те, которые им предстоит заменить». Говоря точнее, «многие из этих типов вооружений и обоснования необходимости их создания вписываются в стратегию ведения ядерной войны».

Поэтому не удивительно, что в военной области в США делается все более серьезная ставка на ядерное вооружение, и это находит свое отражение в постоянном расширении масштабов использования ядерного компонента в боевых учениях и других мероприятиях, направленных на подготовку к войне. Согласно некоторым сообщениям, адмирал Поуэлл Картер, учитывая эту тенденцию, во время выступления в сенатской Комиссии по делам вооруженных сил сказал: «Мы полностью перестроили систему военной подготовки с целью научить наших военных мыслить ядерными категориями. Мы стремимся к тому, чтобы все наши военные учения проводились с имитацией условий применения ядерного оружия».

Именно такие высказывания, отражающие образ мыслей многих нынешних военных и политиков, очевидно, начинают вызывать тревогу у бывших высокопоставленных официальных лиц, таких, как Макнамара. «Проведя семь лет на посту министра обороны и занимаясь проблемами, порожденными первой цепной ядерной реакцией 40 лет назад, — пишет он, — я не думаю, что мы сможем избежать серьезного и неприемлемого риска ядерной войны, пока не признаем — и пока не начнем основывать на этом признании все наши военные планы, военные бюджеты, развертывание вооружений и переговоры относительно вооружений, — что ядерное оружие не служит никакой военной цели вообще. Оно абсолютно бесполезно, за исключением возможности использовать как средство, сдерживающее его применение противником».



# Смена жертвы в простой экосистеме

*На острове Ньюфаундленд, где число видов млекопитающих невелико, рыси охотились на американских зайцев-беляков до тех пор, пока популяция зайцев не «разрушилась», после чего рыси стали нападать на телят оленя-карибу.*

*Такое циклическое переключение с одной добычи на другую продолжается и сейчас*

АРТУР Т. БЕРГРЭД

**Н**А БОЛЬШЕЙ части нашей планеты экологические цепи переноса вещества и энергии от фотосинтезирующих организмов к растительноядным и далее к животным-хищникам устроены довольно сложно. На всяком участке суши, как правило, сосуществует множество хищных видов и видов, являющихся их потенциальной добычей, причем каждому виду хищников обычно соответствует несколько видов жертв, и наоборот, каждому виду жертв — несколько видов-хищников. Однако в некоторых районах вследствие особенностей географических условий сформировались относительно простые экосистемы, включающие в себя лишь несколько видов. Они могут служить своего рода природными лабораториями для изучения принципов, управляющих размерами популяций животных. Одна из таких экосистем существует на острове Ньюфаундленд, где обитает всего 14 видов млекопитающих.

Видовой состав фауны Ньюфаундленда не только беден, но и не сбалансирован: 9 из 14 видов являются хищными. На территории, где так много хищников и так мало травоядных животных, составляющих их пищу, любые изменения, происходящие с популяцией вида-жертвы, могут привести к серьезным перестройкам всей цепи питания: компенсаторные механизмы, действующие в более сложных экосистемах, в данном случае отсутствуют. Подобного рода драматическая ситуация сложилась на острове Ньюфаундленд в начале XX в., когда поголовье оленей-карибу и численность полярных зайцев, двух основных видов-жертв на этом острове, начали сокращаться. В результате длительных и кропотливых исследований было установлено, что в обоих случаях это произошло вследствие быстрого роста численности рысей.

На протяжении столетий рыси были

редкими для Ньюфаундленда животными, однако в 1860-х годах на остров был интродуцирован американский заяц-беляк и популяция рысей, для которых этот вид стал источником питания, быстро увеличилась. Уже в самом начале XX в. популяция зайца-беляка достигла экологических пределов своего существования и «разрушилась», т.е. ее численность быстро сократилась, и рыси лишились своей основной добычи. Однако они легко перестроились и начали нападать на телят оленя-карибу и на другой вид зайцев — полярных. Когда популяция зайца-беляка достаточно увеличила свою численность, рыси снова переключились на этот вид добычи.

Такой цикл повторялся неоднократно: за последние десятилетия рысь, американский заяц-беляк и олень-карибу оказались взаимосвязаны, составив экологический треугольник, в котором численности популяций двух видов-жертв периодически возрастают и уменьшаются. При этом рысь ограничивает и количество полярных зайцев, которые некогда были обильны на Ньюфаундленде, а теперь встречаются лишь изредка. Интродукция всего одного вида в простую экосистему острова привела к далеко идущим и весьма запутанным последствиям, отразившимся на равновесии всей системы.

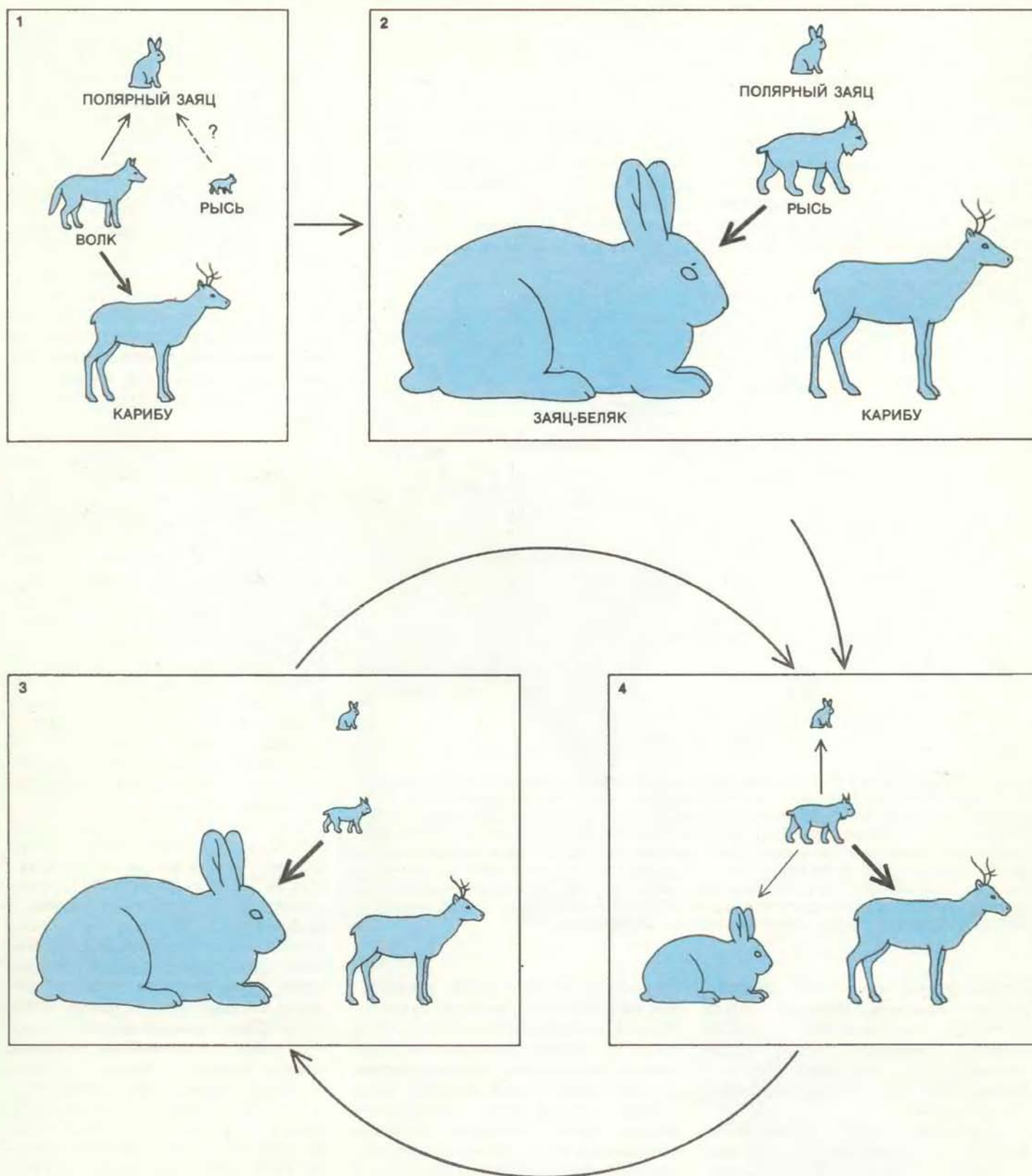
**ЭКОСИСТЕМА**, существующая на Ньюфаундленде, совершенно не похожа на экосистемы соседних областей материковой части Канады. Такая обособленность сложилась в результате действия нескольких факторов. Имеются доказательства того, что во время висконсинского оледенения (примерно 18 тыс. лет назад) лед не захватил всей территории острова. Не исключено, что часть его сыграла роль рефугии, т.е. области, где местные животные могли пережить создававшиеся неблагоприятные условия. Благодаря

этому несколько сохранившихся здесь видов продолжали эволюционировать независимо от млекопитающих континента. В 9 из 14 туземных видов млекопитающих Ньюфаундленда отличаются от своих материковых сородичей настолько, что считаются особыми подвидами. Это свидетельствует о генетической изоляции, длившейся не одно тысячелетие.

В последнем времени некоторые виды, главным образом хищники, могли попасть на остров с плавучими льдами или по оставшимся ледяным перешейкам. Однако в целом море было серьезным барьером и затруднило свободный обмен фауной между островом и континентальным побережьем Канады, а отсюда и существующие различия. На полуострове Лабрадор, отделенном от Ньюфаундленда лишь проливом Белл-Айл, ширина которого местами не превышает 17,6 км, встречаются 34 вида млекопитающих; на острове Кейп-Бретон, расположенном в 112 км к юго-западу от Ньюфаундленда и имеющем связь с материком, — 38 видов.

Море не только действовало как барьер, препятствующий увеличению общего числа видов на Ньюфаундленде, но и служило, так сказать, фильтром, пропуская на остров одних млекопитающих и преграждая доступ другим, причем хищным видам было, по видимому, легче колонизовать новую территорию, чем видам, являвшимся их добычей. Когда фауну острова стали исследовать, здесь было обнаружено 7 видов четвероногих хищников: волк (*Canis lupus*), рыжая лисица (*Vulpes vulpes*), рысь (*Lynx lynx*), североамериканская выдра (*Lutra canadensis*), медведь-барibal (*Ursus americanus*), горноста́й (*Mustela erminea*) и американская куница (*Martes americana*). Травоядные, составляющие их пищу, до появления зайца-беляка были представлены 5 видами — американским

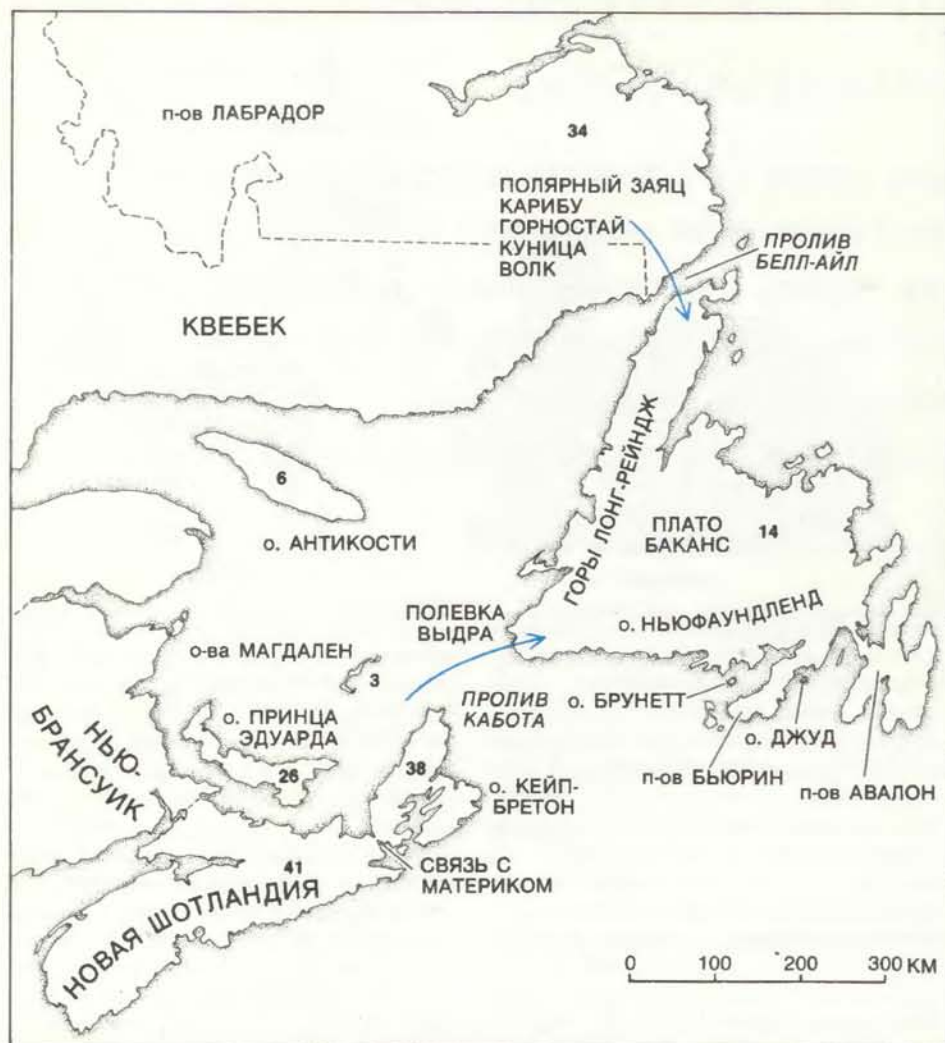




**ЦИКЛ СМЕНЫ ЖЕРТВЫ** в экосистеме острова Ньюфаундленд. В течение тысячелетий вплоть до середины XIX в. оленей-карибу уничтожали в основном волки. Рысей на острове было в те времена мало (1). Заяц-беляк был завезен на Ньюфаундленд в 1864 г. Он быстро размножился, и около 1900 г. его численность достигла максимума (2). Популяция рысей, которые питались зайцами-беляками, также быстро увеличилась. Волк на острове около 1911 г. исчез. Приблизительно в 1915 г. популяция зайца-беляка «разрушилась» и рысь переключилась на питание детенышами карибу и полярным зайцем, в результате чего численность обоих

видов-жертв значительно сократилась (3). В тот же период в популяции зайца-беляка установился 10-летний внутривидовой цикл изменения численности. Когда она приближается к своему максимуму, рысь опять переходит на этот вид добычи, и популяция карибу вновь увеличивается (4). Переключение рыси с одного вида жертвы на другой — с карибу на зайца-беляка и обратно — происходит циклически с периодом 10 лет уже довольно долго. Полярные зайцы на Ньюфаундленде стали редки — сейчас их можно встретить главным образом в высокогорье, причем численность их популяции флуктуирует меньше, чем у других видов.





МЕСТНАЯ ФАУНА Ньюфаундленда насчитывает всего 14 видов млекопитающих. В соседних районах материковой Канады видовой состав гораздо богаче. Пять видов, возможно, попали на Ньюфаундленд с полуострова Лабрадор через плавающие льды или ледяные перешейки; еще 2 вида могли переселиться из приморских провинций Канады. Море играло роль барьера, затрудняя связь материковой и островной фауны, и в то же время фильтра, одним животным давая возможность достичь Ньюфаундленда и не пропуская других. В результате экологическая пирамида чисел оказалась здесь обращенной: 9 из 14 видов являются хищниками и только 5 — травоядными. Такая экосистема неустойчива.

бобром (*Castor canadensis*), пенсильванской полевкой (*Microtus pennsylvanicus*), оленем-карибу (*Rangifer tarandus*), полярным зайцем (*Lepus arcticus*) и ондатрой (*Ondatra zibethica*). Кроме того, здесь встречались 2 вида летучих мышей.

Анализируя состав фауны Ньюфаундленда, можно заметить, что привычная пирамида чисел оказалась перевернутой. Поскольку биологические системы, как и любые другие системы переноса энергии, не могут функционировать со стопроцентной эффективностью, общая биомасса хищников должна быть намного меньше общей биомассы их жертв. Соответственно число видов хищников в общем случае меньше, чем число видов, служащих им добычей. На Ньюфаундленде имеет место обратная ситуация, поэтому его простая по составу фауна нестабильна.

Мои наблюдения, которые я сделал

на острове Ньюфаундленд, показывают, насколько чувствительна такая система к внешним воздействиям. С 1956 по 1967 г. я работал научным сотрудником в Ньюфаундлендском отделении службы охраны дикой природы. Моей главной задачей было установление причин резкого падения поголовья оленей-карибу. То, что мне удалось выяснить, касается не только карибу, но и других видов.

В 1900 г., когда внутренняя часть Ньюфаундленда оставалась почти необитаемой (здесь жило лишь небольшое племя индейцев-микмаков), стада карибу были довольно велики. Работавшие здесь в прошлом натуралисты А. Дагмор и Дж. Миллейс считали, что в конце XIX в. численность этих парнокопытных на острове составляла от 150 до 200 тыс. голов. Однако их оценки не более чем догадки, основанные на разрозненных наблюдениях. Ни

Дагмор, ни Миллейс не делали попыток систематически подсчитывать оленьи стада или анализировать выборки животных. Исходя из того, что рассказывали старые охотники, а также из сведений о добыче оленей и о размерах доступных для них пастбищ, я сделал вывод, что популяция карибу на Ньюфаундленде достигала в 1900 г. 40 тыс. голов, т.е. была весьма значительна для острова площадью 100 тыс. км<sup>2</sup>.

Спустя всего 25 лет олень-карибу на Ньюфаундленде почти полностью исчез. Около 1925 г., по оценкам Дагмора, на острове оставалось не более 200 животных. Такое удивительное падение численности произошло несмотря на то, что волков, тысячами бывших главными врагами оленей, примерно к 1911 г. на острове полностью истребили.

В конце XIX — начале XX вв. местная популяция полярного зайца также значительно сократилась, хотя судить об этом труднее, так как ни исходная численность, ни степень ее снижения не оценивались так точно, как в случае оленя-карибу. О том, сколько полярных зайцев обитало на Ньюфаундленде до того, как люди заселили этот остров, можно только гадать, однако многие наблюдатели сходятся на том, что территория, которую в прошлом занимал этот вид, простиралась от Северного полуострова до плато Баканс и южных отрогов гор Лонг-Рейндж, а оттуда по южному побережью к востоку до полуостровов Бьюрин и Авалон, охватывая, таким образом, значительную часть острова.

Наиболее ярко о сокращении популяции полярного зайца свидетельствует сужение области его распространения начиная с 1900 г. Натуралист О. Бэнг, описавший 7 из 14 местных Ньюфаундлендских видов, отмечал в 1913 г.: «Полярный заяц на Ньюфаундленде сейчас очень редок и распространен фрагментарно. Он встречается только на вершинах высоких гор». К началу 1950-х годов область распространения полярного зайца ограничивалась верхними поясами южных и северных отрогов гор Лонг-Рейндж и плато Баканс, откуда она продолжалась по южному побережью до залива Эспуар. Однако даже на такой небольшой площади животные были редки. В последние десятилетия общая численность полярного зайца на Ньюфаундленде, судя по всему, составляла менее тысячи особей.

КОГДА я прибыл на остров, данных, говоривших о снижении численности карибу, имелось гораздо больше, чем аналогичных данных о полярном зайце. Первое время в исследованиях вымирания карибу основное внимание было сосредоточено на факторах, определяющих смертность среди молодняка. У многих видов млекопитаю-



ших самые молодые возрастные классы являются наиболее уязвимым звеном в механизме выживания всей популяции. И действительно, стада карibu сокращались в значительной мере потому, что гибли все больше телят.

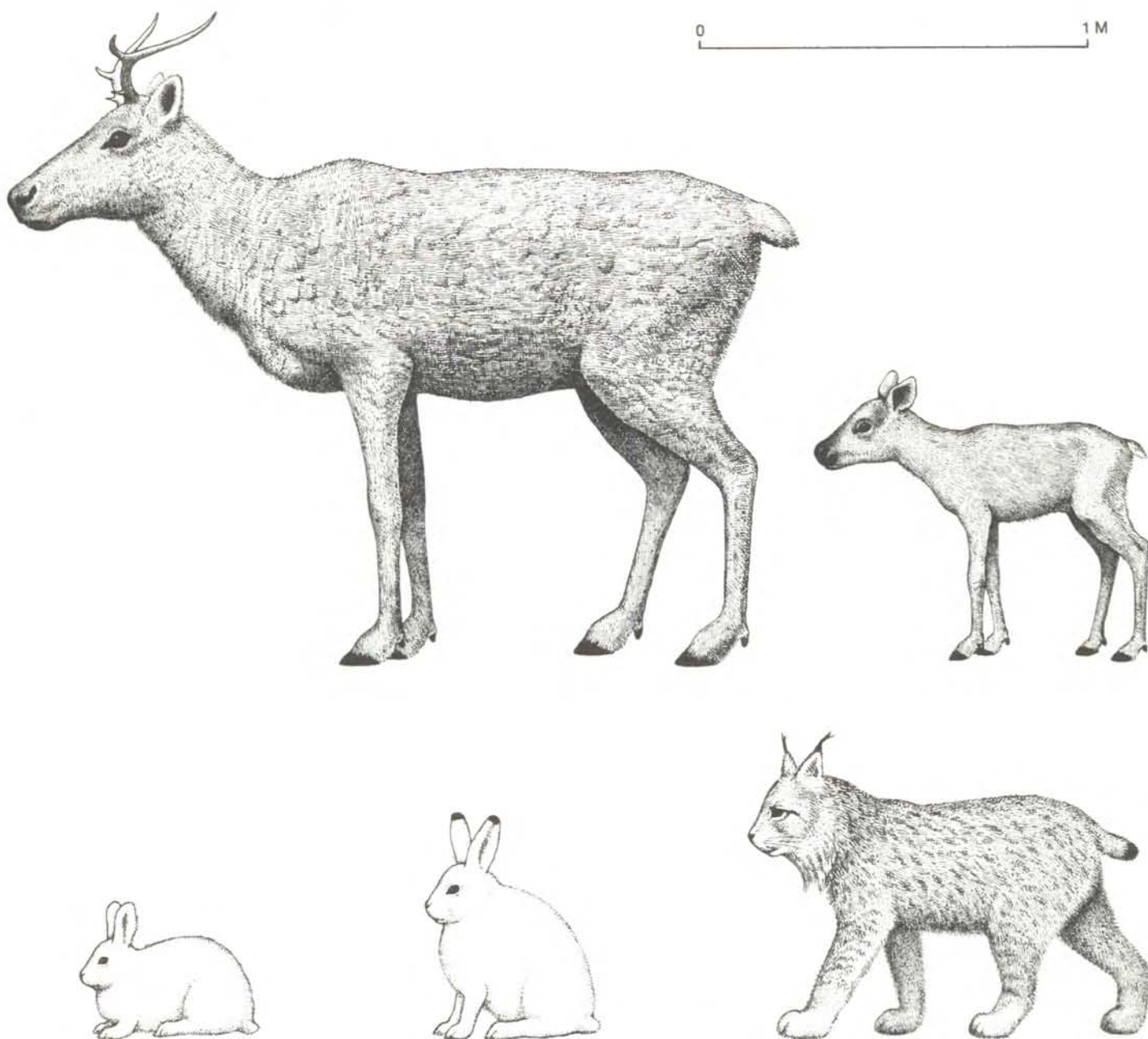
Взрослые самцы оленя-карибу большую часть года пасутся отдельно от самок. В середине октября самцы и самки встречаются на период гона, который длится приблизительно 10 дней. За это время оплодотворяется примерно 80% самок. Из тех, что остались неопло-

дотворенными, некоторые беременеют в короткий дополнительный период половой восприимчивости примерно десятью днями позже.

Беременность у карibu длится в среднем 229 дней. В связи с тем что все самки спариваются с самцами в одно и то же время, почти все детеныши появляются на свет также почти одновременно — в течение двух недель начиная примерно с 24 мая. Самки телятся, собираясь большими группами в особых местах и, как правило, каждый год при-

ходят для отела в одно и то же место. Большинство таких мест на Ньюфаундленде представляет собой открытые болотистые участки, окруженные густым кустарником — скрабом. Когда сезон отела кончается, стада рассеиваются по этим зарослям, спасаясь от гнуса.

Каждую весну с 1957 по 1964 г. в местах отела исследователи находили множество погибших детенышей. (Обнаружить их было нетрудно, поскольку мать несколько дней держится вбли-



ЧЕТЫРЕ ВИДА, УЧАСТВУЮЩИЕ В ЦИКЛЕ СМЕНЫ ЖЕРТВЫ на Ньюфаундленде. Потомство у оленя-карибу *Rangifer tarandus* появляется в течение двух недель в мае — июне. Отел происходит обычно в постоянных местах; в 1950-х и 1960-х годах на этих участках было обнаружено множество оленят, погибших вследствие нападения рысей. Главными средствами защиты от хищников у полярного зайца *Lepus arcticus* (внизу посредине) и у зайца-беляка *Lepus americanus*

(внизу слева) являются быстрая реакция и способность быстро бегать. Заяц-беляк обитает в лесах бореального типа, где в зимнее время снежный покров рыхлый. Полярный заяц живет на открытых пространствах тундры — там снег плотный, слежавшийся. Оба вида изображены на рисунке в своей зимней окраске. Рысь *Lynx lynx* подстерегает добычу в подлеске и, нападая, хватает свою жертву за шею.





**ПРИЧИНЫ НАРЫВОВ** на шее погибших детенышей карибу выяснились в 1964 г. У одного из найденных телят четыре колотые ранки еще не успели загноиться. Расположение четырех крупных клыков у рыси в точности совпадает с расположением ран на шее олененка. Бактериологический посев слюны рыси показал, что в ней присутствует патогенная бактерия, она же была выделена из нарывов. Стало очевидно, что на телят карибу нападали рыси.

зи от мертвого олененка.) У многих из мертвых телят на шее были нарывы, образовавшиеся в результате инфекции повсеместно распространенной патогенной бактерией *Pasteurella multocida* (мукоидный тип А). Смерть наступала вследствие септицемии, т.е. заражения крови, вызванного этой инфекцией.

В связи с тем что самки карибу производят потомство на свет синхронно и процент стельных самок из года в год практически не меняется, нетрудно подсчитать, сколькими особями может ежегодно пополняться стадо, если этому не мешают никакие внешние факторы. Получалось, что смертность среди детенышей карибу была весьма велика, а телята, останки которых были найдены, составляли лишь небольшую часть от общего числа погибших. С 1958 по 1967 г. через две недели после рождения исчезало в среднем 27% телят. Путем подсчета самок с телятами и без телят было определено, что к октябрю около 70% отелившихся самок лишались своих детенышей, но после этого смертность резко падала и большинство телят, доживших до октября, успешно зимовали. Другими словами, размер стада карибу определяется смертностью детенышей в первые 4 месяца их жизни.

Помимо того что телята во множестве гибли, притом преимущественно весной, были и другие загадки. Во-первых, отношение самцов и самок, среди новорожденных телят равное

52:48, в течение нескольких месяцев кардинальным образом менялось: осенью на 62 самки приходилось 38 самцов. Во-вторых, общая смертность была максимальна в тех местах отела, которые расположены на небольших высотах. Последнее обстоятельство казалось довольно странным, поскольку на таких участках неблагоприятное воздействие холодного ветра выражено меньше всего. В альпийском поясе, где климат значительно более суровый, смертность была ниже. Самый же непонятный факт обнаружился при ежегодных подсчетах выживания: его кривая имела циклический характер, а именно доля выживших телят возрастала в 1958 и 1959 гг., а затем с 1960 по 1963 г. постепенно понижалась.

Первый шаг к решению этих загадок исследователи сделали, когда удалось выяснить причину упомянутых выше нарывов. Весной 1964 г. был найден мертвый теленок с 4 колотыми ранками на шее, которые еще не успели загноиться. Напрашивалось вполне вероятное предположение: у других погибших телят первоначально имелись такие же ранки, но из-за возникших на их месте нарывов они не были видны.

**В**ЫЯВИТЬ причину появления проколов на шее телят-карибу было трудно. На Ньюфаундленде не так много хищников, и из них только рысь имеет клыки такого размера и расположения, что они могут оставить четыре

ранки на равном расстоянии одна от другой. Когда для проверки череп рыси приложили к ранкам на шее мертвого теленка, эта догадка полностью подтвердилась.

Бактериологический посев слюны из ротовой полости рыси показал, что в ней присутствуют *Pasteurella multocida*. Тогда трех детенышей карибу поместили в один загон с рысью. Рысь нападала на телят, хватая их зубами за шею. Экспериментаторы не дали хищнику расправиться с добычей и забрали телят из загона для дальнейших наблюдений. На шее у животных быстро развились нарывы, вызванные заражением *Pasteurella multocida*, и телята умерли один за другим — через 4, 5 и 15 дней после укуса.

Описанные исследования позволили предполагать, что численность оленьих стад снижалась из-за рысей. Одних телят они поедали, а тех, которым удавалось спастись от вцепившегося хищника, через несколько дней ожидала гибель от септицемии — именно их останки и находили на острове. В зарослях скраба вокруг мест отела также были обнаружены останки телят.

Как и у других хищников из семейства кошачьих, обычная повадка рыси — схватить свою жертву за шею и утащить ее в густые заросли. По-видимому, рысь затаивается в подлеске вблизи места отела оленей, поджидая, пока какой-нибудь неосторожный олененок не подойдет на достаточно близкое расстояние. Тогда хищник выскакивает из укрытия, прокусывает добыче шею и тащит ее в кустарник. Телята-самцы больше страдают от таких нападений, поскольку по сравнению с самками более склонны к исследовательскому поведению, часто удаляются от своих матерей и подходят к зарослям скраба. Телята-самки стремятся держаться ближе к матери. Взрослая самка карибу достигает в холке примерно 1,2 м и весит около 100 кг — при таких размерах отбросить нападающую рысь, весящую около 10 кг, не так уж трудно.

**Г**ИПОТЕЗУ о том, что именно рыси — причина снижения численности карибу, надо было проверить. Для этого, во-первых, вокруг двух участков отела установили специальные капканы, благодаря чему в этой зоне не стало рысей. В результате увеличилось число выживших телят, которые пополнили стадо (данные статистически достоверны). Во-вторых, карибу были вывезены на несколько мелких островов, расположенных вдоль побережья Ньюфаундленда, на которых рыси отсутствовали. Для контроля оленей завезли также на материк, в те районы, где местные карибу исчезли, но рыси еще встречались. Эксперимент показал, что на островах численность карибу возрастала со скоростью,



близкой к максимально возможной для этого вида. На материке, где обитали рыси, скорость увеличения поголовья составила половину максимальной. За тот же период размеры основного ньюфаундлендского стада изменились очень незначительно. В 1961 г. оно насчитывало 6100 голов, а в 1966 г. — 6200.

Численность карибу после интродукции быстро увеличивалась, в частности, на острове Джуд. Исследования на этом участке вел сотрудник Ньюфаундлендского отделения службы охраны дикой природы Ю. Мерсер, который руководил и всем экспериментом по интродукции карибу в целом. Двум рысам прикрепили радиопередатчики, после чего хищников выпустили на остров, чтобы пронаблюдать за их воздействием на стадо оленей в условиях местности, где хищников до этого не было. В первый же сезон от рысей погибло 65% молодняка — весьма показательная цифра, если учесть, что в год, предшествовавший эксперименту, на острове выжили все телята.

В ходе исследований на острове Джуд также выяснилось, почему самки карибу остаются в течение нескольких дней у тела погибшего теленка. Линии перемещения рысей, вычерченные по радиосигналам, показали, что, после того как самка оленя отгонит рысь, напавшую на ее детеныша, хищник часто прячется в растущем поблизости кустарнике, ожидая, пока мать не покинет умершего олененка. Когда рыси были вывезены с острова, процент выживания телят карибу немедленно вернулся к прежнему высокому уровню.

Эксперимент на острове Джуд убедил даже скептиков в том, что рыси, о которых и речи не было, когда говорили о хищниках, серьезно влияющих на поголовье карибу в материковой Канаде, представляют собой основной фактор, определяющий размеры популяции этого вида на Ньюфаундленде. После того как волк, бывший прежде главным «врагом» карибу, здесь исчез, рысь заняла его место в простой экосистеме острова.

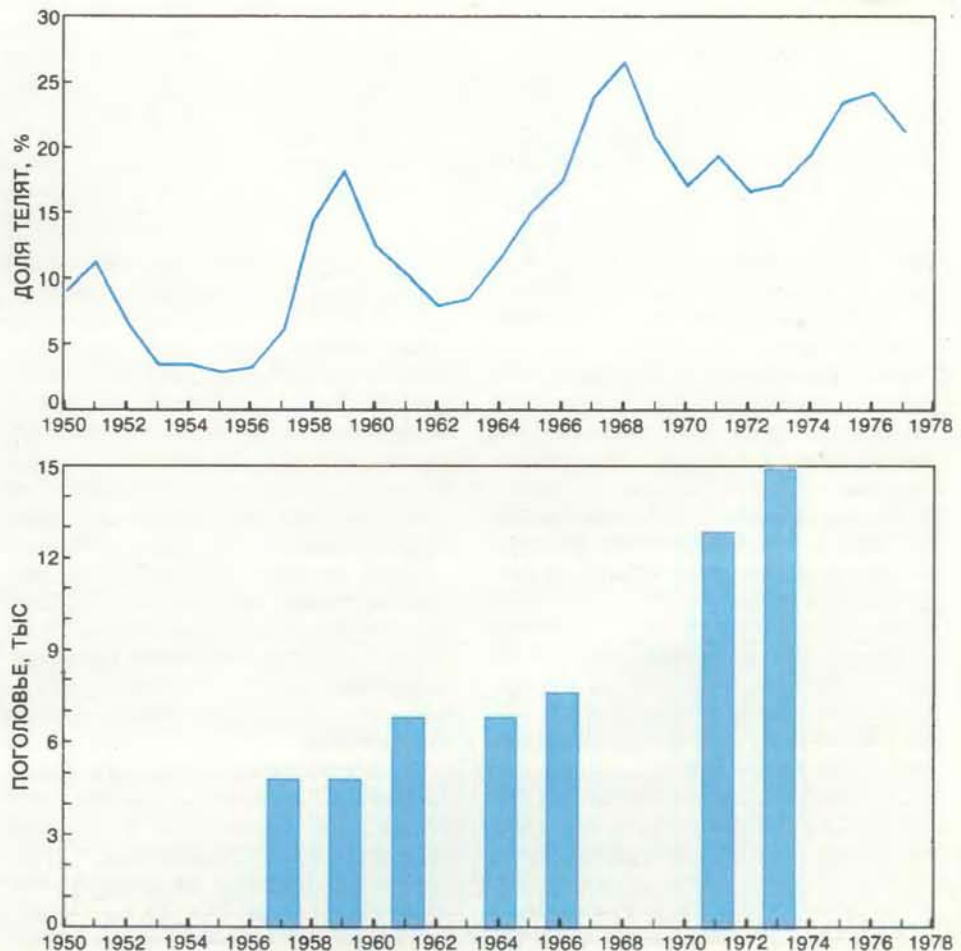
**Е**СЛИ рыси регулировали численность популяции карибу, было не исключено, что от них зависело и количество полярных зайцев. В пользу такого предположения говорило то, что в тех двух местах отела в горах, где в стадах оленей наблюдалось максимальное выживание потомства, встречались, хотя и спорадически, представители этого ставшего редким для острова вида. Однако возможен был и другой вариант: популяция местных зайцев сократилась в результате конкуренции за пищу со стороны интродуцированного зайца-беляка. Можно было думать также, что в связи с какими-то изменениями во флоре острова исто-

щились привычные для полярного зайца кормовые ресурсы.

Чтобы определить, ограничивается ли численность полярных зайцев количеством доступного корма или же существуют другие причины, двух самцов и двух самок этого вида выпустили на остров Брунетт, расположенный в заливе Форчун примерно в 16 км к югу от Ньюфаундленда. На этом острове не водилось ни хищных млекопитающих, ни зайцев-беляков. Кроме того, как и на большей части территории Ньюфаундленда, условия среды на острове Брунетт были благоприятны для полярных зайцев. Его поверхность относится в основном к субальпийской и альпийской зонам растительности, а вершины холмов покрыты мхом и вересковыми кустарниками, как в тундре. Через 6 репродуктивных сезонов на острове насчитывалось 1000 полярных зайцев. Как и карибу, этот вид в отсутствие рысей размножался со скоростью, близкой к максимальной.

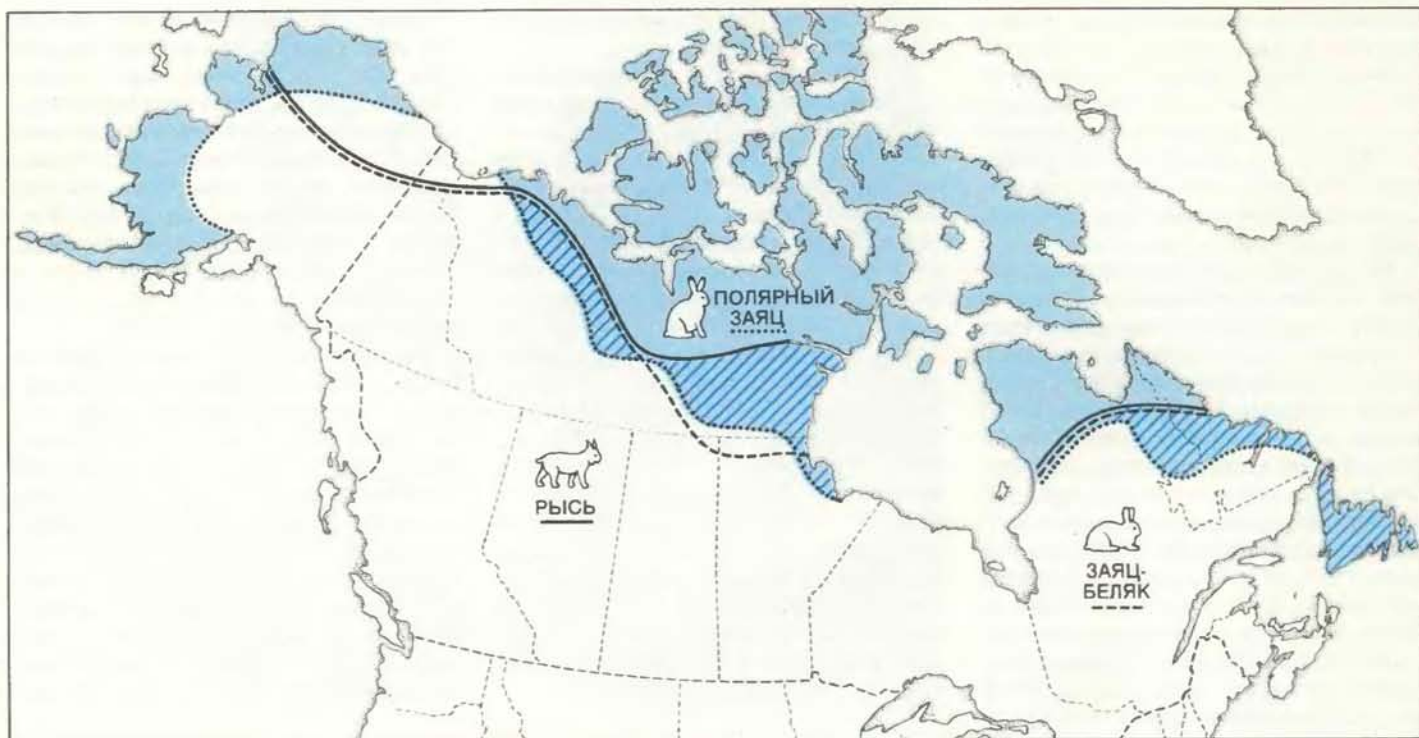
Опыт, поставленный на острове Брунетт, показал, что не пища лимитирует рост популяции полярного зайца. Группу особей с этого острова использовали для проверки гипотезы о конкуренции с зайцем-беляком: их интродуцировали на острова, где обитали зайцы-беляки, но не было рысей. В качестве контроля в этом эксперименте другие партии животных выпускали на Ньюфаундленде там, где встречаются как зайцы-беляки, так и рыси.

На островах, где водились зайцы-беляки, но отсутствовали рыси, полярные зайцы выжили и их популяции увеличились, хотя и не в такой степени, как на острове Брунетт. В тех районах Ньюфаундленда, где имелись рыси, все попытки интродукции оказались безуспешными. Стало ясно, что местный ньюфаундлендский заяц вполне может выдержать конкуренцию с зайцем-беляком, но не в силах противостоять рыси, по крайней мере на низменностях Ньюфаундленда. Таким образом, бы-



**ВЫЖИВАНИЕ** молодняка карибу определяло в 1950—1960-е годы размеры основного оленьего стада на Ньюфаундленде. *Вверху:* кривая отражает изменение доли телят в стаде карибу в октябре (эта доля соответствует числу телят, выживших весной и летом). Пики кривой, приходящиеся на 1951, 1959, 1968 и 1976 годы, совпадают с пиками численности зайца-беляка. Когда популяция зайца-беляка «разрушается», телята выживает меньше. *Внизу:* гистограмма отражает общее число оленей во внутренних районах Ньюфаундленда (для тех лет, по которым имеются данные). Когда цикл смены жертвы был выражен сильнее, размеры стада определялись выживанием молодняка. В связи со снижением численности рысей и интродукцией на остров новых видов добычи, интенсивность циклических колебаний численности карибу в последнее время уменьшилась.





АРЕАЛ ПОЛЯРНОГО ЗАЙЦА в Канаде (выделен цветом) частично определяется отношениями в системе хищник—жертва. Его южная граница проходит по северным пределам распространения рыси, так что их ареалы перекрываются мало (эти участки заштрихованы). В противоположность этому ареалы рыси и зайца-беляка на значительной площади совпадают. И рысь, и заяц-беляк отличаются не-

большой нагрузкой на лапы при беге. Такое свойство — приспособление для передвижения по рыхлому снегу в boreальных лесах. У полярного зайца нагрузка на лапы больше, этот вид приспособлен к плотному тундровому снегу. В тайге полярный заяц проваливается в снег и становится легкой добычей для рыси. Если бы не рыси, граница ареала полярного зайца могла бы проходить гораздо южнее.

до подтверждено, что рысь ограничивает на Ньюфаундленде численность не только оленей-карибу, но и местного вида зайца.

Из результатов полевых экспериментов и из накопившихся за многие годы сообщений о состоянии фауны острова начали проступать контуры необычной динамической системы, объединяющей рысь, карибу и два вида зайцев. До того как Ньюфаундленд заселили белые люди, на продуваемых ветром пустошах и в горных районах острова в течение тысячелетий сосуществовали полярные зайцы, волки и олени-карибу. В те времена рысь встречалась так редко, что специалисты и сейчас спорят, является ли этот хищник местным или адвентивным видом.

Без сомнения, численности популяций волков, карибу, рысей и полярных зайцев не оставались постоянными, однако стабилизирующие экологические механизмы удерживали колебания в определенных рамках, не давая ни одному из видов полностью исчезнуть. В 1864 г. в целях оказания продовольственной помощи рыбакам отдаленных поселков западного побережья на Ньюфаундленд был завезен заяц-беляк. Интродукция нового вида привела к нарушению тонких механизмов популяционной динамики, управлявших численностью местных животных.

Когда какой-либо вид, подобно зайцу-беляку, попадает в новые усло-

вия обитания, он часто обнаруживает тенденцию к быстрому размножению. Спустя несколько десятилетий интродуцированная популяция достигает своих максимальных размеров. Такой пик численности у зайца-беляка отмечался около 1890 г. на всей территории Ньюфаундленда. Плотность расселения этих животных была настолько велика, что жителям удавалось за один сезон отлавливать по тысяче зайцев.

После подъема, следующего за интродукцией вида, как правило, наступает спад, поскольку вид достигает естественных пределов заполнения своей экологической ниши. Примерно к 1915 г. популяция зайца-беляка начала быстро сокращаться.

На большей части территории Канады основным врагом зайца-беляка является рысь. В конце XIX в. быстрый рост популяции зайца-беляка на Ньюфаундленде привел к увеличению численности рыси, причем кривая изменения численности рыси несколько отставала от аналогичной кривой для беляка. Такая картина типична для областей, где заяц-беляк и рысь составляют неразрывную пару хищник—жертва. В этом случае кривые, отражающие изменения численности их популяций, имеют правильную синусоидальную форму. Популяция жертвы растет до тех пор, пока это позволяют имеющиеся кормовые ресурсы или внутривидовые биологические механизмы. После

этого скорость размножения снижается, и популяция сокращается. С уменьшением количества жертв скорость размножения хищника также падает, что приводит к сокращению его популяции. При отсутствии внешних воздействий полный цикл колебаний численности занимает 9—11 лет.

В 1900-е годы рысь распространилась с западного побережья Ньюфаундленда по всей его территории. Говорят, что рыси появлялись даже в черте Сент-Джонса, главного города полуострова Авалон, находящегося на юго-востоке острова.

О скорости роста численности этих хищников можно судить хотя бы по тому факту, что в 1904 г. в законодательном собрании Ньюфаундленда был предложен билль об их истреблении. Однако на деле размер популяции рысей был взят под контроль не человеком, а экологическими факторами.

**Ч**ИСЛЕННОСТЬ зайцев-беляков держалась на максимальном уровне с 1896 по 1915 г. (взаимозависимые колебания численности беляка и рыси в то время еще не установились). Когда последовал ее резкий спад, рыси лишились основного источника питания. Однако эти хищники могут питаться как свежей добычей, так и падалью. Притом диапазон их потенциальных жертв довольно широк, а способность быстро перестраиваться с одного вида



пищи на другой просто удивительна. Когда еды становится совсем мало, взрослые рыси перестают размножаться, но голодают они лишь в исключительных случаях, так как легко переключаются на какой-либо другой вид травоядных или же на домашних животных, а иногда питаются и остатками, которые выбрасывает на берег океан.

На Ньюфаундленде выбор «запасных» вариантов добычи для рыси был небогат: полевки, полярные зайцы и молодняк карибу. Логично предположить, что рыси стали нападать на детенышей оленя и на менее доступных полярных зайцев. Новая добыча не была настолько обильной, чтобы численность хищников продолжала возрастать или хотя бы оставалась на прежнем уровне, однако она вполне компенсировала потерю главного источника питания.

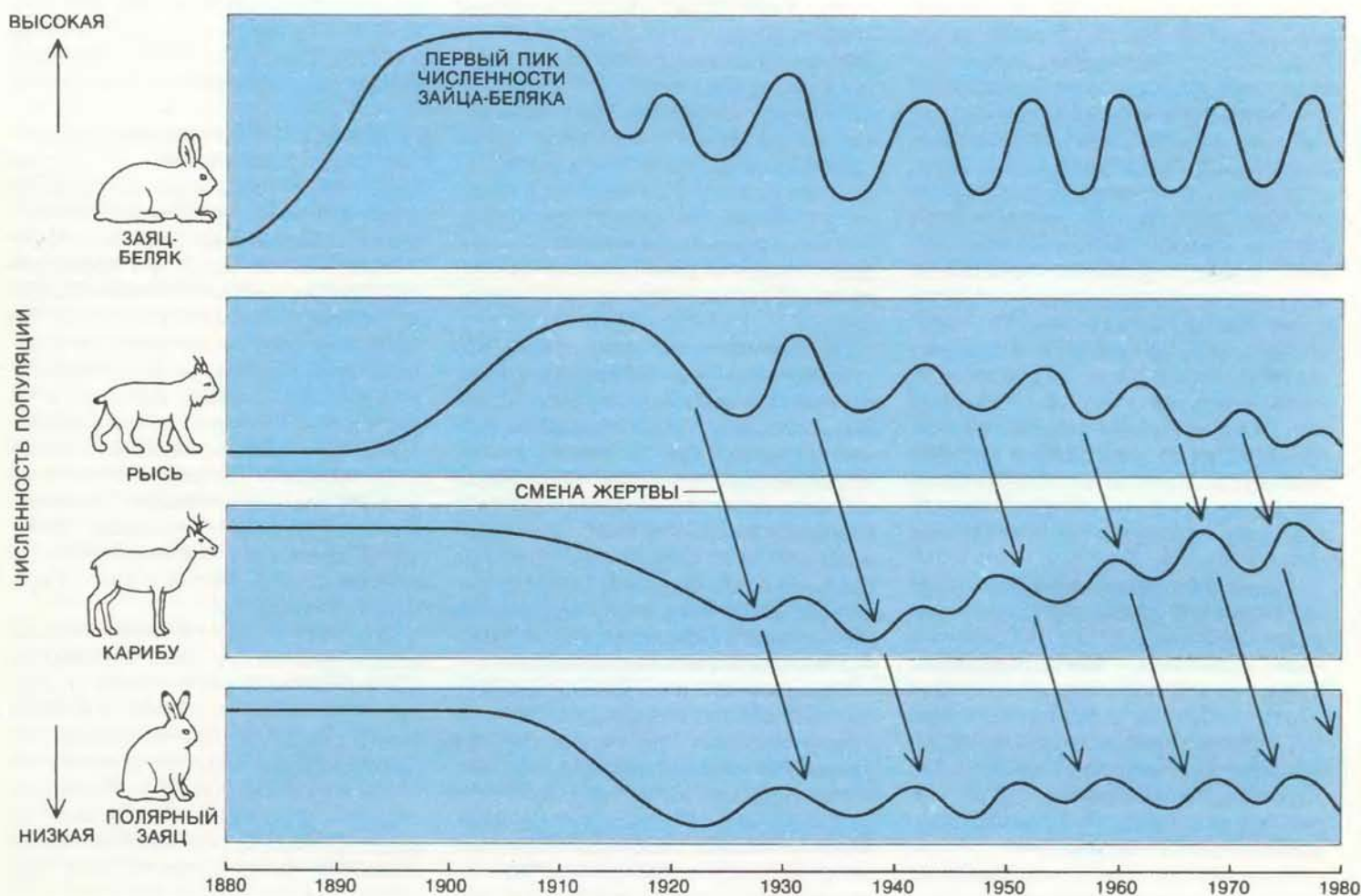
Примерно в то же время, когда рыси начали уничтожать в значительном количестве телят карибу, возросла

смертность среди взрослых оленей, но совсем по другим причинам. В 1900 г. на Ньюфаундленде завершилось строительство железной дороги, и она перерезала тропу, по которой самое многочисленное из живших на острове стад карибу совершало осенние миграции к югу. С 1911 по 1925 г. охотники, пользуясь железной дорогой как удобным средством для преследования животных, нанесли большой ущерб популяции. С 1911 по 1915 г. ежегодно добывали по 5 тыс. животных. Поскольку чрезмерный отстрел взрослых карибу совпал с периодом, когда рыси стали нападать на молодняк, размножение стада не восполняло потерь, вызванных охотой. Всего за несколько лет 40 тыс. карибу — столько их было на острове в 1900 г. — было почти полностью истреблено.

За два десятилетия, в течение которых катастрофически сократилась популяция карибу, в численности зайца-беляка установились циклические флуктуации, характерные для этого вида в

других районах Канады. Пики ее отмечались в 1920, 1931, 1940—43, 1951—52, 1959—60, 1969 и 1976 годах. В периоды подъема численности зайца-беляка рыси переключались на свою основную добычу, и процент выживания потомства карибу возрастал. Так, стада карибу быстро увеличивались около 1940, 1950 и 1960 гг. Во время пика численности зайца-беляка, пришедшегося на 1960 г., в основных оленьих стадах острова были проведены подсчеты — они свидетельствуют об увеличении поголовья: в 1959 г. насчитывалось 4800 особей, а в 1962 — 6100. Таким образом, приспособленность рыси к различным видам пищи приводит к тому, что динамика популяций полярного зайца и карибу оказывается тесно связанной с динамикой популяции зайца-беляка.

В последние десятилетия цикличность выживания молодняк карибу стала менее выраженной; даже в моменты спада численности теперь выживает большая доля телят, чем пре-



ПОПУЛЯЦИОННАЯ ДИНАМИКА зайца-беляка, рыси, карибу и полярного зайца свидетельствует о том, что движущей силой в системе смены жертвы являются колебания численности зайца-беляка, происходящие циклически с периодом 10 лет. Первый ее пик на Ньюфаундленде был самым высоким, последующие — несколько ниже. До того как заяц-беляк появился на острове, рыси встречались здесь очень редко. Когда популяция беляка выросла, число рысей быстро увеличилось. В 1900 г. на острове насчитывалось около

40 тыс. карибу, а к 1925 г. в результате нападений рыси и отстрела человеком их стадо сократилось примерно до 1000 голов. Популяция полярного зайца на Ньюфаундленде находится в экологической «западне»: этот вид продолжает здесь существовать только потому, что встречается крайне редко. Выбраться из «западни» полярный заяц не может: если его численность возрастет во время ближайшего периода сокращения популяции зайца-беляка, рыси снизят ее опять вследствие смены жертвы.



жде. Это явление отчасти обусловлено сокращением популяции рыси на Ньюфаундленде, причиной которого послужил другой циклический феномен — женская мода. Не так давно после некоторого перерыва в моду снова вошли меха пушных животных. Отлов рысей стал в связи с этим выгодным делом, и плотность их популяции на Ньюфаундленде уменьшилась. Кроме того, на остров было импортировано несколько новых типов дичи, в том числе ворончиковый рябчик и американская дикуша. Усложнение пищевой цепи привело к тому, что численности популяций хищников на острове стали более постоянными.

**РЫСИ** наносили такой ущерб карибу потому, что на Ньюфаундленде оленям долгое время приходилось иметь дело главным образом с волками. Естественно, у них выработались специфические защитные приспособления; однако стратегия поведения, эффективная при встрече с волком, оказалась лишь помехой, когда появился хищник с другими охотничьими повадками. Например, важное преимущество при защите телат от волков дают крупные скопления карибу, формирующиеся весной после оела. Волки часто охотятся днем и подкрадываются к добыче на открытом пространстве. Когда стадо карибу замечает волка, олени прибегают к самому эффективному средству защиты: они обращаются в бегство. Чем больше размер стада в период оела, тем больше вероятность того, что кака-либо самка издали заметит приближающегося волка. Кроме того, днем глаза карибу хорошо различают движущиеся объекты, что очень ценно для защиты от дневных хищников на открытых пространствах. По тем же причинам в качестве мест оела олени выбирают не заросшие кустарником участки, где легче заметить появившегося в отдалении волка.

Однако при нападении рыси такое сочетание физиологических и поведенческих особенностей почти бесполезно. Рысь охотится преимущественно ночью и предпочитает не загонять жертву, а набрасываться на нее из засады. Приближается к добыче рысь часто ползком, временами замирая без движения, так что карибу, глаза которых лучше различают движение, чем форму, не могут ее заметить.

Подкравшись к стаду травоядных животных, хищник выбирает для нападения какую-то одну особь, чем-то отличающуюся от прочих членов стада. Так, волки в первую очередь ориентируются на детенышей, больных, старых или раненых карибу; практически любое бросающееся в глаза отличие может привлечь внимание волка к тому или иному животному. Рысь же наце-

лена исключительно на молодняк. Для нее самая привлекательная добыча — активный, любопытный теленок, приблизившийся к границе участка оела, т.е. к зарослям, где и притаился хищник.

Не исключено, что при отсутствии волков преследования со стороны рысей дали толчок новому направлению эволюции карибу на Ньюфаундленде. Идущий в настоящее время естественный отбор благоприятствует выработке такого поведения, когда молодняк рассредоточен, а не сконцентрирован на открытых местах оела, где телата представляют собой легкую добычу для рыси. Кроме того, выгодна более прочная связь детеныша с самкой. Теленок, который держится рядом с охраняющей его матерью, имеет больше шансов избежать нападения рыси, чем подвижный, способный быстро бегать олененок, хотя от волка тот убежал бы без особого труда.

Если карибу действительно адаптируется подобным образом, процент выживания потомства может быстро повыситься, поскольку ответная адаптация рыси будет, очевидно, весьма ограниченной, так как ее рацион не может строиться исключительно на детенышах карибу, в первую очередь его составляет заяц-беляк. Никакие изменения охотничьего поведения рыси применительно к оленям не должны затрагивать его эффективности в отношении зайцев. Поэтому новая эволюционная ситуация, участниками которой становятся рысь и олень-карибу, должна складываться в пользу последнего.

Отношения хищник-жертва как между рысью и карибу, так и между рысью и полярным зайцем установились не в результате длительной взаимосвязанной эволюции. Ареалы этих видов почти не перекрываются: на карте Канады южная граница распространения полярного зайца почти совпадает с северными пределами распространения рыси. В то же время заяц-беляк проникает на север лишь немногим дальше рыси, так что ареалы рыси и беляка на большом пространстве совпадают.

Большинство экологов объяснили бы особенности географического распределения этих трех видов в соответствии с концепцией биомов, или жизненных зон: полярный заяц обитает в тундровом биоме, а рысь и заяц-беляк — в биоме бореальных хвойных лесов. Однако следует учесть, что отношения в системе хищник-жертва могут влиять на границы ареала полярного зайца. Не исключено, что при отсутствии рыси полярный заяц продвинулся бы несколько к югу от своей нынешней области расселения.

Успех рыси в охоте на два вида зайцев зависит, помимо прочих факторов, от типа растительности и характера

снежного покрова. В лесу рысь подкрадывается к жертве и устраивает на нее засаду, а встревоженный заяц-беляк замирает без движения и прислушивается. Исход в этом случае определяется главным образом расстоянием, разделяющим хищника и жертву в тот момент, когда заяц замечает рысь и пытается спастись от нее бегством. Когда рысь и заяц-беляк бегут по рыхлому таежному снегу, они, как отмечал Мерсер, находятся в равных условиях с точки зрения того, что у обоих животных невелика нагрузка на лапы, т.е. давление, оказываемое конечностями на опору во время бега. В результате они могут быстро петлять между деревьями, не проваливаясь в снег.

Напротив, полярный заяц приспособлен к плотному слежавшемуся снегу северной тундры. Нагрузка на лапы у него по меньшей мере вдвое больше, чем у зайца-беляка. В рыхлом снегу полярный заяц проваливается, и у него остается мало шансов спастись от рыси. Из этого не следует, что ареал полярного зайца определяется исключительно характером снежного покрова — катастрофической ситуация становится для него лишь при сочетании рыхлого снега с хищником, отличающимся небольшой нагрузкой на лапы.

**ПРОБЛЕМА** переключения хищника с одного вида жертвы на другой представляет собой в настоящее время особо перспективную область экологических исследований. Именно понятие о переключениях позволяет объяснить существование небольших и неустойчивых экосистем. Когда количество основной добычи уменьшается до какого-то предела, быстро перестраивающийся хищник может переходить на «запасной» источник пищи, сохраняя таким образом свое место в пищевой сети, которая в противном случае прекратила бы существование. Переключение на другую жертву снимает давление хищничества с сокращающейся популяции первой жертвы и дает ей возможность выжить.

Но в то же время такое переключение может приводить к тому, что популяция жертвы выживает, только достигнув очень малой плотности. На Ньюфаундленде это относится к полярному зайцу. Высокая плотность рысей, которая поддерживается на острове благодаря присутствию зайца-беляка, создает условия, при которых плотность полярного зайца остается здесь низкой.

Полярный заяц попадает, так сказать, в экологическую «западню».

Другой пример вида-жертвы, находящегося в аналогичной ситуации, — олень-карибу в провинциях Онтарио и Британская Колумбия. В этих районах карибу входит в состав экологического треугольника, включающего кроме не-



# Наука и общество

го волка и американского лося. В обеих провинциях лосей прежде не водилось, и имела место взаимосвязанная эволюция карибу и волка. В XIX в. в эти районы с юга и востока проник лось. Благодаря расширению пищевой базы увеличилась популяция волка. Карибу, однако, более легкая добыча для волка, и хищник при малейшей возможности отдавал предпочтение этому виду жертвы. В результате на части территории Онтарио и Британской Колумбии олень-карибу оказался в экологической «западне». Его популяция может существовать только потому, что он встречается очень редко. Когда численность карибу возрастает, волки переключаются на этот источник пищи, и количество оленей снова сокращается. Таким образом, они не могут выбраться из «западни», пока популяция лося обеспечивает здесь высокую плотность хищников.

В некоторых случаях вид-жертва в такой системе имеет шансы выжить не столько потому, что мала его численность, сколько благодаря низкой плотности расселения, так как в этом случае охота за отдельными животными становится для хищника энергетически невыгодной. Например, возможность существования на Ньюфаундленде того или иного числа полярных зайцев определяется минимальной приходящейся на одного зайца площадью, которая должна иметь такие размеры, чтобы вероятность встречи зайца с рысью была как можно меньшей. В самом деле, встречи с хищником должны быть достаточно редкими, иначе выживание зайчат не компенсирует смертность взрослых особей. Если численность, а следовательно, и плотность расселения полярных зайцев возрастает, это условие нарушается, и хищничество со стороны рыси быстро восстанавливает сместившееся равновесие. Следовательно, территориальные отношения оказываются в высшей степени существенной составляющей динамики системы хищник—жертва.

Самое важное, к чему привели исследования фауны Ньюфаундленда, — это представление о том, каким мощным и непредсказуемым может быть влияние интродукции нового вида в простую экосистему. Могли ли жители острова предположить в 1864 г., что ввоз совсем небольшого числа зайцев-беляков для обеспечения пищей рыбаков западного побережья 100 лет спустя выльется в циклические изменения выживаемости телят-карибу и приведет к сокращению популяции полярного зайца? Не говорит ли это о том, что, сталкиваясь с изолированными и неустойчивыми природными системами, человек должен проявлять большую осторожность?

(начало см. на с. 25)

смонтированы на установке Tevatron I, главном ускорителе Национальной ускорительной лаборатории им. Э. Ферми (Fermilab). Со временем кольцо ускорителя даст «пристанище» пучкам протонов и антипротонов, вращающихся навстречу друг другу. По сообщению директора этой лаборатории Л. Ледермана, в августе 1983 г. удалось достичь энергии 700 ГэВ (700 млрд. электронвольт) для одиночного пучка — это своего рода мировой рекорд. Сейчас усилия ученых направлены на повышение светимости, или интенсивности, пучка и на выведение его для бомбардировки неподвижной мишени. Предполагается, что Tevatron I будет функционировать как ускоритель с неподвижной мишенью до лета 1985 г.; протоны высоких энергий будут направляться на неподвижную мишень вместо встречного пучка антипротонов. Затем установка станет работать как коллайдер. Ожидается, что в столкновениях будет высвобождаться энергия 2 ТэВ.

Ускоритель Tevatron I — основной «соперник» протон-антипротонного коллайдера (Super Proton Synchrotron, или proton-antiproton collider) в ЦЕРНе, на котором были открыты частицы  $W$  и  $Z$ . Действительно, когда Tevatron I начнет действовать на полную мощность как коллайдер (по планам Ледермана, это намечено на лето 1986 г.), он превзойдет возможности ускорителя в ЦЕРНе по энергии и светимости.

Соответственно в ЦЕРНе заинтересованы провести как можно больше экспериментов, прежде чем вступит в строй Tevatron. Установка в ЦЕРНе будет несколько модифицирована: предполагается довести энергию каждого пучка до 310 ГэВ. Основные усилия будут направлены на увеличение светимости пучков. Имеющийся план предусматривает сооружение нового коллектора антипротонов, которое обойдется примерно в 20 млн. долл. Это позволит в 10 раз повысить интенсивность антипротонного пучка. Такие усовершенствования гарантируют повышение уровня «рождаемости» частиц  $W$  и  $Z$  по сравнению с существующим.

В сентябре 1983 г. на торжественной церемонии в ЦЕРНе была заложена новая установка LEP — Large Electron-Positron collider (большой электрон-позитронный коллайдер). Ускоритель LEP будет производить около 10 000 векторных бозонов в день и начнет функционировать в 1988 г. Главный его туннель протянется по окружности длиной 27 км. На первой стадии работы LEP пучки электронов и позитро-

нов будут сталкиваться, имея энергию по 60 ГэВ каждый. Впоследствии их энергия будет увеличена до 100 ГэВ. Энергия столкновения в электрон-позитронных коллайдерах намного меньше, чем в протонных, однако большая ее часть идет на образование новых частиц. (Это объясняется тем, что протоны состоят из кварков и глюонов, так что сообщаемая им энергия делится между несколькими частицами.) Поскольку нет твердых теоретических предсказаний о массе частиц Хиггса, они вполне могут быть открыты на ускорителе LEP еще до сооружения установки Desertron. Более того, в ЦЕРНе обсуждается проект последующего превращения туннеля LEP в протонное кольцо, где могут быть достигнуты энергии порядка 8 ТэВ.

А пока не будет построен LEP, физика столкновений электронов с позитронами будет изучаться в двух американских лабораториях. Подкомиссия НЕРАР рекомендовала также ускорить строительство, проводимое в Стэнфордском ускорительном центре, и модифицировать электронное накопительное кольцо в Корнеллском университете (установка CESR). Коллайдер, сооружаемый в Стэнфорде, будет ускорять электроны и позитроны в трехкилометровом канале существующего там линейного ускорителя на энергию 50 ГэВ. Затем пучки электронов и позитронов будут разделяться с помощью электромагнитов и вводиться в противоположных направлениях в кольцо, пристроенное к линейному ускорителю. Сталкиваясь они будут на противоположной стороне этого кольца. Стоимость проекта составляет 113 млн. долл. Строительство уже ведется и будет завершено к концу 1986 г. Установка будет производить большое число частиц  $W$  и  $Z$ . Кроме того, на ней будет проверено, действительно ли линейные ускорители на встречных пучках обходятся дешевле получивших широкое распространение накопительных колец.

В организации DESY (Deutsches Elektronen Synchrotron) в Гамбурге в начале 1984 г. начнется сооружение установки HERA — Hadron-Electron Ring Accelerator (адрон-электронного кольцевого ускорителя). Название подчеркивает отличительную черту этой установки: это единственный ускоритель, в котором адроны (протоны) будут сталкиваться с лептонами (электронами). Установка позволит детально изучить эффекты слабых взаимодействий, так как здесь не будет необходимости принимать во внимание большое влияние электромагнитных и

(продолжение см. на с. 112)



# Аэродинамика аппаратов, движимых мускульной силой человека

*Соппротивление воздуха значительно замедляет движение велосипедиста. Учет аэродинамических факторов позволил создать велосипеды, развивающие скорость до 100 км/ч*

**АЛЬБЕРТ С. ГРОСС, ЧЕСТЕР Р. КАЙЛ,  
ДУГЛАС ДЖ. МЭЙЛУИКИ**

**Н**А ПРОТЯЖЕНИИ десятилетий принципы аэродинамики с большим успехом применялись для того, чтобы улучшить скоростные качества самолетов, автомобилей, мотоциклов, даже лыжников и конькобежцев. Аппараты же, использующие мускульную силу человека, до самого последнего времени игнорировались. Это кажется странным, поскольку для таких аппаратов сопротивление воздуха является основным тормозящим фактором. Так, при скорости велосипеда 30 км/ч лобовое сопротивление составляет 80% полной тормозящей силы. В настоящей статье мы попытаемся объяснить причину этого пренебрежительного отношения к средствам наземного передвижения, движимым самим человеком, и показать, что дает учет принципов аэродинамики для совершенствования этих средств.

Достаточно взглянуть на велосипед, чтобы заметить, что за столетие его форма практически не изменилась. Велосипед модели «Ровер сейфти сайкл», который появился в Англии в 1884 г., мог бы легко сойти за современный. У него отсутствуют лишь подседельная труба, образующая диагональ в раме современной ромбической формы, и ряд других элементов, таких, как тормоза и ускорительная передача. Конструкторы и потребители практически сразу ощутили важность учета требований аэродинамики, и лишь искусственно созданные ограничения на конструкцию мешали применению нужной технологии. В то время не менее, чем сейчас, было очевидно, что при скоростях 30—50 км/ч лобовое сопротивление для велосипеда огромно.

До начала столетия полусогнутая поза велосипедиста широко распространялась как средство борьбы с сопротивлением воздуха. В качестве другого средства стали использовать многоместный велосипед, пуская его перед гонщиком, чтобы экранировать последнего от ветра. В 1895 г. Джимми Мишель из Уэльса, следуя за четырехместным велосипедом, преодолел за один час 46 км. В 1899 г. американский

гонщик Чарльз М. (Миля-в-Минуту) Мэрфи получил мировую известность, проехав на велосипеде 1 милю (1,6 км) со скоростью 101,8 км/ч. Мэрфи следовал за поездом по специальному деревянному настилу на железнодорожной линии Лонг-Айленда.

В 1912 г. француз Этьен Бюно-Варийа получил патент на обтекаемый корпус, закрывающий гонщика и велосипед от встречного потока воздуха, — идея, которая была навеяна формой первых дирижаблей. На велосипедах этой модели и последующих ее модификациях с 1912 по 1933 г. не раз устанавливались европейские рекорды скорости. В 1933 г. француз Марсель Бертэ в одночасовой гонке преодолел 49,98 км на велосипеде «Велодин» обтекаемой конструкции. Его скорость оказалась на 5 км/ч выше, чем достигнутая в одночасовых гонках на обычных велосипедах.

В том же году французский изобретатель Шарль Моше построил «Велокар» — «лежачий» велосипед, на котором гонщик располагался почти лежа на спине и одновременно вращал педали. Впоследствии Моше придал своему детищу обтекаемую форму. Профессиональный гонщик Франсуа Фор установил на «Велокаре» несколько рекордов скорости в период 1933—1938 гг. Моше и Фор надеялись, что Международный союз велосипедистов, всемирная организация по велоспорту, признает эти рекорды. Однако этого не произошло.

**В** ДЕЙСТВИТЕЛЬНОСТИ в 1938 г. Союз запретил использование обтекателей и лежачих велосипедов в соревнованиях. Запрет этот действует до сих пор. Он надолго задержал развитие высокоскоростных велосипедов и явился одной из причин, по которым велосипед остался почти неизменным на протяжении столь длительного времени. (Другая причина заключалась в том, что в развитых странах предпочтение стали отдавать автомобилю и велосипед утратил свое былое значение как средство передвижения.)

Улучшение аэродинамики и другие конструктивные изменения велосипеда Союз, по существу, классифицировал как «жульничество». (Какая удача, что ветеринарный хирург, шотландец из Белфаста Джон Бойд Данлоп придумал пневматические шины для велосипеда в 1887 г., когда Союз еще не существовал; случись это позже — и человечество, возможно, ездило бы сейчас на велосипедах и даже на автомобилях с голыми стальными ободьями.) Надо отдать должное, со временем Союз смягчил свои ограничения на улучшение аэродинамики велосипеда, хотя лежачие модели все еще запрещены. С 1976 г. в международных соревнованиях стали применяться облегчающие комбинезоны. Были разрешены обтекаемые шлемы, рамы с каплевидным профилем сечения трубок, обтекаемые рукоятки тормозов и другие элементы конструкции с улучшенной аэродинамикой. Совершенствование всех средств передвижения, использующих мускульную силу человека, на самом деле идет темпами, небывалыми со времен победоносного распространения велосипеда в XIX в.

Быстрый прогресс отчасти происходил под влиянием ряда событий; имевших место в Калифорнии. В 1973 г. Кайл (один из авторов статьи) и Джэк Г. Лэмби, консультант по аэродинамике, независимо друг от друга построили и опробовали два первых в США обтекаемых велосипеда. В отличие от своих предшественников Кайл и Лэмби действительно измерили, насколько обтекаемая форма снижает сопротивление. Это было сделано путем многочисленных испытаний, в которых свободно катившийся с горки велосипед замедлял движение на горизонтальной плоскости. При этих условиях замедление пропорционально сумме всех тормозящих сил. В эксперименте измерялись либо само замедление, либо скорость. Кайл и Лэмби, опубликовавшие результаты одновременно, пришли к выводу, что полная сила сопротивления может быть уменьшена более чем на 60%, если использовать



вертикально поставленный обтекатель в форме крыла, который бы целиком закрывал велосипед и гонщика. (Лишь спустя два года до Кайла и Лэмби дошли сведения, что подобные велосипеды были ранее построены в Европе.)

В 1974 г. Рональд П. Скэйрин, член олимпийской сборной США, установил пять мировых рекордов скорости на обтекаемом велосипеде Кайла на военно-морской базе Лос-Аламитос. Ободренные успехом, Кайл и Лэмби решили организовать соревнования машин, движимых человеком, без ограничений на их конструкцию. 5 апреля 1975 г. в Ирвиндэйле (шт. Калифорния) 14 непохожих друг на друга моделей приняли участие в этих первых исторических соревнованиях. Многие из них были лежащими, причем на одних гонщик лежал на спине (лицом вверх), на других — на животе (лицом

вниз). Некоторые машины приводились в движение совместными усилиями рук и ног. Победу одержал обтекаемый тандем, построенный Филипом Нортон, преподавателем колледжа в Клермонте (шт. Калифорния), на котором выступали сам Нортон и Кристофер Дитон, опытный гонщик, хотя и не с мировым именем. Они показали скорость 72,21 км/ч. (Наибольшая скорость, достигнутая на обычном гоночном велосипеде без вспомогательных устройств, равна 69,92 км/ч. Этот рекорд установил в 1982 г. Сергей Копылов, советский гонщик мирового класса.)

Поскольку Международный союз велосипедистов запрещает применение обтекателей, участники соревнований в Ирвиндэйле основали в 1976 г. Международную ассоциацию по развитию средств передвижения, использующих

мускульную силу человека. Она ставит своей целью проведение соревнований без ограничения на конструкцию моделей. Начиная с этого времени аппараты, участвующие в соревнованиях, становились все более сложными, а скорости их росли. Четыре такие машины уже превысили принятую в США максимальную разрешенную скорость 55 миль/ч (88 км/ч). Среди них — обтекаемый четырехколесный велосипед третьего поколения, построенный Нортон.

В настоящее время самым быстроходным является велосипед модели «Вектор тандем» — двухместный лежащий велосипед элегантной обтекаемой формы. Он был построен под руководством Аллана А. Войгта, инженера, который, будучи президентом фирмы Versatron Research, Inc., занимается главным образом разработкой



**ОБТЕКАЕМЫЙ ГОНОЧНЫЙ ВЕЛОСИПЕД**, построенный Ч. Кайлом (одним из авторов статьи). Рональд П. Скэйрин, член олимпийской сборной США, показан на нем в момент одночасовой гонки, в которой он установил мировой рекорд скорости 51,29 км/ч при старте с места. Главная осо-

бенность конструкции — обтекатель, снижающий лобовое сопротивление гонщика и велосипеда. Рекорд был установлен в 1979 г. на скоростной дороге в Онтарио (шт. Калифорния). За исключением обтекателя, этот велосипед почти ничем не отличался от обычного гоночного.



сервомоторов для космических аппаратов. (На велосипеде «Вектор тандем» два гонщика располагаются лежа на спине, головами в противоположных направлениях.) В 1980 г. на 200-метровом участке скоростной дороги в

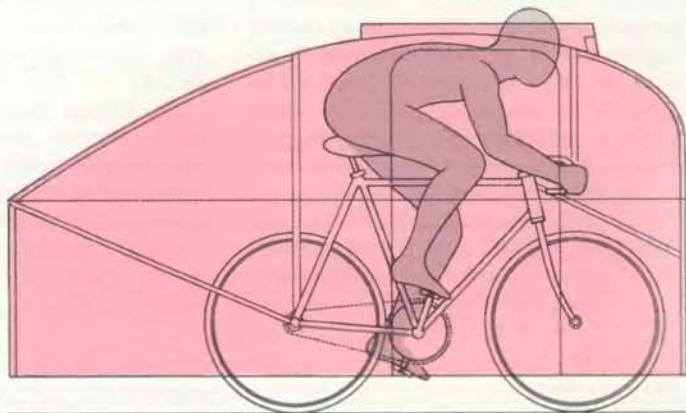
Онтарио (шт. Калифорния) после разгона на дистанции в одну милю этот велосипед развил скорость 101,26 км/ч. Позднее в том же году он проехал 64 км по шоссе между Стоктоном и Сакраменто со средней скоростью 81,3 км/ч.

ТАКИЕ исключительно высокие скорости достигнуты почти целиком за счет учета аэродинамики. Велосипедист, едущий со скоростью 30 км/ч, вытесняет около 450 кг воздуха в минуту. Если машина и гонщик не имеют

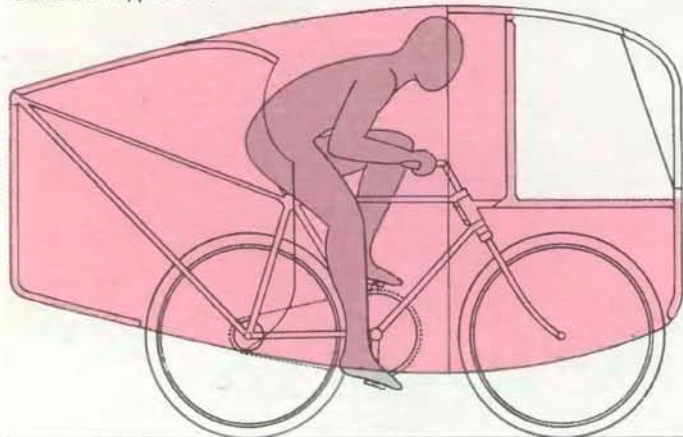
«РОВЕР СЕЙФТИ САЙКЛ»



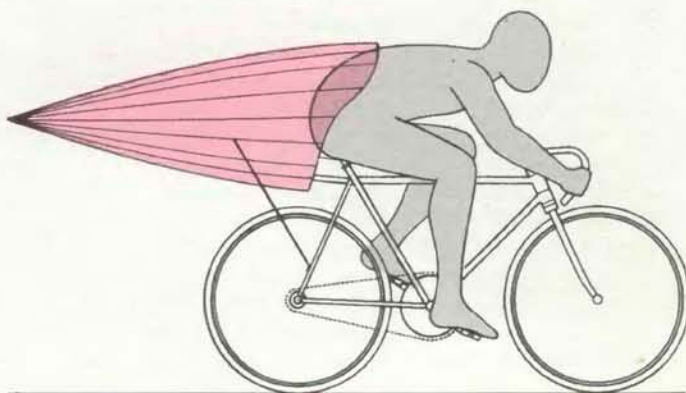
«ВЕЛОДИН»



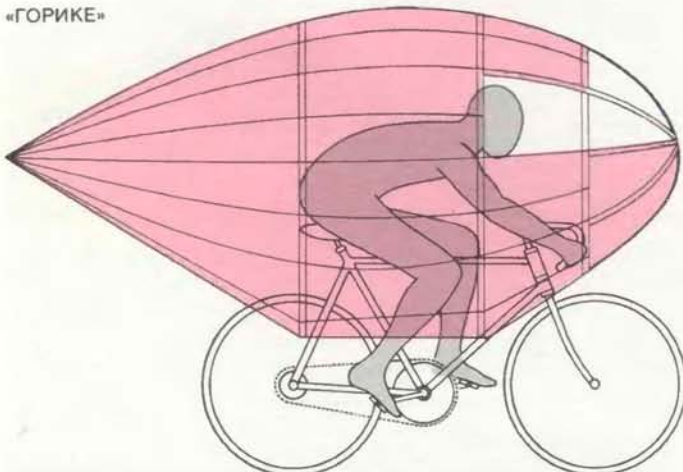
ВЕЛОСИПЕД БЮНО — ВАРИЙА



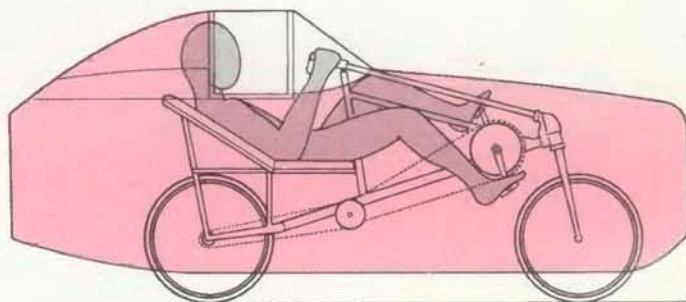
«РОКЕТ»



«ГОРИКЕ»



«ВЕЛОКАР»



ПЕРВЫЕ ПОПЫТКИ УСОВЕРШЕНСТВОВАТЬ средства передвижения, использующие мускульную силу человека, привели к созданию в Англии в 1884 г. велосипеда «Ровер сейфти сайкл». В 1912 и 1913 гг. француз Этьен Бюно-Варийа получил патенты на обтекаемые модели. На таких велосипедах установлены многие рекорды скорости. Мо-

дель «Горики» была построена в Германии в 1914 г. Француз Марсель Бертэ в 1933 г. установил новый рекорд на велосипеде «Велодин», проехав 49,98 км за один час. В том же году появился «Рокет», построенный Оскаром Эггом. На другой французской модели «Велокар» с 1933 по 1938 г. поставлено несколько рекордов скорости.



обтекателя, за ними образуется «вихревой след», который отбирает значительную часть затрачиваемой энергии.

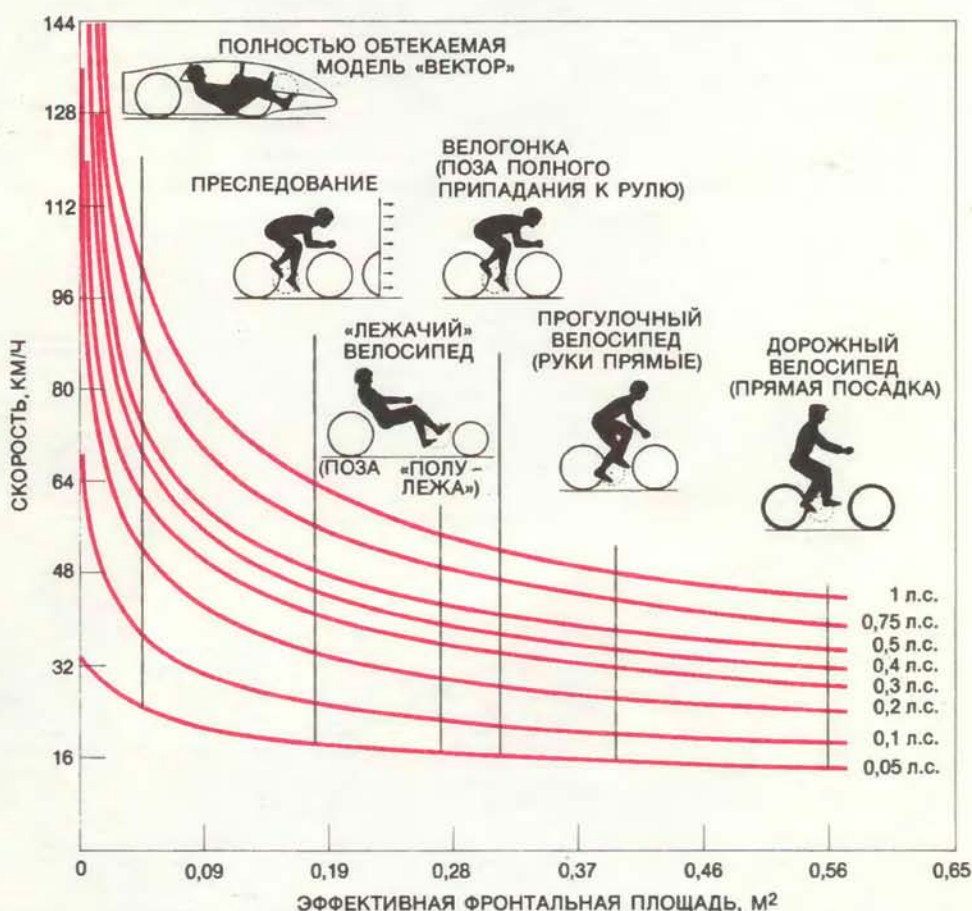
На скоростные качества велосипеда влияют два вида аэродинамического сопротивления: один обусловлен распределением давления и связан с формой велосипеда, другой определяется трением о воздух. Сопротивление за счет давления возникает в случае, когда воздушный поток не следует по контуру движущегося тела. Отрыв потока изменяет распределение давления на поверхности тела. Если отрыв происходит в тыловой части тела, то там образуется область пониженного (по сравнению с фронтальной областью) давления, что приводит к возникновению тормозящей силы. Сопротивление за счет трения обусловлено вязкостью воздуха. Из-за вязкости возникает напряжение трения в пограничном слое воздуха, непосредственно примыкающем к поверхности тела.

Поверхности конструктивных элементов велосипеда цилиндрической, сферической и других форм плохи в смысле аэродинамики, поскольку на них происходит отрыв воздушных потоков. Понижение давления за этими поверхностями приводит к возникновению тормозящей силы, которая в сотни раз превышает силу трения о воздух. В противоположность этому обтекаемые поверхности воздушные потоки обходят плавно и смыкаются за телом. Сопротивление за счет давления значительно уменьшается, и более существенным становится сопротивление за счет трения.

Чтобы добиться наилучших скоростных качеств машины, нужно выбрать такую ее конструкцию, при которой необратимая отдача энергии воздушной среде, вызываемая двумя видами сопротивления, сводится к минимуму. Современный легковой автомобиль или грузовик, движущийся со скоростью 90 км/ч, от 40 до 50% энергии, получаемой им за счет сгорания топлива, расходует на преодоление аэродинамического сопротивления. Поскольку велосипед обладает меньшими мощностью, весом и сопротивлением качению и имеет менее обтекаемую форму, относительные потери на аэродинамическое сопротивление при скоростях выше 15 км/ч еще значительно больше. Для характеристики аэродинамических свойств тела используют понятие коэффициента сопротивления. Плохая в смысле аэродинамики поверхность, такая, как сфера, в определенных условиях может иметь коэффициент сопротивления, скажем, 1,3, в то время как у тела с хорошо обтекаемой каплевидной формой при тех же условиях он будет меньше 0,1. В результате потери энергии у предмета каплевидной формы при движении будут в десять раз меньше, чем, например, у цилиндра.



РЕКОРДЫ СКОРОСТИ веломашин стали быстро расти после 1976 г., когда была основана Международная ассоциация по развитию средств передвижения, использующих мускульную силу человека. Ассоциация не налагает ограничений на конструкцию. Ранее действующие правила Международного союза велосипедистов запрещали использовать в соревнованиях обтекаемые велосипеды, и рекорды скорости практически не изменялись. Кривые относятся к трем видам гонок: групповые на дистанции 200 м (красная), индивидуальные (серая) и одночасовые (черная).



ОБТЕКАЕМАЯ ФОРМА улучшает скоростные показатели веломашин. Дорожный велосипед имеет необтекаемую форму, модель «Вектор» — наиболее обтекаемую. «Преследование» — это езда вплотную за другим транспортным средством. Спортсмен способен расходовать мощность 1 л.с. в течение 30 с, здоровый нетренированный человек — в течение 12 с. Эффективная фронтальная площадь равна произведению коэффициента сопротивления на фронтальную площадь тела.



Для наземного транспорта аэродинамическое сопротивление пропорционально произведению фронтальной площади (площадь проекции тела на плоскость, перпендикулярную движе-

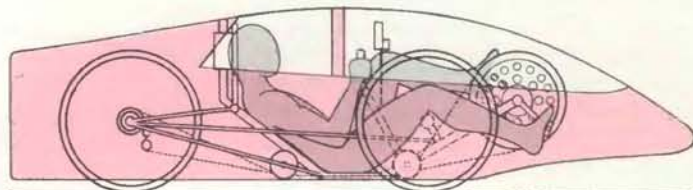
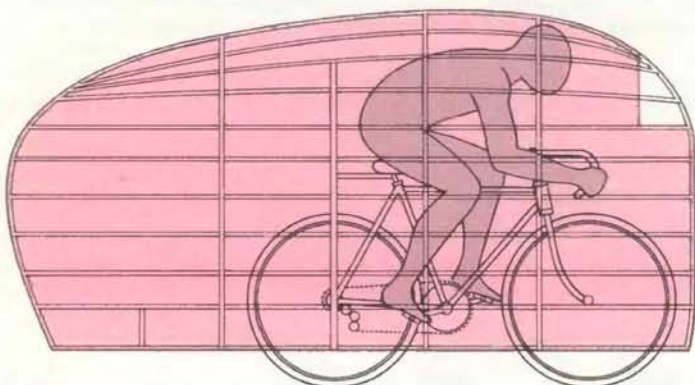
нию. — *Перев.*) аппарата на коэффициент сопротивления. Для удобства назовем это произведение эффективной фронтальной площадью. При сравнении аэродинамических свойств

аппаратов недостаточно сопоставить коэффициенты сопротивления, необходимо учитывать и размеры сравниваемых аппаратов. С этой целью и вводится понятие эффективной фронталь-

«ЗИППЕР»



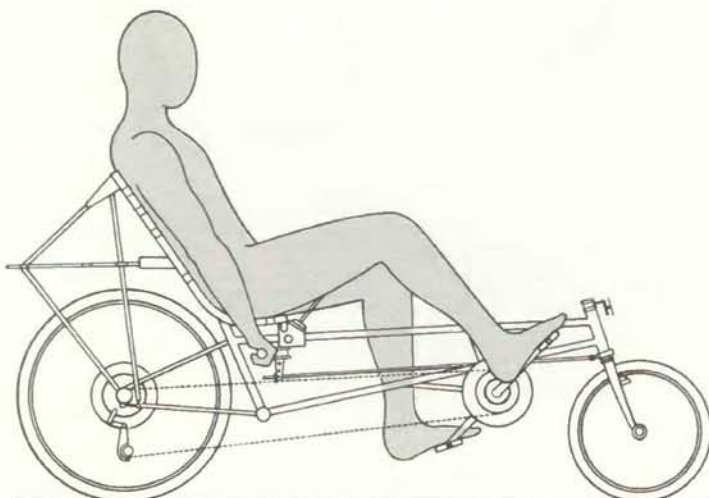
«ВЕКТОР СИНГЛ»

МОДЕЛЬ КАЙЛА  
С ОБТЕКАЕМОМ КОРПУСОМ

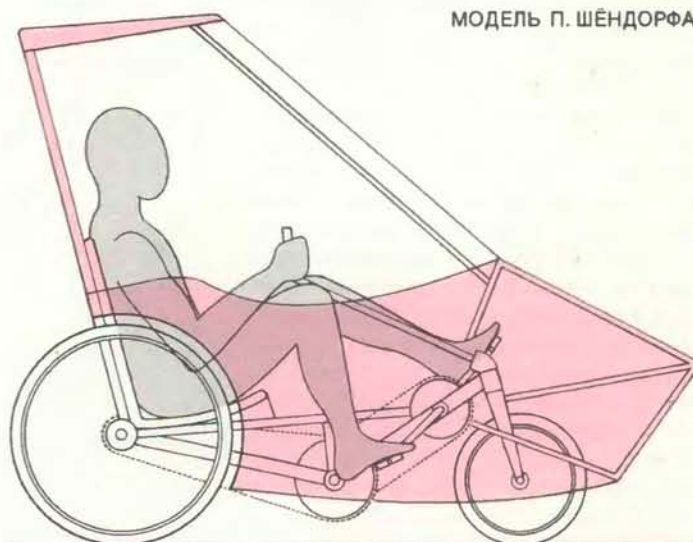
«ИЗИ РЕЙСЕР»



«АВАТАР 2000»



МОДЕЛЬ П. ШЕНДОРФА



В КОНСТРУКЦИЯХ СОВРЕМЕННЫХ ВЕЛОСИПЕДОВ широко используются различные способы улучшения обтекаемости, чтобы снизить лобовое сопротивление пары машина — гонщик. Модель «Зиппер» снабжена простейшим приспособлением — частичным обтекателем, установленным перед велосипедистом. Модель Кайла с обтекаемым корпусом была разработана в 1973 г. «Аватар 2000» предназначен скорее для прогулок и повседневных поездок, чем для сорев-

нований. В нем реализованы преимущества полулежачей позы велосипедиста. Полностью обтекаемый велосипед «Вектор сингл» теоретически в состоянии развить скорость 100 км/ч при затрате мощности 1 л.с. Модель «Изи рейсер» относится к «лежачим» и предназначена главным образом для прогулок и повседневных поездок, хотя и участвовала в соревнованиях. Модель Пауля Шендорфа (ФРГ) предназначена для престарелых и инвалидов.



ной площади. Обычный велосипед с гонщиком имеет эффективную фронтальную площадь от 0,3 до 0,55 м<sup>2</sup>, в то время как у велосипеда с обтекателем она менее 0,05 м<sup>2</sup>.

**СИЛА** лобового сопротивления пропорциональна квадрату скорости, а мощность — произведению силы на скорость. Следовательно, необходимая для движения в воздушной среде мощность растет пропорционально скорости в третьей степени. Поэтому даже небольшое ускорение движения требует значительного увеличения усилий. Если при скорости 32 км/ч велосипедист удвоит усилия, он увеличит ее лишь до 40 км/ч. Напротив, уменьшение коэффициента сопротивления влияет на скорость меньше, чем это может показаться. Если при той же скорости 32 км/ч коэффициент сопротивления уменьшится вдвое, то, затрачивая такие же усилия, велосипедист увеличит свою скорость лишь до 39 км/ч. Это объясняется тем, что сопротивление качению остается постоянным. Если бы его не существовало, то как увеличение мощности, так и уменьшение эффективной фронтальной площади вдвое дали бы одно и то же увеличение скорости до 40 км/ч.

Итак, для достижения высоких скоростей требуются исключительные аэродинамические свойства. Велосипед модели «Вектор тандем», в котором каждый гонщик развивает мощность

чуть больше 1 л.с., достиг скорости 101,26 км/ч. Чтобы разогнаться так на обычном велосипеде необходима мощность более 6 л.с., что лежит за пределами физических возможностей человека.

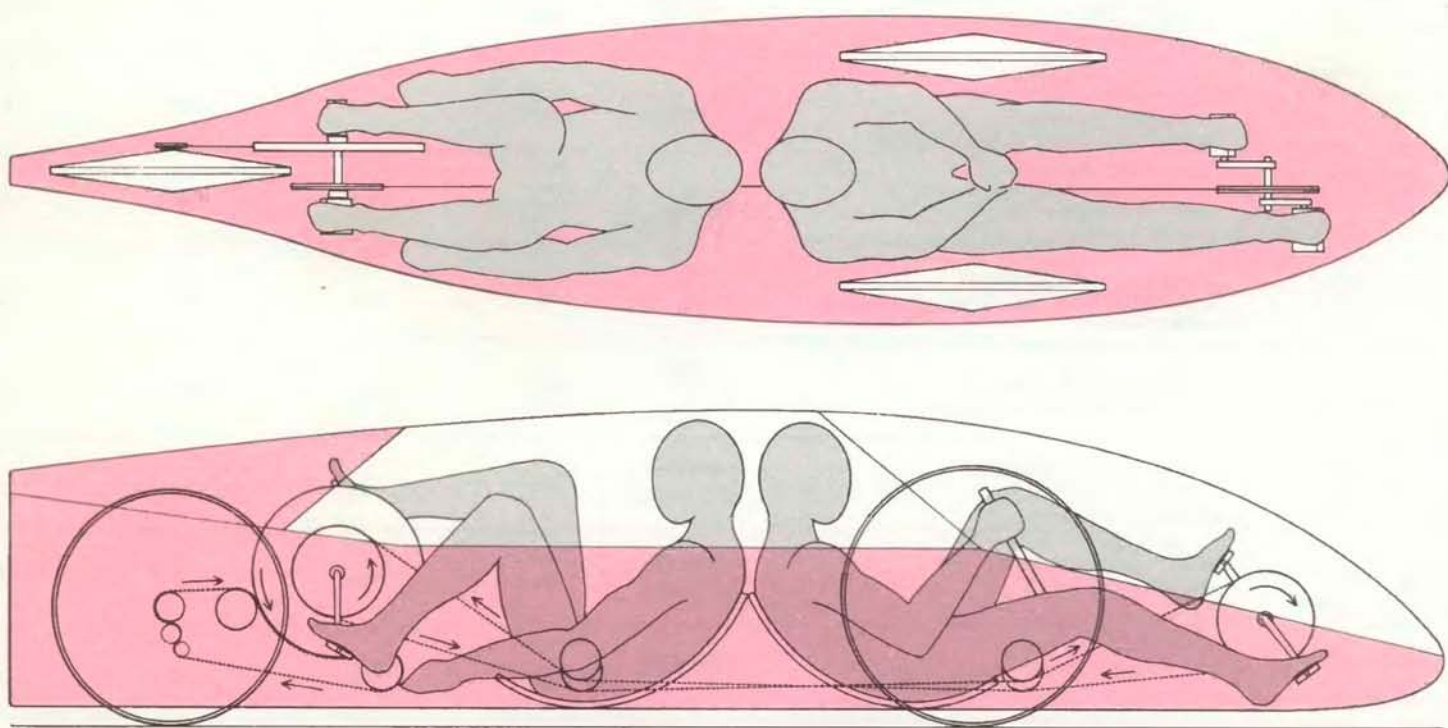
Конструкторы и гонщики добиваются снижения аэродинамического сопротивления тремя способами. Во-первых, можно уменьшить потери энергии на взаимодействие с воздухом. Для этого поверхностям конструкции придают обтекаемую форму (чтобы снизить сопротивление, связанное с давлением) и устраняют их шероховатости (чтобы свести к минимуму трение о воздух). Во-вторых, можно стремиться уменьшить количество воздуха, вытесняемого при движении. Этого добиваются уменьшением фронтальной площади пары гонщик-велосипед. Тот же эффект дает езда в высокогорных районах. В-третьих, гонщик может использовать искусственный попутный ветер; в данном случае наиболее эффективный метод — гонка с преследованием, т.е. в хвостовой зоне разрежения другого аппарата, которая как бы втягивает велосипедиста.

На больших высотах атмосфера менее плотная, поэтому велосипедистам приходится двигаться сквозь меньшую массу воздуха. В Мехико, расположенном на высоте 2240 м, где плотность воздуха составляет 80% от плотности на уровне моря, рекордные скорости на 3—5% больше, чем внизу. В Ла-Пасе

(Боливия) на высоте 3660 м рекорды теоретически можно улучшить на 14%. На Луне, где нет атмосферы, а сила тяжести составляет лишь одну шестую земной, правильно сконструированный велосипед мог бы теоретически ехать со скоростью 383 км/ч при затрате мощности порядка 0,1 л.с.

**ЕСЛИ** 80% энергии, которую велосипедист тратит на преодоление сопротивления воздуха при езде по ровной дороге со скоростью 30 км/ч, исследовать более детально, то окажется, что 70% этой энергии расходуется на сопротивление, оказываемое велосипедисту, а 30% — на сопротивление его машине. Из этого можно заключить, что, желая улучшить конструкцию велосипеда, следует прежде подумать об улучшении аэродинамики гонщика.

Для тех, кто выступает в соревнованиях, ограничения, введенные Международным союзом велосипедистов, оставляют немного возможностей улучшить аэродинамику пары велосипед-гонщик за счет различных средств, помимо уже использованных и признанных, таких, как полусогнутая поза, обтекаемый шлем, облегчающий костюм и элементы обтекаемой формы в конструкции велосипеда. Как показал Войгт, даже на «идеальном» велосипеде (у которого отсутствует аэродинамическое сопротивление и трение качения) лобовое сопротивление самого



МОДЕЛЬ «ВЕКТОР ТАНДЕМ» показана в плане и в профиль. Это аналог модели «Вектор сингл», изображенной на обложке журнала. В 1980 г. этот тандем, в котором гонщики располагаются затылками друг к другу, достиг скорости 101,26 км/ч на дистанции 200 м после разгона в одну милю.

Затраты мощности составили чуть больше 1 л.с. на каждого гонщика. Позднее в том же году «Вектор тандем» проехал участок 64 км на автомагистрали в Калифорнии со средней скоростью 81,3 км/ч.



|                                  | ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЕЛОСИПЕДОВ              |                                                                                                                                                 | СИЛЫ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРИ 32 КМ/Ч, КГ                                                                                  | АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ |                                     |                                               |
|----------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------------------|
|                                  |                                         |                                                                                                                                                 |                                                                                                                     | КОЭФФИЦИЕНТ СОПРОТИВЛЕНИЯ  | ФРОНТАЛЬНАЯ ПЛОЩАДЬ, М <sup>2</sup> | ЭФФЕКТИВН. ФРОНТАЛЬН. ПЛОЩАДЬ, М <sup>2</sup> |
| ОБЫЧНЫЕ ВЕЛОСИПЕДЫ               | ЮНОШЕСКИЙ                               | ВЕС ВЕЛОСИПЕДА 13,6 КГ<br>ВЕС ВЕЛОСИПЕДИСТА 54,5 КГ<br>ШИНЫ: РИФЛЕННЫЕ,<br>ДИАМ. 50,8 СМ, ДАВЛ. 2,8 КГ/СМ <sup>2</sup>                          | <br>2,51<br>0,95                   | 1,1                        | 0,45                                | 0,50                                          |
|                                  | ЕВРОПЕЙСКИЙ ДОРОЖНЫЙ                    | ВЕС ВЕЛОСИПЕДА 18 КГ<br>ВЕС ВЕЛОСИПЕДИСТА 72 КГ<br>ДИАМЕТР ШИН 68 СМ,<br>ДАВЛЕНИЕ 2,8 КГ/СМ <sup>2</sup>                                        | <br>3,77<br>0,54                   | 1,1                        | 0,51                                | 0,56                                          |
|                                  | ПРОГУЛОЧНЫЙ (РУКИ ПРЯМЫЕ)               | ВЕС ВЕЛОСИПЕДА 11,7 КГ<br>ВЕС ВЕЛОСИПЕДИСТА 72 КГ<br>ШИНЫ: КЛИНЧЕРНЫЕ,<br>ДИАМ. 69 СМ, ДАВЛ. 6,3 КГ/СМ <sup>2</sup>                             | <br>2,00<br>0,38                   | 1,0                        | 0,40                                | 0,40                                          |
|                                  | ГОНОЧНЫЙ (СОГНУТАЯ ПОЗА)                | ВЕС ВЕЛОСИПЕДА 9 КГ<br>ВЕС ВЕЛОСИПЕДИСТА 72 КГ<br>ШИНЫ: ПРИКЛЕЕННЫЕ, ДИАМ. 69 СМ,<br>ДАВЛ. 7,4 КГ/СМ <sup>2</sup>                               | <br>1,58<br>0,24                   | 0,88                       | 0,36                                | 0,31                                          |
| УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫЕ МОДЕЛИ       | С УЛУЧШЕННОЙ АЭРОДИНАМИКОЙ              | ВЕС ВЕЛОСИПЕДА 9 КГ<br>ВЕС ВЕЛОСИПЕДИСТА 72 КГ<br>ШИНЫ: ПРИКЛЕЕННЫЕ, ДИАМ. 69 СМ,<br>ДАВЛ. 7,4 КГ/СМ <sup>2</sup>                               | <br>1,48<br>0,24                   | 0,83                       | 0,36                                | 0,30                                          |
|                                  | С ЧАСТИЧНЫМ ОБТЕКАТЕЛЕМ («ЗИППЕР»)      | ВЕС ВЕЛОСИПЕДА 9,5 КГ<br>ВЕС ВЕЛОСИПЕДИСТА 72 КГ<br>ШИНЫ: ПРИКЛЕЕННЫЕ, ДИАМ. 69 СМ,<br>ДАВЛ. 7,4 КГ/СМ <sup>2</sup>                             | <br>1,35<br>0,24                   | 0,70                       | 0,36                                | 0,27                                          |
|                                  | ЛЕЖАЧИЙ («ИЗИ РЕЙСЕР»)                  | ВЕС ВЕЛОСИПЕДА 12,2 КГ<br>ВЕС ВЕЛОСИПЕДИСТА 72 КГ<br>ШИНЫ КЛИНЧЕРНЫЕ, ДИАМ. 50,8 СМ (ПЕРЕДН.),<br>69,0 СМ (ЗАДН.), ДАВЛ. 6,3 КГ/СМ <sup>2</sup> | <br>1,35<br>0,43                   | 0,77                       | 0,35                                | 0,27                                          |
|                                  | ТАНДЕМ                                  | ВЕС ТАНДЕМА 19 КГ<br>ВЕС ВЕЛОСИПЕДИСТОВ 2 × 72 КГ<br>ШИНЫ: КЛИНЧЕРНЫЕ,<br>ДИАМ. 69 СМ, ДАВЛ. 6,3 КГ/СМ <sup>2</sup>                             | <br>2,41<br>1,21<br>0,73<br>0,37   | 1,0                        | 0,48                                | 0,48                                          |
| ВЕЛОМАШИНЫ-РЕКОРДСМЕНЫ           | ВЕЛОСИПЕД ДЛЯ ГОНКИ ЗА ЛИДЕРОМ          | ВЕС ВЕЛОСИПЕДА 9 КГ<br>ВЕС ВЕЛОСИПЕДИСТА 72 КГ<br>ШИНЫ: ПРИКЛЕЕННЫЕ,<br>ДИАМ. 69 СМ, ДАВЛ. 7,4 КГ/СМ <sup>2</sup>                               | <br>3,76<br>0,24                  | 0,50                       | 0,36                                | 0,18                                          |
|                                  | БЛЮ-БЕЛЛ (ДВУХКОЛЕСНЫЙ, ОДНОМЕСТНЫЙ)    | ВЕС ВЕЛОСИПЕДА 18 КГ<br>ВЕС ВЕЛОСИПЕДИСТА 72 КГ<br>ШИНЫ: ПРИКЛЕЕННЫЕ, ДИАМ. 50,8 СМ (ПЕРЕДН.),<br>69 СМ (ЗАДН.), ДАВЛ. 7,4 КГ/СМ <sup>2</sup>   | <br>0,28<br>0,36                 | 0,12                       | 0,46                                | 0,06                                          |
|                                  | МОДЕЛЬ КАЙЛА (ДВУХКОЛЕСНЫЙ, ДВУМЕСТНЫЙ) | ВЕС ВЕЛОСИПЕДА 23,6 КГ<br>ВЕС ВЕЛОСИПЕДИСТОВ 2 × 72 КГ<br>ШИНЫ: ПРИКЛЕЕННЫЕ,<br>ДАВЛ. 7,4 КГ/СМ <sup>2</sup>                                    | <br>0,65<br>0,33<br>0,51<br>0,25 | 0,2                        | 0,65                                | 0,13                                          |
|                                  | «ВЕКТОР СИНГЛ» (ТРЕХКОЛЕСНЫЙ)           | ВЕС ВЕЛОСИПЕДА 30,8 КГ<br>ВЕС ВЕЛОСИПЕДИСТА 72 КГ<br>ШИНЫ: ПРИКЛЕЕННЫЕ,<br>ДИАМ. 61 СМ (ПЕРЕДН.), 68,6 СМ (ЗАДН.)                               | <br>0,23<br>0,46                 | 0,11                       | 0,42                                | 0,05                                          |
| ТЕОРЕТИЧЕСКИ ДОСТИЖИМЫЕ ВАРИАНТЫ | «ВЕКТОР ТАНДЕМ» (ТРЕХКОЛЕСНЫЙ)          | ВЕС ВЕЛОСИПЕДА 34 КГ<br>ВЕС ВЕЛОСИПЕДИСТОВ 2 × 72 КГ<br>ШИНЫ: ПРИКЛЕЕННЫЕ,<br>ДИАМЕТР 61 СМ                                                     | <br>0,28<br>0,14<br>0,81<br>0,40 | 0,13                       | 0,44                                | 0,05                                          |
|                                  | ИДЕАЛЬНЫЙ ВЕЛОСИПЕД                     | СОПРОТИВЛЕНИЕ КАЧЕНИЮ И ЛОБОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ОТСУТСТВУЮТ                                                                                       | <br>1,39<br>0                    | 0,8                        | 0,35                                | 0,28                                          |
|                                  | ГОНЩИК БЕЗ СОПРОТИВЛЕНИЯ                | СОПРОТИВЛЕНИЕ КАЧЕНИЮ ВКЛЮЧАЕТ ВЕС ВЕЛОСИПЕДИСТА                                                                                                | <br>0,60<br>0,37                 | 1,1                        | 0,11                                | 0,12                                          |
|                                  | ИДЕАЛЬНЫЙ ЛЕЖАЧИЙ (ЛИЦОМ ВВЕРХ)         | ЛОБОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ОКАЗЫВАЕТ ТОЛЬКО ВЕЛОСИПЕДИСТ                                                                                             | <br>0,33<br>0                    | 0,6                        | 0,11                                | 0,06                                          |
|                                  | ИДЕАЛЬНЫЙ ЛЕЖАЧИЙ (ЛИЦОМ ВНИЗ)          | ВЕЛОСИПЕДИСТ НЕБОЛЬШОГО РОСТА, НО СИЛЬНЫЙ                                                                                                       | <br>0,23<br>0                    | 0,6                        | 0,07                                | 0,05                                          |
|                                  | ИДЕАЛЬНЫЙ ЛЕЖАЧИЙ С ОБТЕКАТЕЛЕМ         |                                                                                                                                                 | <br>0,03<br>0                    | 0,05                       | 0,13                                | 0,06                                          |
|                                  | ЛИДИРУЮЩИЙ С МОТОРОМ                    | ВЕС ВЕЛОСИПЕДА 19 КГ<br>ВЕС ВЕЛОСИПЕДИСТА 72 КГ<br>ШИНЫ ГОНОЧНОГО МОТОЦИКЛА,<br>ДАВЛ. 4,9 КГ/СМ <sup>2</sup>                                    | <br>0<br>0,55                    |                            |                                     | ЗАВИСИТ ОТ СКОРОСТИ                           |
|                                  | «ЛУННЫЙ» ВЕЛОСИПЕД                      | ВЕС ВЕЛОСИПЕДА 11,3 КГ<br>ВЕС ВЕЛОСИПЕДИСТА 72 КГ<br>ВЕС СКАФАНДРА 6,8 КГ                                                                       | <br>0<br>0,07                    |                            |                                     | 0                                             |



| КОЭФФИЦИЕНТ<br>СОПРОТИВЛЕ-<br>НИЯ КАЧЕНИЮ | РОВНАЯ ДОРОГА, НЕТ ВЕТРА       |                                |                                 | ПОДЪЕМЫ И УКЛОНЫ                |                                |
|-------------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
|                                           | ТРЕБУЕМАЯ<br>МОЩНОСТЬ,<br>Л.С. | ПРОГУЛОЧ-<br>СКОРОСТЬ,<br>КМ/Ч | МАКСИМАЛЬ-<br>СКОРОСТЬ,<br>КМ/Ч | СКОРОСТЬ НА<br>ПОДЪЕМЕ,<br>КМ/Ч | СКОРОСТЬ НА<br>СПУСКЕ,<br>КМ/Ч |
| 0,014                                     | 146                            | 16,2                           | 44,7                            | 19,6                            | 31,9                           |
| 0,006                                     | 140                            | 18,2                           | 44,4                            | 17,5                            | 38,6                           |
| 0,0045                                    | 100                            | 21,1                           | 50,0                            | 19,6                            | 44,6                           |
| 0,003                                     | 77                             | 23,6                           | 54,5                            | 20,9                            | 50,2                           |
| 0,003                                     | 73                             | 24,1                           | 55,7                            | 20,9                            | 51,8                           |
| 0,003                                     | 67                             | 24,8                           | 57,4                            | 21,1                            | 54,5                           |
| 0,005                                     | 75                             | 23,2                           | 56,6                            | 20,1                            | 54,2                           |
| 0,0045                                    | 66                             | 24,5                           | 58,9                            | 20,9                            | 56,6                           |
| 0,003                                     | 47                             | 28,2                           | 66,0                            | 21,9                            | 67,1                           |
| 0,004                                     | 27                             | 36,2                           | 94,3                            | 20,7                            | 124,5                          |
| 0,003                                     | 24                             | 37,5                           | 91,1                            | 22,5                            | 112,5                          |
| 0,0045                                    | 29                             | 35,1                           | 98,5                            | 18,2                            | 145,0                          |
| 0,0045                                    | 23                             | 41,2                           | 116,7                           | 20,9                            | 174,4                          |
| 0                                         | 59                             | 26,9                           | 57,8                            | 21,6                            | 55,8                           |
| 0,0045                                    | 41                             | 29,6                           | 73,7                            | 21,4                            | 80,5                           |
| 0                                         | 14                             | 43,6                           | 93,8                            | 27,0                            | 107,7                          |
| 0                                         | 10                             | 48,9                           | 105,1                           | 37,3                            | 105,1                          |
| 0                                         | 1                              | 93,8                           | 202,6                           | 41,2                            | 280,8                          |
| 0,006                                     | 23                             | 47,3                           | 473,1                           | 20,3                            | ?                              |
| 0,0045                                    | 3                              | 382,2                          | ?                               | 126,2                           | ?                              |

гонщика является серьезным препятствием для улучшения скоростных показателей. Согласно его расчетам, гонщик, едущий в полусогнутой позе на обычном гоночном велосипеде, может развить скорость около 55 км/ч при затрате мощности 1 л.с. На «идеальном» велосипеде тот же гонщик, прилагая те же усилия, мог бы разогнаться до 61 км/ч.

У миллионов же велосипедистов, не участвующих в соревнованиях, но желающих просто ездить с меньшими усилиями, возможности для аэродинамических усовершенствований существуют. Приведем их в порядке стоимости затрат. Наиболее дешевое приспособление — это частичный обтекатель типа «Зиппер», который разработан и выпускается Гленом Брауном в Санта-Крус (шт. Калифорния). Это небольшой прозрачный экран, который монтируется перед велосипедистом. Приспособление стоимостью около 60 долл. позволяет снизить лобовое сопротивление на 20% и тем самым повысить скорость на 4 км/ч при мощности 1 л.с.

Другой эффективный способ — использование лежачего велосипеда. (Такая машина обычно на несколько сотен долларов дороже обычного дорожного велосипеда). Зачинатели в этой области — Гарднер Мартин из Фридома (шт. Калифорния), конструктор модели «Изи рейсер», и Дэвид Гордон Уилсон из Массачусетского технологического института, конструктор велосипеда «Аватар 2000». Вследствие малой фронтальной площади лежащего гонщика сопротивление воздуха меньше на 15—20%, что создает примерно такой же выигрыш в скорости, как и при использовании обтекателя «Зиппер». Лежачий велосипед, однако, имеет и другие преимущества. Во-первых, он более удобен, чем обычный велосипед. Если же иметь в виду последствия аварии (исключая столкновение с автомобилем), то этот велосипед и намного безопаснее: велосипедист находится ближе к земле, и его падение

**СВОДНАЯ ТАБЛИЦА ХАРАКТЕРИСТИК** различных средств передвижения, использующих мускульную силу человека. Во второй колонке приведены значения лобового сопротивления (верхнее число) и сопротивления качению (нижнее число). В пяти последних колонках приведены последовательно затраты мощности при 32 км/ч в процентах от затрат энергии на прогулочном велосипеде, «прогулочная» скорость (км/ч) при длительной езде и затратах мощности 0,1 л.с., максимальная скорость при затратах мощности 1 л.с., постоянная скорость (км/ч) на 5%-ном подъеме при затратах мощности 0,4 л.с., скорость при свободном спуске с того же уклона.



не так опасно, а кроме того, он едет нагами вперед, так что в случае аварии меньше вероятность повредить голову. Одна из проблем состоит в том, что лежащий велосипед плохо виден на дороге и поэтому вероятность столкновения с автомобилем больше. Эту опасность можно частично уменьшить, если к велосипеду прикреплять шест с флажком.

Самым дорогим средством является велосипед с полностью обтекаемым корпусом. Модель «Вектор сингл», одноместный вариант велосипеда «Вектор тандем» — наилучший пример полностью обтекаемой закрытой машины с педальным приводом. (Фотография велосипеда «Вектор сингл» приведена на обложке журнала.) Согласно расчетам, этот велосипед теоретически способен развить скорость 99,3 км/ч при затрате мощности 1 л.с., на 29,3 км/ч больше рекордной скорости на традиционном гоночном велосипеде. «Вектор сингл» стоит примерно столько же, сколько первоклассный гоночный велосипед.

При езде по холмистой местности полностью обтекаемый велосипед сохраняет преимущества перед своим обычным собратом. Хотя «Вектор сингл» весит 36 кг (вес обычного велосипеда 11 кг), он преодолевает умеренные подъемы не хуже, а может быть и лучше, обычного велосипеда. При затрате мощности 0,4 л.с. обычный велосипед забирается на 2,5%-ный подъем со скоростью 26 км/ч, а на 6%-ный — со скоростью 18 км/ч. При тех же условиях «Вектор» может двигаться со скоростью 33 и 18 км/ч соответственно.

При движении под уклон разница еще более заметна. С уклона 2,5% обычный велосипед может съезжать со скоростью 47 км/ч, а «Вектор» — 87 км/ч. На 6%-ном уклоне обычный велосипед разовьет скорость 63 км/ч, «Вектор» же — свыше 160 км/ч. Наличие таких скоростных возможностей означает, что если обтекаемые велосипеды станут широко использоваться, то придется уделить пристальное внимание конструкции тормозов и подвески, а также проблеме устойчивости.

**П**ОСКОЛЬКУ лобовое сопротивление пропорционально квадрату относительной скорости, то встречный, попутный и даже боковой ветер может радикально влиять как на величину лобового сопротивления, так и на энергетические затраты. Например, велосипедист, едущий в безветренную погоду со скоростью 30 км/ч, должен удвоить свои усилия, чтобы сохранить эту скорость при встречном ветре 16 км/ч. (В действительности велосипедист, как правило, снижает скорость и стремится сохранить первоначальные усилия и частоту вращения педалей за счет переключения передачи. Это одна из при-

чин, по которой многоскоростные велосипеды удобны и в условиях равнинной местности.)

Попутный ветер подгоняет велосипедиста, и его скорость увеличивается. Вообще говоря, ветер ускоряет или замедляет движение велосипеда примерно на половину своей скорости. Когда один велосипедист едет в хвосте другого, его затраты энергии меньше процентов на тридцать. Впереди идущий создает за собой «хвостовой след» — зону разрежения, а для едущего сзади это равносильно попутному ветру. Чем ближе преследователь к лидеру, тем сильнее «увлекающий» эффект. Здесь можно вспомнить тандем, в котором гонщики сидят почти вплотную друг к другу. В пересчете на одного человека они затрачивают усилие на 20% меньше, чем два отдельных велосипедиста.

Если гонщики, едущие цепочкой, лидируют по очереди, то группа в целом может двигаться гораздо быстрее одиночки. В гонке преследования на дистанции 4000 м группа из четырех спортсменов движется в среднем на 6,5 км/ч быстрее, чем одиночный гонщик. Группа велотуристов, примерно равных по силе, как правило, может ехать на 1,5—5 км/ч быстрее, чем каждый из них в отдельности. Чем многочисленнее группа (в пределах, скажем, десяти человек), тем быстрее она может передвигаться.

Искусственный ветер, который создает попутный автомобиль, может ускорить движение велосипедиста на 1,5—5 км/ч на время до семи секунд. Чем больше автомобиль, тем сильнее эффект. В плотном транспортном потоке велосипедист может ехать на 5—10 км/ч быстрее, чем в обычных условиях при тех же усилиях.

Следуя за автомобилем, велосипедист в состоянии развить очень высокую скорость. Этот вид спорта называется «гонка за лидером». 25 августа 1973 г. Аллан В. Эббот, врач из Калифорнии, поставил рекорд в такой гонке, достигнув скорости 223,168 км/ч на дистанции в одну милю на дне соляного высохшего озера Бонневиль (шт. Юта). Джон Хауэрд, член олимпийской сборной США, планирует побить рекорд Эббота и превзойти скорость 240 км/ч (150 миль/ч).

**Х**ОТЯ описанные выше технические решения важны сами по себе, резонно задаться вопросом: найдут ли они какое-нибудь применение, кроме как в борьбе за рекорды? Маловероятно, что эти достижения техники станут немедленно и широко использоваться значительной частью велосипедистов во всем мире. Во многих развивающихся странах, например где велосипед остается одним из основных видов транспорта, средняя скорость движе-

ния составляет около 10 км/ч (причем часто нужно везти и большой груз). Между тем лобовое сопротивление начинает превалировать над другими отрицательными факторами лишь при скоростях свыше 15 км/ч. Но и здесь аэродинамические исследования приносят пользу. Не имея их результатов, конструкторы были бы в неведении, почему, собственно, можно пренебрегать аэродинамическими соображениями для медленно движущихся аппаратов.

Если велосипед предназначен для надежной, но медленной езды, то в первую очередь надо бороться с трением качения путем улучшения как колес, так и дорог. Надо думать и над снижением веса велосипеда, чтобы облегчить подъем в гору. Недавнее появление в США «горных велосипедов» является шагом вперед на пути создания велосипеда, достаточно легкого и стойкого к неровным и немошным дорогам.

Результаты последних исследований аэродинамики велосипедов могут принести многообразную практическую пользу. Обычный велосипед, вероятно, еще на многие годы сохранит доминирующее положение благодаря привычкам людей, низкой стоимости, простоте и надежности. Но он оставляет ряд возможностей для нововведений. Так, например, легкий, простой и недорогой передний обтекатель существенно улучшил бы эффективность движения обычного велосипеда. Лежащий велосипед мог бы шире использоваться в повседневных поездках и туристами благодаря хорошим скоростным качествам и комфортабельности.

Следующим прогрессивным шагом могло бы стать оснащение лежащего велосипеда легким двигателем небольшой мощности, который служил бы как вспомогательное устройство при разгоне и преодолении подъемов. Снабженная обтекателем в той мере, в какой бы позволили требования вентиляции и устойчивости, такая машина почти не отличалась бы от мопеда. (Современные модели мопедов в действительности являются не моторными педальными машинами, а скорее мотоциклами малой мощности.)

Результаты последних исследований побудили изобретателей сконструировать несколько моделей велосипедов специального назначения. Пауль Шендорф, профессор техники из Специальной высшей школы в Кельне, построил серию трехколесных лежащих велосипедов для пожилых людей и инвалидов. На них легко ездить, они защищают от непогоды и были бы удобны, например, в домах престарелых. Другой пример — трех- и двух колесные велосипеды с ручным управлением L-образной рукояткой для парализованных (людей, у которых парализованы обе ноги). Такие велосипеды построены



# Наука и общество

Дугласом Швандтом из Научно-исследовательского центра реабилитации Управления по делам ветеранов войны в Пало-Альто (шт. Калифорния). Уильям Уорнер, паралегики, который в свое время установил рекорд в соревнованиях машин с ручным приводом (эти соревнования проводились Международной ассоциацией по развитию средств передвижения, использующих мускульную силу человека), считает, что инвалид может ездить на таком велосипеде гораздо быстрее, чем на обычном инвалидном кресле-каталке, и в результате приобрести большую свободу передвижения и мобильность. (Последний рекорд на таких велосипедах 40,38 км/ч установил в 1981 г. Эшер Уильямс из Центра реабилитации в Пало-Альто.)

В целом полностью закрытый обтекаемый велосипед мог бы стать весьма полезным видом транспорта, если учесть, что он способен двигаться со скоростью 30—50 км/ч в любую погоду. Однако в том виде, в каком велосипед существует в настоящее время, он не годится для автомагистралей. Эти модели имеют недостаточную вентиляцию, плохую маневренность и обзор, у них отсутствуют такие необходимые средства для безопасного движения, как освещение и стеклоочистители.

Чтобы создать практически пригодный велосипед улучшенного типа, нужны такие же затраты материальных средств и инженерных усилий, какие требуются для создания новой модели автомобиля. Но и в этом случае pedalная машина не была бы безопасной в потоке автотранспортных средств. Можно сделать вывод, что закрытый велосипед не станет практически используемым видом транспорта до тех пор, пока энергетический кризис не приведет к снижению числа автомобилей на автомагистралях или пока для pedalных машин не будут построены специальные дороги.

Гораздо вероятнее ожидать появления легких экономичных автомобилей, в которых бы использовались описанные нами технические достижения. Дуглас Дж. Мэйлуки (один из авторов статьи) уже построил такой одноместный автомобиль весом 104 кг. Он имеет рекордную экономичность — при скорости на трассе 88 км/ч (55 миль/ч) пробег составляет 67 км/литр, а с дизельным двигателем — 66 км/литр. (Последний был установлен при скорости 90,6 км/ч на трассе, соединяющей Лос-Анджелес с Лас-Вегасом.) Развитие таких автомобилей могло бы задержать истощение запасов горючего и по иронии судьбы отодвинуть то время, когда pedalные машины, в которых двигателем является сам человек, займут положенное им по праву место.

## Первые поселенцы в Новом Свете

**КОГДА** человек впервые пришел из Азии в Новый Свет? Многие консервативно настроенные археологи с недоверием относятся к любой цифре, превышающей 12 тыс. лет. Другая точка зрения, которой придерживаются некоторые более отважные исследователи, основывается на единственной стоянке в Калифорнии — Калико, древней аллювиальной формации в пустыне Мохаве. Геоморфологи оценивают ее возраст в 1—2 млн. лет. Те, кто склонен считать Калико стоянкой древнего человека, предлагают рассматривать расколотые камни, найденные в нижней части формации, как артефакты древностью в 200 тыс. лет.

Р. Мак-Нэш из Бостонского университета обсуждает вопрос о первых поселенцах в Америке в свете новых археологических данных, в том числе результатов своих собственных исследований близ Айякичо (Перу). В статье, опубликованной в журнале "The L. S. B. Leakey Foundation News" он выдвигает свой главный аргумент против сторонников консервативной точки зрения. Как считает Мак-Нэш, гипотезу о том, что человек пересек Берингов пролив всего 12 тыс. лет назад, следует признать несостоятельной, поскольку в Южной Америке, по его мнению, имеются следы более древних миграций.

Мак-Нэш пишет, что данные такого рода получены из нижних горизонтов пещеры Пикимачау, одной из стоянок в Айякичо. С помощью радиоуглеродного метода был дважды датирован самый нижний слой с остатками деятельности человека: полученные значения составляют 19 600 и 20 200 лет до н.э. Древность трех вышележащих слоев — 16 100, 14 750 и 14 100 лет до н.э. Мак-Нэш напоминает о других открытиях в Южной Америке: 1) на стоянке Лос-Толдос (на юге Аргентины) были обнаружены каменные орудия древнее, чем 10 650 ± 600 лет до н.э.; 2) в пещере Пиауи (Бразилия) в нижних слоях найдены каменные отщепы, возраст которых превышает 18 650 ± 600 лет; 3) в Монте-Верде (Чили) раскопали орудия вместе с костями мастодонта, датированными приблизительно 12-м тысячелетием до н.э.; 4) в Тайма-Тайма (Венецуэла) нашли наконечник копья, застрявший в тазовой кости мастодонта, возраст которого оценивается в 16 тыс. лет (результаты радиоуглеродного анализа не были опубликованы).

В Северной Америке Мак-Нэш рассматривает стоянки Вальсекийо и Тлапакойя (Мексика). В Вальсекийо древность орудий, найденных вместе с ко-

стями вымерших животных, варьирует от 20 до 40 тыс. лет до н.э. В Тлапакойя обнаружены остатки очага, орудия и кости вымерших животных; возраст обожженного угля, определенный радиоуглеродным методом, составляет 23 150 ± 500 лет.

Комментируя находки на стоянке Лос-Толдос в Аргентине, датировка которых близка к 12 тыс. лет, Мак-Нэш подчеркивает: «Независимо от того, с какой скоростью продвигался человек по Американскому континенту, он не мог оставить свои орудия 12 тыс. лет назад в Лос-Толдосе, если бы не пересек Берингов пролив задолго до этого времени». Среди тех, кто в последнее время покинул «лагерь консерваторов», Мак-Нэш называет, в частности, известного исследователя С. Вэнс-Хейнса (Аризонский университет), который теперь полагает, что первые иммигранты прибыли в Новый Свет более 30 тыс. лет назад.

Что касается тех энтузиастов, которые считают Калико стоянкой древнего человека, то их позиция представляется довольно уязвимой по двум причинам. Если, как утверждают геоморфологи, аллювиальные отложения образовались более миллиона лет назад, то ни один археолог не осмелится предположить, что в них могут быть продукты трудовой деятельности человека. С другой стороны, если древность отложений окажется значительно меньше, тогда нужно будет доказать, являются ли найденные в Калико предметы примитивными каменными орудиями или они представляют собой просто камни со следами воздействия природных процессов. В настоящее время ни одной точке зрения пока нельзя отдать предпочтения.



# Интерпретация зрительных иллюзий

*Зрительная система способна интерпретировать изображения, имеющие неоднозначный смысл, используя для этого некоторые правила, отражающие закономерности наблюдаемого мира*

**ДОНАЛЬД Д. ХОФФМАН**

**З**РИТЕЛЬНОЕ восприятие есть процесс построения бессознательных «умозаключений». Что мы видим, зависит не только от того, что имеется в поле зрения, но и от того, как наша зрительная система выявляет структуру в изображениях на сетчатке глаз и как их интерпретирует. Взгляните на рисунок на этой странице: это поверхность, образованная косинусоидой при ее вращении вокруг вертикальной оси, мы смотрим на нее как бы сверху под некоторым углом. Фигура кажется состоящей из нескольких кольцеобразных гребней, причем цветные окружности проходят по ложбинам между гребнями. Если, однако, перевернуть рисунок, то покажется, что поверхность изменилась и теперь цветные

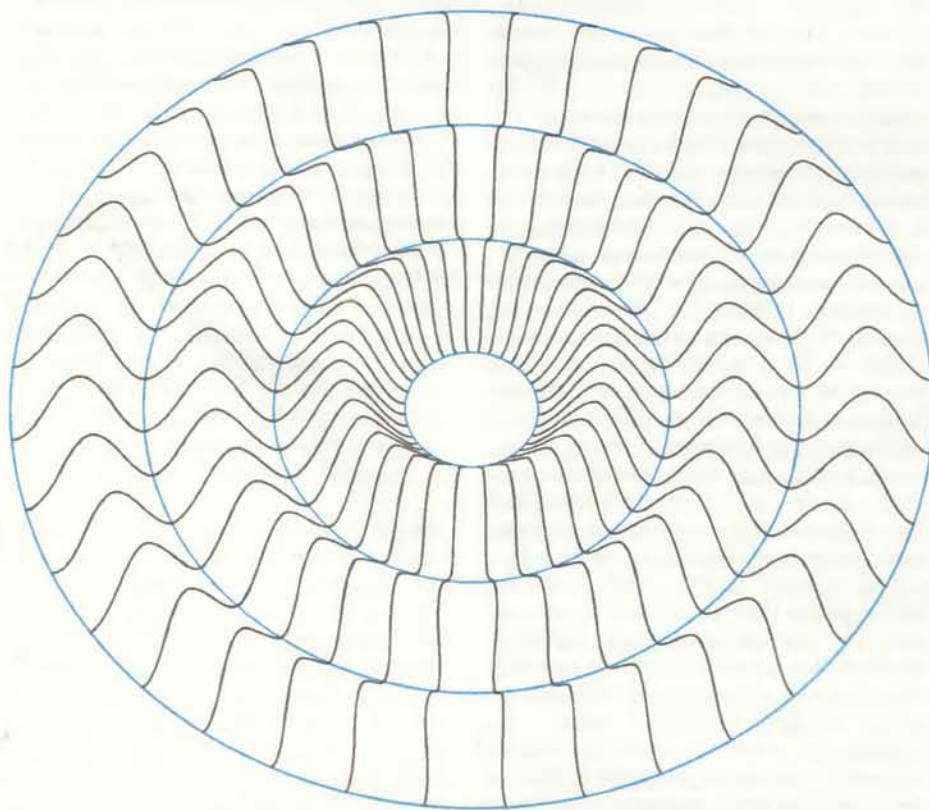
окружности проходят по гребням, а не по ложбинам. Очевидно, зрительная система осуществляет нечто большее, чем пассивную передачу входных сигналов в мозг. Можно думать, что она играет активную роль в процессах обработки и интерпретации этих сигналов.

В таком случае возникают три вопроса. Во-первых, зачем зрительной системе нужно выявлять структуру и интерпретировать изображения, попадающие на сетчатку? Во-вторых, как при этом сохраняется адекватное представление о реальном мире? В-третьих, по каким правилам происходит интерпретация? Для того чтобы ответить на эти вопросы, необходимо более детально исследовать восприя-

тие неоднозначных фигур, подобных изображенной на рисунке.

Одной из причин, зачем зрительной системе нужно выявлять структуру в сетчаточных изображениях и интерпретировать их, является то, что на сетчатке одинаковые изображения могут получаться при разных трехмерных конфигурациях объектов окружающей среды. Другими словами, сетчаточные изображения необходимо интерпретировать и выявлять в них элементы организации потому, что они по самой своей природе неоднозначны. Эта неоднозначность связана с тем, что окружающий мир трехмерен, а сетчатка, по существу, двумерна. Поэтому для того, чтобы человек получил представление об окружающем мире во всем его многообразии, зрительной системе нужно делать довольно сложные бессознательные «умозаключения». Например, изображение поверхности, образованной при вращении косинусоиды, является двумерным, как и ее отображение на сетчатке. Однако воспринимается оно так, что эта поверхность кажется объемной. Такое впечатление целиком определяется нашей интерпретацией рисунка. Иначе говоря, объемность поверхности иллюзорна. Это утверждение ведет к серьезному вопросу. Если, как мы полагаем, подобные иллюзии не исключение, а неотъемлемая часть зрительного восприятия, то как тогда проверить, правильно ли мы воспринимаем мир? Возможно ли вообще адекватное зрительное восприятие, если видение есть субъективный процесс, основанный на нашей собственной интерпретации?

**Ч**ТОБЫ понять суть зрительного восприятия, необходимо объяснить, почему зрительные «умозаключения» все же позволяют правильно интерпретировать видимое. Важной отправной точкой в исследовании этого вопроса является тот факт, что видимый нами мир ни в коей мере не хаотичен, а подчиняется определенным законам и обладает различными признаками структурной организации. Объяснить, почему зрительные иллюзии не мешают правильно представить себе внешний



**ОБРАЩАЕМАЯ ПОВЕРХНОСТЬ** получается при вращении косинусоиды вокруг вертикальной оси. Она кажется состоящей из нескольких концентрически расположенных кольцевых гребней и впадин, причем цветные окружности проходят по впадинам. Однако если рисунок перевернуть, вид поверхности меняется — цветные окружности проходят теперь по гребням.



мир, можно в том случае, если принять, что зрительная система устроена так, что выявляет эти законы организации и использует их при интерпретации сетчаточных изображений. Будем также считать, что при зрительном восприятии действуют некие запреты, обеспечивающие выбор наиболее правдоподобного варианта, при котором не нарушаются известные законы организации.

Прекрасным примером такого подхода являются работы по восприятию движения, выполненные Ш. Ульманом в Массачусетском технологическом институте. Ульман исследовал замечательную способность зрительной системы человека верно воспринимать объемность и характер движения объекта в ограниченных условиях — только по его перемещающимся двумерным проекциям (этот феномен Х. Уол-

лах и Д. О'Коннелл из Свартморского колледжа называют объемно-кинетическим эффектом). Например, если взять прозрачный мяч, разместить на его поверхности в случайном порядке небольшие лампочки и вращать его в затемненной комнате, то человек без труда воспримет траектории световых точек как окружности (см. верхний рисунок на этой странице). Как только вращение мяча прекращается, пропадает и ощущение объемного движения точек. Каким образом мы правильно воспринимаем данную трехмерную структуру, если движущимся двумерным сетчаточным проекциям могут соответствовать многие и многие реальные трехмерные структуры? С помощью математических расчетов Ульман показал, что если зрительная система учитывает законы проективной геометрии, а также тот факт, что в

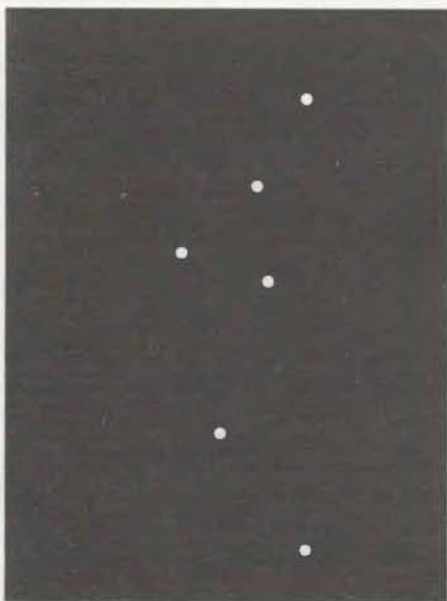
окружающем мире имеются твердые предметы, то в принципе может быть дана единственно верная интерпретация, причем для решения этой задачи достаточно иметь три наблюдения четырех не расположенных в одной плоскости световых пятен. Значит, зрительная система способна строить умозаключения, основываясь на законах проективной геометрии и на свойствах упорядоченности окружающего мира (в данном случае учитывать тот факт, что существуют твердые предметы), благодаря чему и дается правильная интерпретация видимого.

Здесь, однако, возникала неясность. С одной стороны, упоминавшиеся математические расчеты показывали, что, для того чтобы дать правильную интерпретацию в случае вращающегося прозрачного мяча с лампочками, достаточно предположения о твердости



ВРАЩАЮЩАЯСЯ СФЕРА видна, если три представленных здесь снимка быстро показать один за другим. Видимо, зрительная система дает трехмерную интерпретацию набора

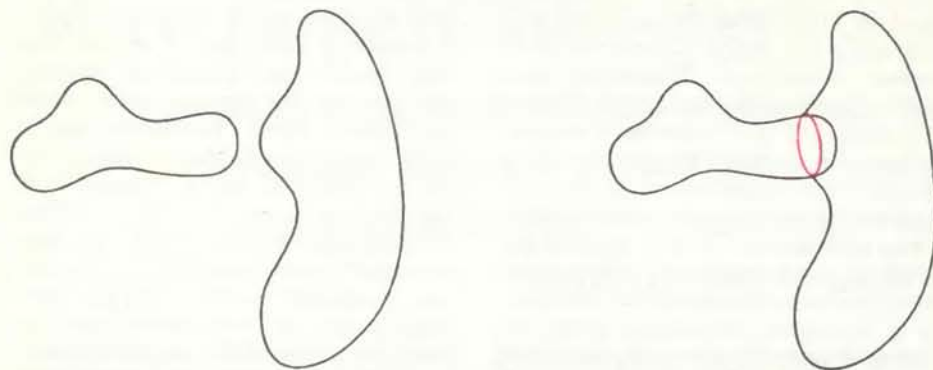
движущихся точек по имеющимся двумерным проекциям данного объекта в соответствии с правилом твердости тел.



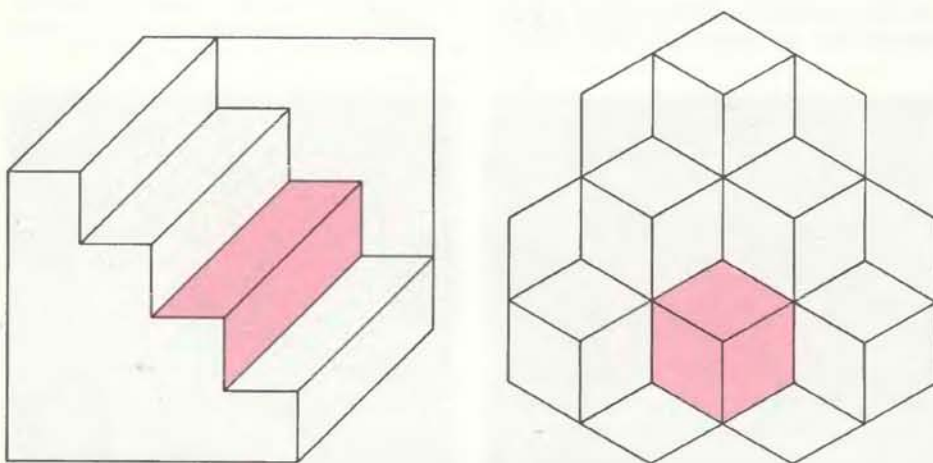
ИДУЩИЙ ЧЕЛОВЕК. В данном случае зрительная система выбирает трехмерную интерпретацию, согласующуюся с характером двумерных снимков движения точек, руководствуясь правилом твердости тел и правилом планарности. Эти изображения получены в эксперименте, который был

проведен в Университете г. Упсала Г. Йоханссоном. Экспериментатор прикрепил человеку к основным суставам тела (плечо, локоть, запястье, бедро, колено и лодыжка) небольшие электролампочки, снял на киноленту его перемещения в темноте и предъявлял испытуемым отдельные кадры.

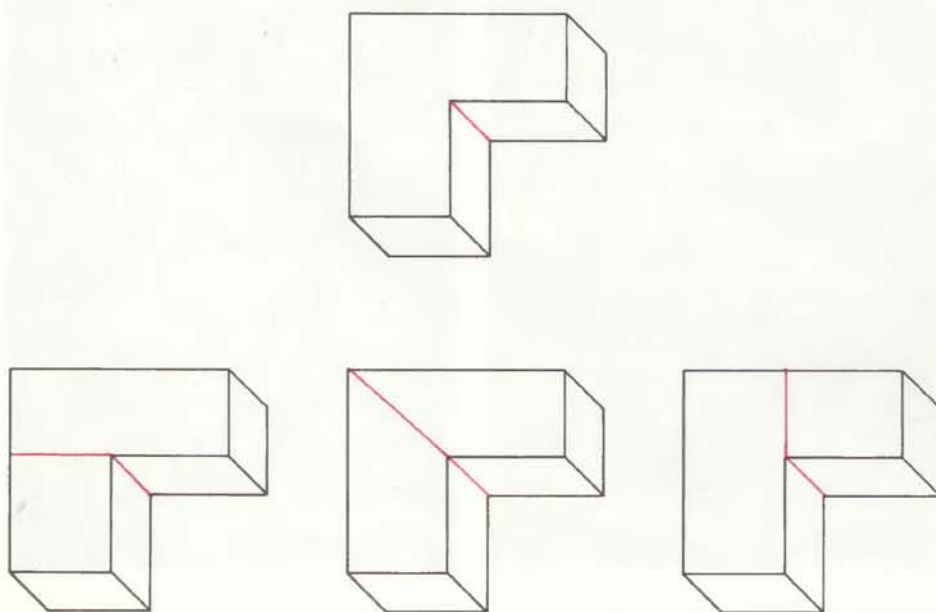




**ПРИНЦИП ТРАНСВЕРСАЛЬНОСТИ** лежит в основе некоторых зрительных иллюзий. Он заключается в том, что, если две поверхности пересекаются друг с другом произвольным образом, линия их пересечения всегда лежит в вогнутом изломе, что отмечено на рисунке цветной линией.



**ПРАВИЛО РАЗБИЕНИЯ** основано на принципе трансверсальности. Изображенные здесь фигуры являются перевертышами: фигура и фон обращаются. При этом кажущиеся границы частей меняют свое положение. Например, в «лестнице» (слева) две закрашенные грани в одном случае кажутся гранями одной ступеньки, а в другом выглядят принадлежащими соседним ступенькам. В иллюзии «груда кубиков» (справа) три закрашенные грани воспринимаются либо как грани одного кубика, либо, если фигура обращается, как грани трех разных кубиков.



**УГОЛЬНИК** демонстрирует, что правило разбиения объектов сложной формы по линиям пересечения в вогнутых изломах может давать разные варианты разделения на части одной и той же фигуры.

предметов. С другой стороны, из тех же расчетов следовало, что одного лишь допущения о твердости недостаточно для интерпретации подобных, но несколько отличающихся стимулов. Такие стимулы были придуманы Г. Йоханссоном из Университета г. Упсала в качестве примера так называемого «биологического движения» (см.: G. Johansson, "Visual Motion Perception", "Scientific American", June, 1975). Йоханссон укрепил на теле человека в местах основных суставов небольшие электрические лампочки, после чего снял на киноплёнку его передвижение в затемненной комнате. Отдельно взятый кадр выглядит как случайный набор белых точек на темном фоне. Если же прокрутить плёнку с помощью кинопроектора, движение этих точек воспринимается как конкретная трехмерная структура, в которой легко угадывается движущийся человек (см. нижний рисунок на с. 85).

Когда я и мой коллега Б. Флинчбау (сейчас он работает в фирме Bell Laboratories) занялись этой проблемой, нас привело в недоумение то, что можно без труда верно воспринимать трехмерную структуру, несмотря на отсутствие достаточной (по результатам Ульмана) информации. Для того чтобы на основе допущения о твердости предметов сделать правильный вывод относительно объемной формы данной структуры, необходимо иметь три моментальных снимка по крайней мере четырех точек, жестко соединенных друг с другом и не лежащих в одной плоскости. Однако при демонстрации «биологического движения» жестко соединены в лучшем случае только две точки, например лодыжка и колено или колено и бедро. «Жестких» четверок точек просто нет.

Недостаточность правила твердости предметов заставляет задать вопрос: «Какие еще закономерности может использовать зрительная система?» После ряда неудачных попыток решить проблему мы пришли к выводу, что дело должно быть, в наших знаниях об анатомическом строении тела. У большинства животных опорные конечности движутся при обычной ходьбе с ограничениями — каждая в своей плоскости (это определяется конструкцией суставов). Назовем эту особенность правилом планарной регулярности.

Оказалось, что этого правила достаточно, чтобы верно интерпретировать эффект «биологического движения» в случае ходьбы. Трехмерную структуру можно определить либо по трем моментальным снимкам двух точек, жестко движущихся в некоторой плоскости, либо по двум моментальным снимкам трех точек (например, лодыжки, колена и бедра), соединенных в жесткие пары и движущихся в одной плоскости. Такой вывод хорошо согла-

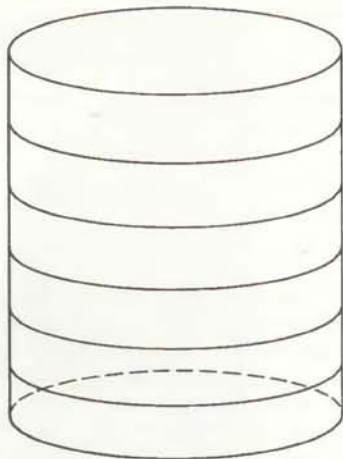


суется с наблюдением Йоханссона: для того чтобы правильно воспринять «биологическое движение», испытуемому требуется просмотреть всего два-три кадра снятого фильма. Оказалось также, что независимо от того, какое правило используется — правило планарной регулярности или правило твердости предметов — зрительная система дает правильную интерпретацию изображаемого движения.

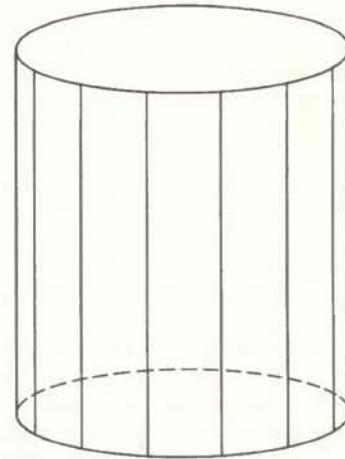
Короче говоря, вероятность ошибочной интерпретации равна нулю, если только считать пространственное разрешение выше, чем предельное разрешение, обеспечиваемое глазом. Если же фактическое пространственное разрешение хуже, чем идеальное, то вероятность ошибочной интерпретации лишь немного больше нулевой. Деформируемые (мягкие) объекты не могут быть восприняты как твердые (недеформируемые), а движение, происходящее в нескольких плоскостях, не может быть интерпретировано как совершающееся в одной плоскости. Таким образом, наличие определенной упорядоченности в окружающем мире является решающим при объяснении того, как зрительной системе удастся обеспечить единственно правильную интерпретацию изображений на сетчатке.

Вернемся теперь к поверхности, образованной вращающейся косинусоидой. В этом примере существенно, что зрительная система судит о структуре объекта исходя из формы его частей. Такой принцип очень важен при узнавании объекта по его форме. Впечатление от косинусоидной поверхности, т.е. представление о ее структуре, зависит от того, как перевернут рисунок. Следует ли из этого, что работа зрительной системы отличается непостоянством? Такое предположение маловероятно. Однако если ее работа не зависит от случайных факторов, значит, она выполняется по каким-то правилам, основанным на определенных закономерностях устройства окружающего нас мира.

Эти рассуждения побудили У. Ричардса (Массачусетский технологический институт) и меня заняться поиском закономерностей, на основе которых можно было бы составить свод правил для разбиения объектов (поверхностей) на части. В результате мы вывели следующий принцип, который можно назвать принципом трансверсальности, т.е. пересечения: если две поверхности произвольной формы пересекаются друг с другом случайным образом, то линия их пересечения представляет собой замкнутый контур, все точки которого являются точками вогнутого излома, образуемого плоскостями, тангенциальными к поверхностям в каждой точке пересечения (см. верхний рисунок на с. 86). Название



ЛИНИИ КРИВИЗНЫ на идеально цилиндрическом стакане. Линии наибольшей кривизны (слева) представляют собой окружности, линии наименьшей кривизны (справа) — отрезки прямой.

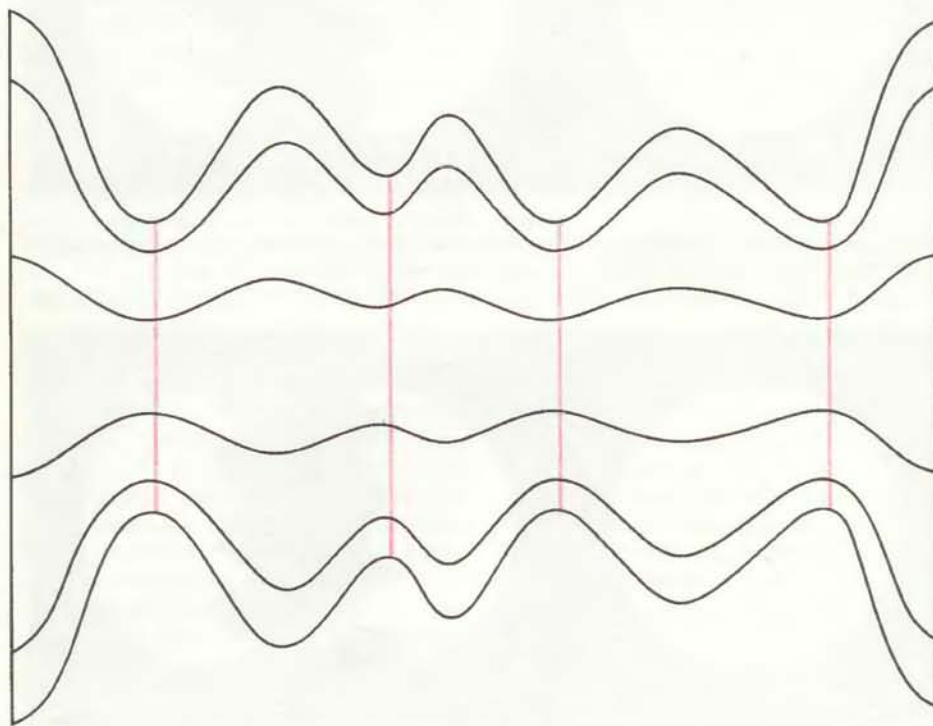


«принцип трансверсальности» звучит, пожалуй, как нечто эзотерическое. Однако на самом деле мы часто сталкиваемся с этим принципом в повседневной практике. Свеча в торте для именинника, зубцы вилки в куске бифштекса, сигарета во рту — все это примеры принципа трансверсальности.

Исходя из принципа трансверсальности, можно предложить правило разделения поверхности на части: разбивать поверхность на части следует по всем контурам вогнутых изломов. Это правило нельзя применить к поверхности вращения косинусоиды, поскольку она нигде не имеет изломов, значит его нужно сформулировать в более общем виде, что и будет сделано

далее. А его частный случай, сформулированный выше, может объяснить некоторые хорошо известные перцептивные феномены.

В качестве примера рассмотрим изображение «лестницы» (см. средний рисунок на с. 86). Согласно правилу, частями этой фигуры будут «ступеньки», каждая из которых ограничена двумя последовательными вогнутыми изломами. То же самое правило позволяет сделать и менее очевидное предсказание: поскольку данная фигура является перцептивно обрабатываемой (перевертышем), т.е. фигура и фон меняются местами, при ее обращении границы ступенек должны сдвигаться, ведь, по нашему определению, только контуры вогнутых мест соприкосновения по-



ГРАНИЦЫ МЕЖДУ ЧАСТЯМИ фигуры (выделены цветом) определяются по правилу разбиения плавных поверхностей. Черным нарисованы линии наибольшей кривизны, через минимумы которых проходят границы.



верхностей обозначают границы ступенек. То, что кажется вогнутым с одной стороны поверхности, представляется выпуклым с другой. Когда происходит обращение «лестницы», выпуклые участки воспринимаются как вогнутые, что приводит к изменению границ ступенек. Вы можете убедиться в этом сами: на рисунке одна ступенька закрашена и, когда фигура обращается, одна цветная грань переходит на соседнюю ступеньку.

Аналогично воспринимается более сложное изображение — «груда кубиков». Три закрашенные грани, которые в первый момент кажутся расположенными на одном кубе, при обращении фигуры оказываются принадлежащими трем разным кубикам.

Из правила разбиения следует еще одно предсказание. Если, согласно этому правилу, не существует единственного способа разбиения данной поверхности, то возникает ситуация перцептивной неоднозначности (если только нет дополнительных правил, устраняющих неоднозначность). Посмотрите на нижний рисунок на с. 86, где изображен многогранник типа «угольник». Единственным контуром вогнутости в этой фигуре является наклонная линия в изгибе угла. Вследствие этого уголь-

ник нельзя разбить на части однозначно. С перцептивной точки зрения имеются три возможных способа разбиения. Все они исходят из одного и того же контура, но результат получается разный.

Даже это несложное правило разбиения позволяет сделать интересные выводы о процессе восприятия формы. Однако, для того чтобы это правило можно было применить к косинусоидной и другим гладким поверхностям, его следует обобщить. Для этого нам потребуется сделать некоторое отступление в область дифференциальной геометрии и ввести три важных понятия: нормаль к поверхности, главную кривизну и линию кривизны. Эти понятия чисто математические, однако, к счастью, их можно легко определить «на пальцах».

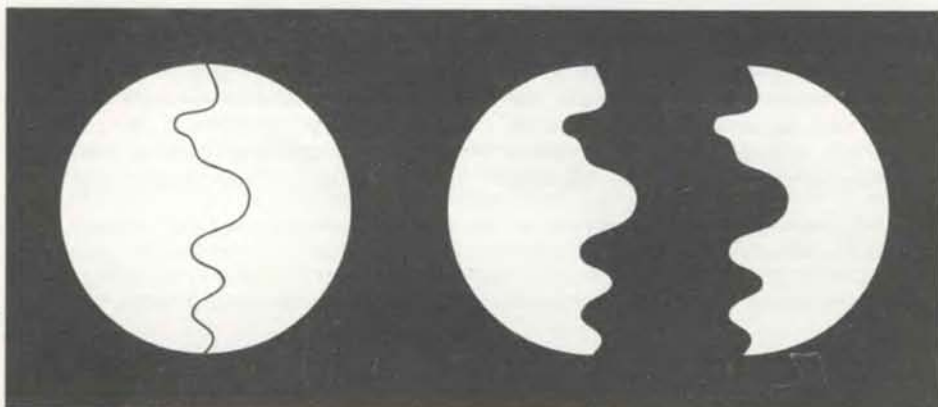
Нормаль к поверхности в некоторой ее точке можно мысленно представить себе как иголку единичной длины, выходящую из поверхности под прямым углом (как колючки у морского ежа). Множество нормалей всех точек данной поверхности называется полем поверхностных нормалей. Таких полей может быть два — одно снаружи объекта, другое — внутри. Например, для сферы все нормали к поверхности на-

правлены по радиусам от центра (как колючки) или же к центру сферы. Примем для определенности, что поле нормалей к поверхности всегда находится внутри объекта. Тогда для бейсбольного мяча все нормали будут направлены внутрь ограниченной им сферы, а для пузырька воздуха под водой — наружу от нее. Если при рассматривании некоторой поверхности происходит обращение фигуры и фона, то соответственно будет меняться и положение нормалей к поверхности. А вследствие обращения поля нормалей во всех точках поверхности изменится знак главной кривизны.

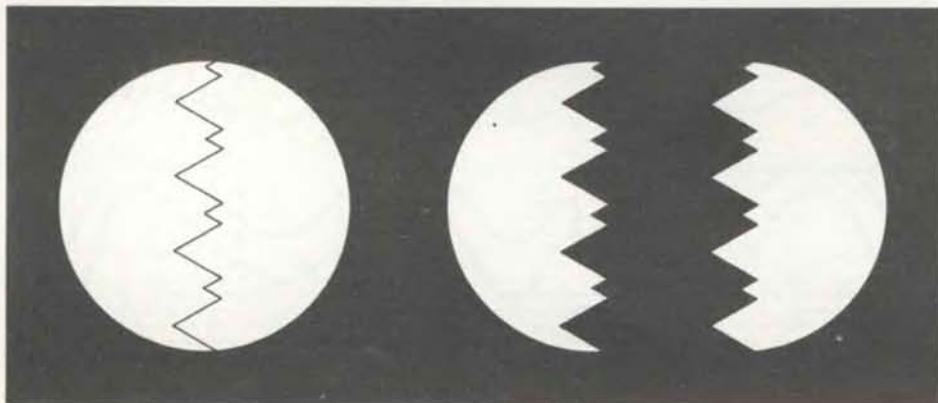
Часто бывает важно знать не только нормаль к поверхности, но и кривизну поверхности в данной точке. В XVIII в. Леонард Эйлер показал, что в каждой точке любой поверхности всегда имеется, во-первых, направление, в котором кривизна поверхности наименьшая, а во-вторых, направление, в котором кривизна поверхности наибольшая, причем они взаимно перпендикулярны (для плоскости и сферы кривизна в каждой точке одинакова во всех направлениях). Эти два направления и соответствующие им значения кривизны называются главными. Если двигаться из некоторой точки поверхности все время в направлении максимальной главной кривизны, то траектория движения окажется линией наибольшей кривизны. Если двигаться в направлении минимальной главной кривизны, то получится линия наименьшей кривизны. Например, на поверхности стакана семейство линий наибольшей кривизны — это множество окружностей, параллельных краю стакана, а линии наименьшей кривизны — прямые, параллельные его продольной оси (см. верхний рисунок на с. 87).

Пользуясь этими понятиями, можно легко сформулировать правило пересечения для общего случая гладких поверхностей. Допустим, что в тех местах поверхности, где имеются вогнутости в виде резких изломов, мы будем сглаживать их тем или иным способом. Например, можно считать, что поверхность — это тугая кожа и в месте излома ее можно натягивать. Тогда вогнутый излом становится, грубо говоря, углублением, в котором поверхность имеет наибольшую отрицательную кривизну. Более точная формулировка обобщенного правила разбиения поверхностей звучит так: разделять данную поверхность на части следует в минимумах линии наибольшей кривизны вдоль соответствующей линии наименьшей кривизны (см. нижний рисунок на с. 87).

Согласно этому правилу, косинусоидная поверхность разбивается на части вдоль цветных окружностей. Легко также объяснить, почему, если перевернуть рисунок, поверхность делится

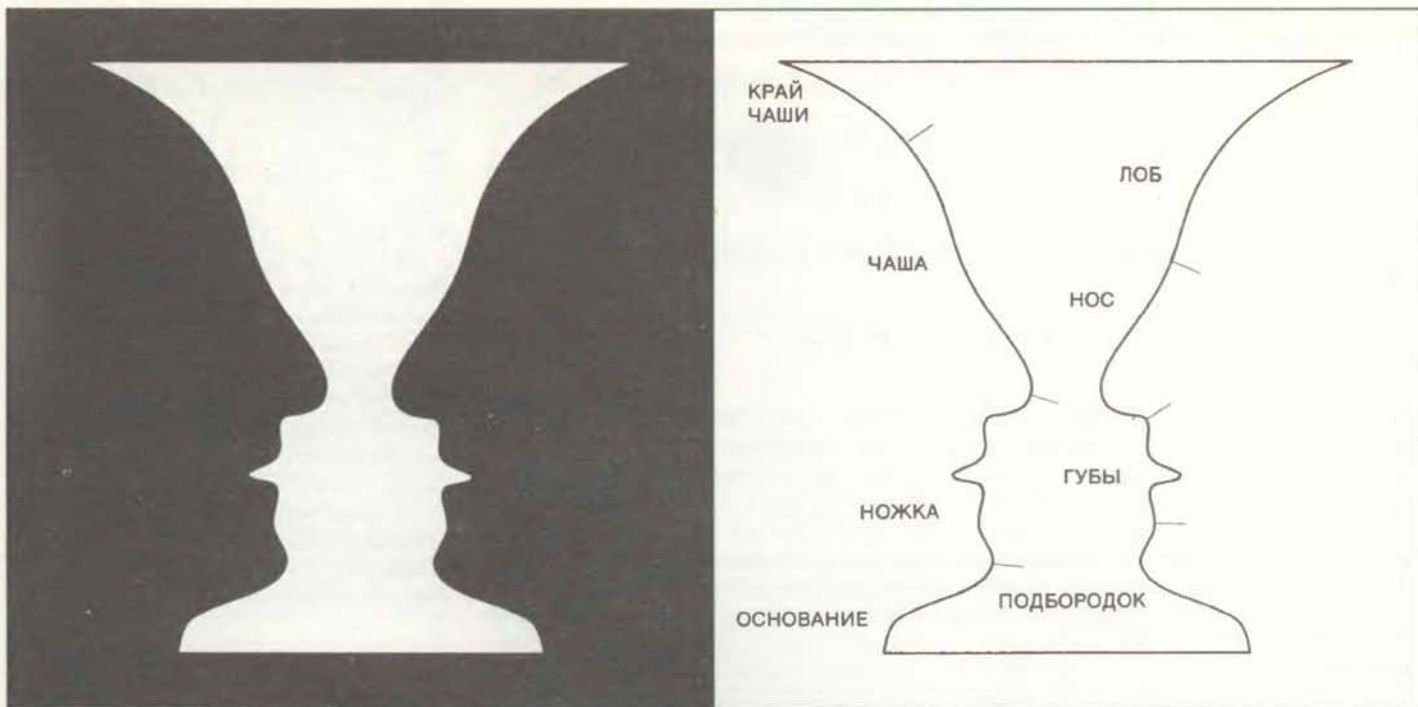


ПЛАВНЫЙ КОНТУР-ПЕРЕВЕРТЫШ получается, если разрезать круг на две части по произвольной кривой линии и раздвинуть части. Восприятие контура зависит от того, с какой стороны этой линии плоскость считается принадлежащей фигуре.



ЛОМАНЫЙ КОНТУР-ПЕРЕВЕРТЫШ получается, если разрезать круг по ломаной линии. Он воспринимается либо как цепь высоких и низких гор, либо, если фигура и фон меняются местами, как цепь гор с двойными вершинами.





ИЛЛЮЗИЯ «ЛИЦО—ВАЗА», придуманная Рубином. Изображенная фигура воспринимается либо как два человеческих профиля, либо как ваза. Если в качестве фигуры выбирается лицо, то правило разбиения фигуры на части по миниму-

мам кривизны заставляет видеть контур состоящим из лба, носа, двух губ и подбородка. Если же в качестве фигуры зрительная система выбирает вазу, тот же контур делится на иные части — чашу, край чаши, ножку и основание вазы.

иначе: в этом случае для зрительной системы разделение поверхности на части «фигура» и «фон» меняется на обратное (возможно, вследствие того, что предпочтительнее интерпретация объекта как расположенного ниже, а не выше глаз наблюдателя). Когда фигура и фон в восприятии меняются местами, поле нормалей к поверхности обращается. Ясно, что, когда нормали обращаются, меняется и знак главной кривизны. В результате этого минимумы главной кривизны становятся максимумами и наоборот. Поскольку границы, по которым разбивается фигура, проходят через минимумы, они должны сдвинуться.

Таким образом, принцип трансверсальности дает универсальное объяснение особенностям восприятия как гладких, так и изломанных поверхностей. Исходя из него, можно также объяснить зрительные иллюзии другого хорошо известного класса — обращения кривых на плоскости. Хорошим примером иллюзии такого рода служит фигура, придуманная Ф. Эттнивом из Орегонского университета (см. верхний рисунок на с. 88). От обнаружил, что если провести поперек круга кривую линию, разрезать по ней круг и раздвинуть пополам, то получаются два совершенно по-разному выглядящих контура. Эттнив отмечает, что впечатление от контура зависит от того, какую его сторону считать принадлежащей фигуре, и совершенно неважно, была ли до этого форма контура известна испытуемому (см.: F. Attneave, "Multistability

in Perception", "Scientific American", December, 1971).

**КАК НА** основе принципа трансверсальности объяснить феномен, описанный Эттнивом? Отвечать на этот вопрос будем в три приема. Вначале мы распространим принцип трансверсальности на случай двух измерений, затем сделаем небольшое отступление в область дифференциальной геометрии для случая кривых на плоскости и, наконец, сформулируем правило разбиения плоских кривых.

Принцип трансверсальности для плоских фигур аналогичен его трехмерному варианту. Если две поверхности произвольной формы случайным образом пересекаются, то на любой их проекции на плоскость в месте их пересечения имеется вогнутый излом. Отсюда следует такое правило разбиения кривых на плоскости: разделять плоскую кривую на части нужно в точках перегиба, где имеется вогнутость. Это правило нельзя применить к фигурам Эттнива, поскольку там линии разреза везде плавные, так что его следует сформулировать более общим образом. Тем не менее и в частном виде правило может быть использовано для объяснения восприятия такой фигуры Эттнива, в которой линия разреза не везде плавная.

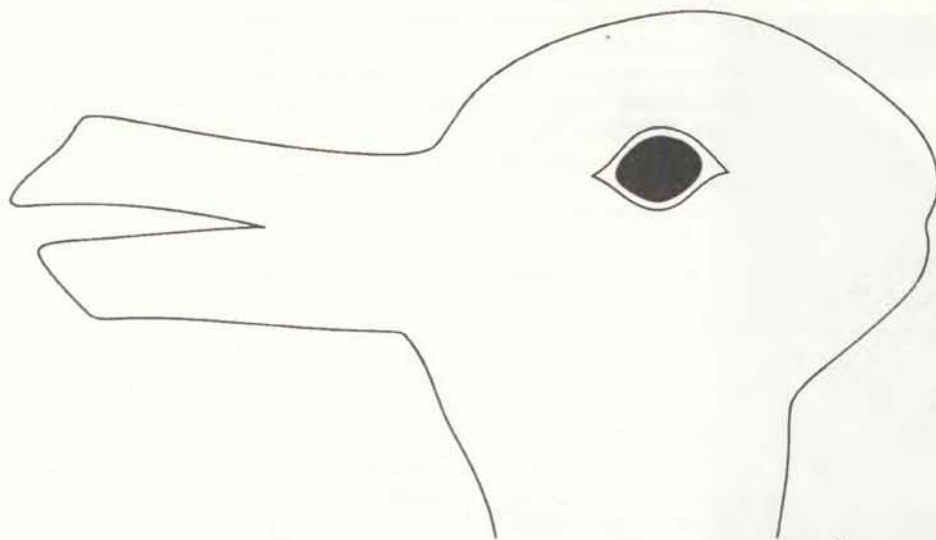
На рисунке (с. 88, внизу) круг слева разрезан так, что может выглядеть либо как цепь чередующихся высоких и низких гор, либо — при обращении фигуры и фона — как цепь высоких го-

рок с двойными вершинами. При обращении фигуры и фона этот контур разбивается на части иначе, потому что согласно принципу трансверсальности, границы между частями проводятся через точки перегиба только в местах вогнутостей. Точки перегиба, относящиеся к вогнутостям, становятся точками перегиба на выпуклостях, когда происходит обращение и фигурой считается другая сторона контура. И наоборот. Этот пример совершенно аналогичен «лестнице», описанной выше.

Прежде чем обобщать правило для случая плавных кривых, следует определить такие понятия из дифференциальной геометрии плоских кривых, как нормаль и кривизна. Нормаль в данной точке кривой можно представить себе как иглу единичной длины, торчащую перпендикулярно кривой в этой точке. Множество нормалей всех точек кривой составляет поле нормалей. Для всякой кривой имеются два поля нормалей — с одной ее стороны и с другой. Будем всегда выбирать поле нормалей, направленное в ту сторону от кривой, которая считается принадлежащей фигуре. Если фигура и фон в восприятии меняются местами, соответственно обращается поле нормалей. Важно отметить, что в таком случае вогнутые участки плавной кривой будут иметь отрицательную кривизну, а выпуклые — положительную.

Теперь несложно сформулировать правило разбиения для общего случая плоских кривых. Допустим, что в каждом месте фигуры, где имеется излом,





ИЛЛЮЗИЯ «УТКА—КРОЛИК» не основана на обращении фигуры и фона. Хотя фигуру интерпретировать можно двояко, границы частей, которые проводятся по минимумам кривизны, не смещаются. Уши кролика превращаются в клюв утки, но это одна и та же часть фигуры.

кривую можно немного сгладить. Тогда вогнутый излом становится участком с отрицательной кривизной, причем наибольшее абсолютное значение кривизны будет в бывшей точке излома. Отсюда вытекает следующее обобщенное правило разбиения: делить плоскую кривую на части нужно в минимумах кривизны.

Теперь можно объяснить, почему две половины фигуры Эттнива выглядят по-разному. Когда фигура и фон в восприятии меняются местами, поле нор-

малей в соответствии с нашим допущением обращается. А когда обращаются нормали, в каждой точке данной кривой изменяется знак кривизны. В частности, минимумы кривизны становятся максимумами и наоборот. Изменение положения минимумов кривизны должно, согласно правилу, дать новый вариант разбиения. Резюмируя, можно сказать, что эти кривые выглядят различными потому, что они состоят из разных единиц восприятия. Отметим, что если разбивать контур на части



ТЕСТ ПОЛУМЕСЯЦА показывает, что оценку сходства формы двух фигур можно предсказать исходя из правила разбиения по минимумам кривизны. И действительно, с первого взгляда нижняя фигура справа кажется больше похожей на левую, чем верхняя. На самом деле контур верхней правой фигуры совершенно идентичен контуру левой, тогда как контур нижней фигуры есть зеркальное отражение контура левой фигуры.

просто по точкам перегиба, т.е. и по максимумам и по минимумам кривизны, то единицы восприятия при обращении фигуры и фона не изменятся.

Эффектный пример двоякого разбиения одного и того же контура представляет собой известная иллюзия «лицо — ваза», придуманная еще в начале XX в. Э. Рубином (см. рисунок на с. 89). Если в качестве фигуры воспринимается лицо, то минимумы кривизны разбивают кривую на участки, соответствующие лбу, носу, верхней губе, нижней губе и подбородку. Если же фигурой считается ваза, то максимумы кривой становятся минимумами и кривая разделяется на другие части: основание, ножку, чашу и край чаши. Вероятно, неслучайно, что для частей, определяемых минимумами кривизны поверхности, в языке есть соответствующие отдельные слова.

БЫЛИ придуманы также фигуры, в которых, подобно иллюзии «ваза — лицо», один и тот же контур можно интерпретировать по-разному, хотя при этом фигура и фон и не обращаются. Рассмотрим известную иллюзию такого рода, которую называют «кролик — утка» (см. верхний рисунок на этой странице). Обращения фигуры и фона нет, минимумы кривизны не меняют своего положения и, согласно правилу разбиения, границы частей фигуры одни и те же для обеих интерпретаций. Это легко проверить. В самом деле, уши кролика и клюв утки представляют собой одну и ту же часть фигуры.

Если правило разбиения кривых по минимумам действительно используется зрительной системой человека, то следует ожидать, что оно участвует и в оценке сходства разных фигур по форме. На нижнем рисунке изображена такая фигура, по отношению к которой правило дает иное предсказание, чем то, которое следует считать правильным. Быстро взгляните на левую часть рисунка, а затем так же быстро посмотрите на правую. Определите, какая из двух фигур в правой части рисунка больше похожа на левую фигуру. Экспериментируя с несколькими фигурами такого типа, А. Бобик из Массачусетского технологического института и я обнаружили, что почти все испытуемые выбирают в качестве более похожей нижнюю из двух фигур. Однако если вы посмотрите внимательнее, то заметите, что извилистый контур верхнего «полумесяца» справа идентичен контуру левой фигуры — надо только поменять местами фигуру и фон. Что касается контура нижней правой фигуры, то он является зеркальным отражением контура левой фигуры. Части, определяемые по минимумам кривизны, поменялись местами. Почему нижняя из двух фигур справа кажется более похожей на исходную? Простой ответ



на этот вопрос дает правило разбиения контура по минимумам кривизны. Контур нижней правой фигуры, который не подвергся обращению, поскольку фигура и фон не менялись местами, состоит из тех же самых частей, что и контур левой фигуры. Напротив, контур верхней фигуры, который является обращенным по отношению к исходному, разделяется на части по-другому.

Итак, сделаем вывод. Процесс зрительного восприятия есть процесс активный, его роль — получить адекватное описание внешнего мира по меняющимся световым сигналам, попадающим на сетчатки глаз. Этому описанию можно, так сказать, верить только в той степени, в какой при его построении используются правила организации, отражающие различные аспекты упорядоченности окружающего мира, например твердость предметов, планарность и трансверсальность. Открытие такого рода правил и математическое изучение их роли в зрительном восприятии представляются весьма перспективным направлением исследования зрительной системы человека.

## Издательство МИР предлагает:

**Д. Кнут**  
**ИСКУССТВО**  
**ПРОГРАММИРОВАНИЯ**  
**ДЛЯ ЭВМ**

**Том 3**  
**Сортировка и поиск**

Перевод с английского

Третий том известной монографии одного из крупнейших американских специалистов по программированию Д. Кнута (первый том вышел в издательстве «Мир» в 1976 г., второй — в 1977 г.) состоит из двух частей: «Сортировка» и «Поиск». В них подробно исследуются различные алгоритмы внутренней и внешней сортировки, изучаются методы поиска информации в таблицах на основе сравнения или преобразования ключей, даются оценки эффективности предлагаемых алгоритмов.

1978, 64,53 л. Цена 4 р. 80 к.



## Наука вокруг нас

Помещая на поверхность воды  
капельки масла или других веществ,  
можно наблюдать  
много интересных явлений

**ДЖИРЛ УОЛКЕР**

**Ч**ТО ПРОИЗОЙДЕТ, если капельку масла или какой-нибудь другой жидкости поместить на поверхность воды? Если эта жидкость растворима в воде, то капля быстро исчезнет в массе раствора. Если же жидкость нерастворима в воде (например, керосин), то капля останется на том же месте. Если же добавляемое вещество имеет промежуточную растворимость, как, например, оливковое масло, то капелька может растечься по поверхности воды, образуя тончайшую невидимую пленку. При добавлении следующих капель масло будет собираться в виде шариков или пятен. Какие же закономерности управляют поведением капель на поверхности воды?

Однозначно ответить на этот вопрос оказывается нелегко. Частично поведение капли на поверхности воды определяется сложными (в основном электрическими) взаимодействиями между молекулами на поверхности. Недавно Ф. Виссинг из Датского королевского стоматологического колледжа прислал мне рукопись, посвященную экспериментам по растворимости олеиновой кислоты (основной составной части оливкового масла) и керосина в воде. Его работа, которая задумывалась как серия демонстрационных опытов для учащихся, дает представление о некоторых любопытных аспектах свойства растворимости.

Растворимость химического соединения в воде зависит от степени связи между его молекулами и молекулами воды. Степень растворимости определяется конкуренцией между внутримолекулярными связями и связями между молекулами этого соединения и воды.

Органические соединения имеют различную растворимость в воде. Без этого разнообразия на Земле не было бы жизни. В состав нерастворимых органических соединений входят группы атомов, которые образуют всего несколько связей с молекулами воды (в некоторых случаях такие связи вообще не образуются). Подобные группы, как и молекулы веществ, не растворяющихся в воде из-за наличия таких групп, называют гидрофобными. Дословное понимание этого термина

может ввести в заблуждение, так как оно предполагает отталкивание между водой и другими молекулами (или группами). На самом деле причина здесь не в отталкивании, а в том, что возникающие связи оказываются слишком слабыми и сцепление между молекулами воды (когезия) препятствует внедрению гидрофобного соединения.

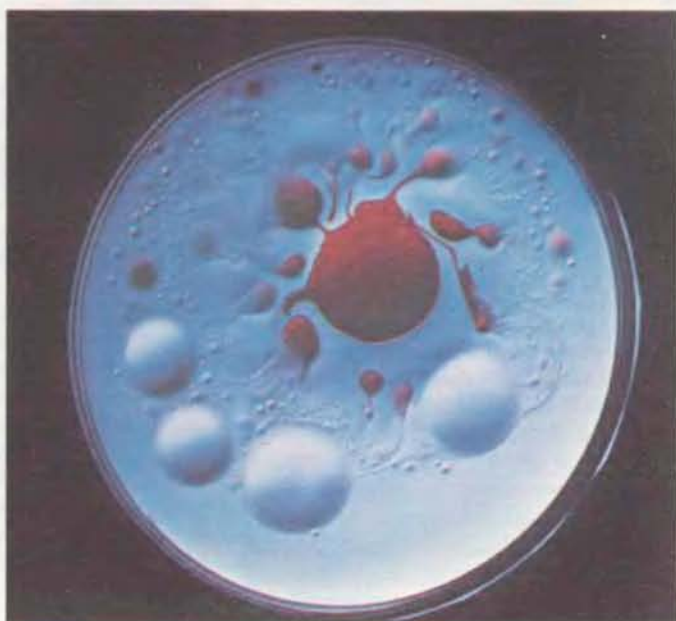
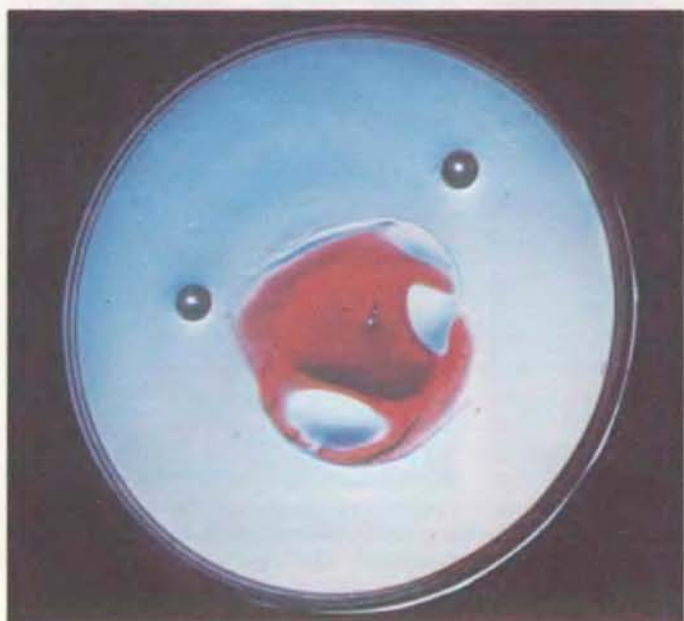
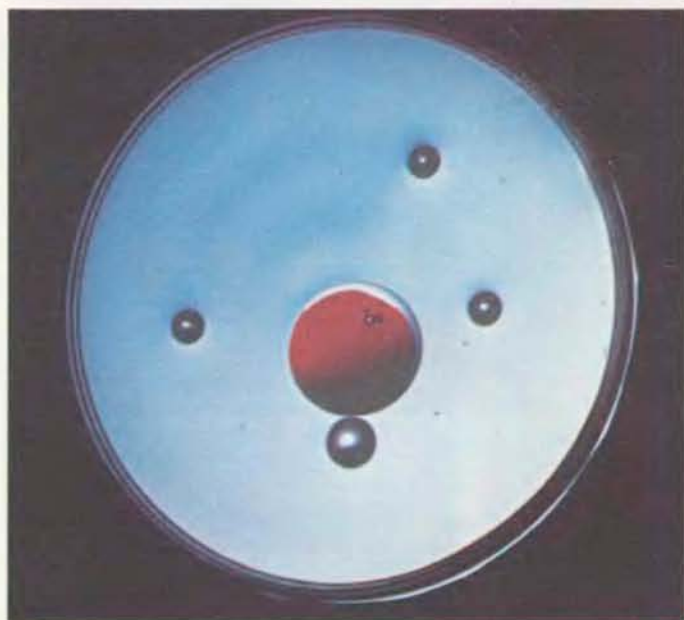
Примером гидрофобного соединения может служить керосин. Он состоит только из гидрофобных групп, включающих атомы углерода и водорода. Поскольку углеводородные группы почти не образуют связей с молекулами воды, капелька керосина, если ее опустить на поверхность воды, останется совершенно невредимой. Благодаря собственной массе капелька чуть вдавится в воду, но ни раствориться, ни растечься по поверхности она не может.

Многие другие органические вещества частично растворимы в воде благодаря тому, что некоторые их атомные группы могут образовывать прочные связи с молекулами воды. Чем больше таких групп входит в состав химического соединения, тем в большей степени оно растворимо. Так, например, в воде легко растворяется глюкоза, обладающая шестью гидроксильными группами (ОН), которые образуют прочные связи с молекулами воды.

Олеиновая кислота занимает промежуточное положение между керосином и глюкозой. На одном конце ее молекулы расположена группа  $\text{COOH}$ , образующая прочные связи с водой; такие группы называют гидрофильными. Остальная часть молекулы, представляющая собой цепочку из углеводородных групп, является гидрофобной. Двойственная природа молекулы олеиновой кислоты объясняет способность этого соединения растекаться по водной поверхности слоем толщиной всего в одну молекулу.

Виссинг поставил перед собой цель продемонстрировать различия в растворимости керосина (гидрофобного соединения) и олеиновой кислоты (обладающей частично гидрофильными свойствами). Он проводил эксперименты в абсолютно чистых чашках Петри диаметром 9 см. (Всякое загрязнение,





Опыты Виссинга, в которых капля олеиновой кислоты захватывает капли керосина на поверхности воды



даже отпечаток пальца на стенке сосуда, может создать на поверхности воды посторонний мономолекулярный слой, способный исказить результаты опытов.) Чашка помещалась на объектный столик вертикального проектора, а для того, чтобы весь световой поток проходил только через доньшко чашки, огораживалась черной бумагой. Прибор позволял получать на потолке десятикратно увеличенное изображение всего, что происходило в чашке Петри. Этого было вполне достаточно, чтобы весь класс мог следить за тем, как Виссинг добавляет в воду капли разных органических жидкостей. Я смог успешно повторить его эксперименты у себя дома, хотя олеиновую кислоту пришлось заменить очищенным оливковым маслом.

Сначала Виссинг демонстрировал полную нерастворимость керосина, помещая каплю керосина на поверхность дистиллированной воды. Поскольку керосин нерастворим, капля покоилась на воде, приняв чечевицеобразную форму. По мере того как на воду попадали следующие капли, некоторые из них сливались вместе, образуя «чечевицы» большего размера, но ни одна из них не растворялась и не растекалась по поверхности воды.

Затем Виссинг ставил три аналогичных опыта, но теперь в чашках Петри содержались другие растворы — соляная кислота, едкий натр (гидроксид натрия) и нашатырный спирт (гидроксид аммония) в концентрации 0,1 моль на литр. В каждом из сосудов добавляемый керосин образовывал чечевицеобразные капли, не растекаясь по поверхности и не растворяясь в массе жидкости.

Повторяя такой же опыт с каплями олеиновой кислоты, Виссинг получал более интересные результаты. Для того чтобы сделать капли более заметными, он добавлял в кислоту небольшое количество индикатора суданового красного. Когда капля олеиновой кислоты помещалась в чистую воду, на поверхности образовывалась ударная волна, как от сильного сотрясения сосуда. Капля быстро растекалась по всей поверхности, образуя столь тонкую пленку, что красный индикатор в ней был совершенно не заметен. Часть кислоты стекалась в большую чечевицеобразную каплю и несколько капель меньшего размера.

В моих экспериментах для манипуляции с крошечными капельками оливкового масла я использовал разогнутую канцелярскую скрепку, которую предварительно очистил с помощью моющих средств, а затем прогрел с одного конца до красного каления. Капелька, сброшенная на воду, немедленно исчезала, растекаясь по поверхности и образуя слишком тонкую пленку, чтобы ее можно было наблюдать непосредственно или по радужным разводам, возникающим благодаря интерференции света. Видимо, поверхность оказывается почти полностью покрытой слоем масла, так как следующая капля уже несколько минут остается на месте и лишь затем постепенно растекается, образуя пленку; в одних местах она видна невооруженным глазом, в других она по крайней мере достаточно толстая, чтобы в ней благодаря оптической интерференции можно было наблюдать радужные полосы.

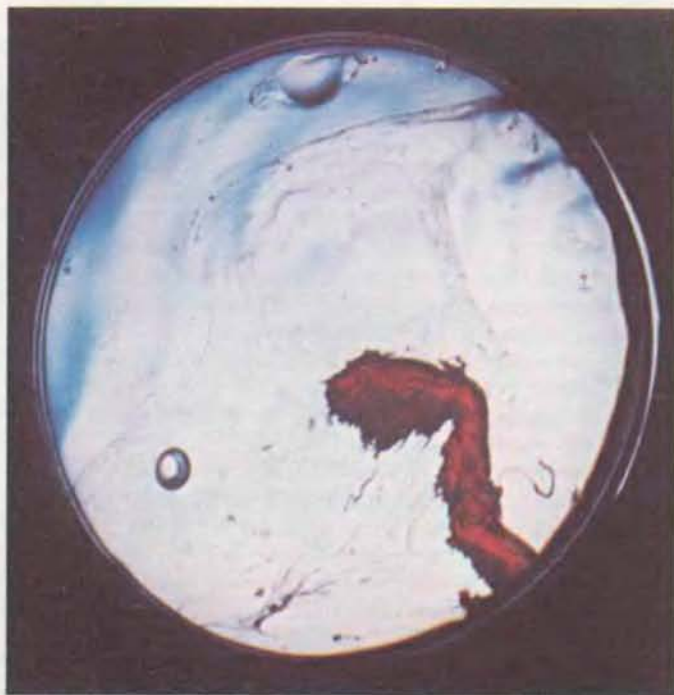
Когда Виссинг добавлял каплю олеиновой кислоты в чашку с разбавленной

соляной кислотой, она снова растекалась по поверхности раствора, образуя большую «лужу». На этот раз «чечевица» получалась значительно более плоской, занимая чуть ли не всю чашку. При добавлении олеиновой кислоты в раствор едкого натра образовывалась «чечевица» неправильной формы. Олеиновая кислота узкими ручейками медленно растекалась в стороны от капли. Через 20 мин «чечевица» исчезла, и в чашке остался мутный раствор.

Капля олеиновой кислоты, добавленная в раствор нашатырного спирта, растекалась по поверхности небольшими потоками, отделенными друг от друга зонами чистого раствора. Когда капля исчезала и кислота переставала взаимодействовать с нашатырным спиртом, поверхность раствора снова становилась спокойной. Продукты реакции плавали на поверхности, но раствор оставался прозрачным.

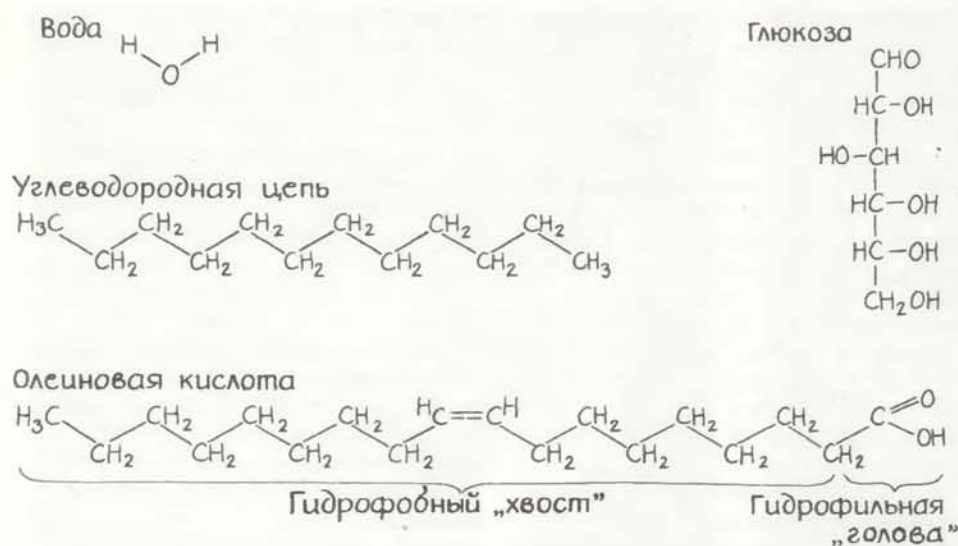
Виссинг поставил перед собой задачу — объяснить все эти типы взаимодействий с помощью сил, действующих между олеиновой кислотой и разными растворами. Простейшая из этих сил — сила тяжести, которая вдавливает каплю олеиновой кислоты в раствор, стремясь распределить ее по всей поверхности. Еще одна сила, возникающая благодаря вытеснению некоторой части раствора, — это выталкивающая сила.

Более сложными (и более интересными) оказываются разнообразные электрические взаимодействия, которые могут происходить между молекулами капли и молекулами в растворе. Рассмотрим простейшие квантово-механические модели этих сил, а затем проследим, как Виссинг применяет эти



*Воздействие нашатырного спирта на керосин и олеиновую кислоту*





Некоторые основные молекулярные структуры

модели для объяснения своих экспериментов. При этом необходимо иметь в виду, что все разбираемые здесь модели обладают одним недостатком — приближенным квантовомеханическим описанием.

Если молекула в целом имеет электрический заряд, то она может образовывать связи с другими молекулами за счет электростатических взаимодействий. Например, молекула, имеющая суммарный (резльтирующий) положительный заряд, притягивает молекулу с отрицательным зарядом и образуется так называемая ионная связь. Электростатическое притяжение другого типа наблюдается в тех случаях, когда одна или обе молекулы обладают электрическим моментом. (Электрический момент характеризует распределение заряда в молекулах несферической формы.) Даже если молекула электрически нейтральна, центр отрицательного заряда (создаваемого электронами) не обязательно должен совпадать с центром положительного заряда (создаваемого протонами). Если центры зарядов не совпадают, то вокруг молекулы создается электрическое поле. Если же поля двух таких молекул перекрываются, то молекулы вступают во взаимодействие.

Еще один механизм притяжения может действовать в тех случаях, когда молекула, обладающая сильным электрическим моментом, оказывается вблизи от молекулы, не имеющей электрического момента. Электрическое поле первой молекулы может сместить распределение заряда во второй молекуле, порождая таким образом силу притяжения. Например, первая молекула может так переориентировать электронные орбитали (орбиты) во второй молекуле, что центр распределения отрицательного заряда окажется дальше, чем центр распределения положительного заряда.

Широко распространенным взаимодействием между молекулами с постоянным электрическим моментом является водородная связь, образующаяся с участием атома водорода. Вода обладает сильными когезионными свойствами именно благодаря водородной связи. Молекула воды состоит из одного атома кислорода и двух атомов водорода. Ее конфигурация напоминает широкую букву V с атомом кислорода, расположенным в основании. Хотя молекула воды нейтральна, электроны каждого атома водорода сильно притягиваются большим ядром атома кислорода. Таким образом, в молекуле устанавливается внутреннее распределение заряда, создающее вокруг нее электрическое поле.

Более просто это можно представить так: водородные концы молекулы несут положительный заряд, а кислородное основание — отрицательный. Однако не следует увлекаться чрезмерным упрощением, считая, что в молекуле воды атомы водорода теряют свои электроны. Чтобы указать на наличие электрического момента, говорят, что эта молекула полярна.

Представим две соседние молекулы воды, расположенные относительно друг друга так, как показано на рисунке вверху на с. 96. Один из атомов водорода в молекуле слева связывается с атомом кислорода в молекуле справа, образуя водородную связь. По своей природе действующее здесь притяжение является электрическим, при котором положительный конец одной молекулы притягивается к отрицательному концу второй. Левая молекула (называемая донором водорода) не теряет ни одного атома, равно как в правой молекуле (акцепторе водорода) не становится ни на один атом больше. Промежуточный атом водорода расположен ближе к одному из атомов кислорода — считается, что он при-

надлежит обеим молекулам, хотя между ним и донором существует более сильная связь.

При всей наглядности изложенного здесь представления о водородной связи следует отметить, что ни одна из созданных до сих пор математических моделей не дает ее удовлетворительного описания. На самом деле взаимодействие двух молекул гораздо сложнее простой статической картины. В воде наиболее устойчивая конфигурация возникает в том случае, когда каждая молекула объединена с соседними четырьмя водородными связями, причем в двух из них центральная молекула выступает в качестве донора водорода, а в двух других — в качестве акцептора. И даже в этом случае, когда конфигурация оказывается наиболее устойчивой, водородные связи могут растягиваться, вращаться и разрываться. Без этой структурной гибкости вода не обладала бы текучестью. Расположение молекул не может быть статическим даже тогда, когда вода просто хранится в каком-либо сосуде: связи постоянно разрушаются и создаются.

Вода часто служит хорошим растворителем, так как ее молекулы достаточно малы и могут близко подходить к молекулам растворимого вещества. Если молекулы этого соединения имеют результирующий заряд, то вода благодаря силам электростатического притяжения образует с ними ионные связи, приближаясь к заряженной молекуле либо атомом водорода, либо атомом кислорода. В тех местах, где молекула содержит полярные группы, вода может образовывать водородные связи.

Вообще говоря, в создании водородных связей участвуют только атомы водорода и кислорода. Атом углерода обычно окружен атомами водорода (которые образуют углеводородные группы), и связь с молекулами воды не возникает. Более того, атом углерода не создает электрического момента, который позволил бы образовать полярную группу. Это различие в степени связывания между углеродом и кислородом является основной причиной того, почему углеводородные группы олеиновой кислоты оказываются гидрофобными, в то время как группа  $\text{COOH}$  на конце ее молекулы гидрофильная.

Дополнительные связи могут иногда образовываться благодаря диссоциации воды на ионы  $\text{H}^+$  и  $\text{OH}^-$ . Эти ионы присоединяются к тем участкам молекулы, которые обладают зарядом или электрическим моментом. И наконец, растворимое вещество может диссоциировать, предоставляя молекулам воды дополнительный атом водорода. Тогда отрицательно заряженный участок молекулы будет притягивать положительный ион воды.



Если рядом оказываются две сферические нейтральные молекулы, то между ними не должно быть электрического взаимодействия. При сферической форме центр отрицательного заряда каждой молекулы совпадает с центром ее положительного заряда, так что электрический момент равен нулю. Ионное притяжение также отсутствует. И все же такие молекулы могут взаимодействовать друг с другом благодаря одному любопытному эффекту.

Согласно простейшей квантово-механической модели, электронные орбитали соседних молекул могут синхронизоваться, порождая мгновенные электрические моменты и соответствующие электрические поля. Эти поля в свою очередь могут вызывать притяжение между молекулами. Обычно такие взаимодействия называют силами Ван-дер-Ваальса.

Рассмотрим электронные орбитали двух соседних молекул. Для каждой из этих молекул ее соседка «представляется» электрически нейтральной, так как их положительные и отрицательные заряды одинаковы. Однако, когда молекулы сблизятся в достаточной степени, две группы электронов будут взаимодействовать между собой, двигаясь по синхронизованным орбиталам.

Далее в какой-то момент времени в молекуле произойдет разделение заряда и появится электрический момент. То же должно происходить и в другой молекуле. В результате они будут притягиваться. С течением времени эта сила может изменяться, однако в среднем она уже не будет равна нулю и может оказаться достаточной для того, чтобы удержать вместе две молекулы. Например, структура керосина обусловлена именно силами Ван-дер-Ваальса.

С помощью этих моделей Виссинг не только объяснил свои опыты, но и предложил несколько новых. Когда капля керосина находится на поверхности воды, между углеводородами, входящими в состав керосина, и молекулами воды связи не образуются. Водородные связи в этом случае невозможны. А связи других типов встречаются слишком редко, чтобы создать конкуренцию водородным связям, обеспечивающим сцепление молекул воды, или силам Ван-дер-Ваальса, поддерживающим целостность капли керосина. Таким образом, капля керосина лишь слегка вдавливается в поверхность воды под действием силы тяжести. В случае других растворов происходит то же, так как вероятность образования связей с водой остается очень низкой.

Теперь становится понятнее и поведение каплей олеиновой кислоты. Когда капля кислоты падает на поверхность воды, сразу же начинают образовываться новые связи. Гидрофильный конец молекулы олеиновой кислоты

присоединяется к молекуле воды, в то время как противоположный конец и значительная часть всей молекулы не участвуют в этом процессе. Обычно гидрофильный конец молекулы называют «головой», а другой конец — «хвостом». Молекулы олеиновой кислоты располагаются так, что их «головы» прилегают к поверхности воды, а «хвосты» направлены вверх.

Между «головой» молекулы кислоты и водой возникают связи двух типов. Поскольку и «голова» молекулы кислоты, и молекула воды полярны, их электрические моменты могут привести к такой конфигурации, которая соответствует присоединению. (Точнее говоря, в этом случае образуется водородная связь между одним из атомов водорода молекулы воды и атомом кислорода молекулы кислоты.)

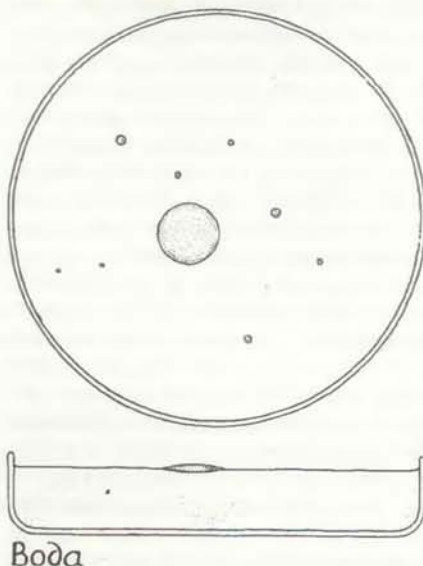
Связь второго типа обусловлена диссоциацией группы  $\text{COOH}$ , которая отдает ион водорода (протон) молекуле воды. В результате образуется отрицательно заряженный ион  $\text{COO}^-$  и поло-

жительно заряженный ион  $\text{H}_3\text{O}^+$ , между которыми возникает ионная связь.

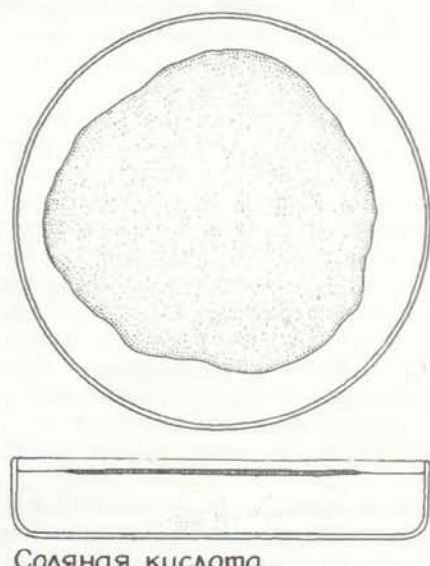
Затем начинается образование новых связей. Молекулы олеиновой кислоты ориентируются так, что между ними возникают определенные взаимодействия. Расположенные рядом группы  $\text{COOH}$  способствуют образованию водородных связей, а между углеводородными цепочками возникают дополнительные связи. Кроме того, некоторые соседние углеводородные группы взаимодействуют за счет сил Ван-дер-Ваальса.

Постепенно все новые молекулы кислоты по краям капли принимают соответствующую конфигурацию и за счет сил Ван-дер-Ваальса к границе с водой притягиваются другие молекулы. Капля уменьшается и вскоре превращается в невидимую пленку толщиной всего в одну молекулу. Благодаря связям между соседними упорядоченными молекулами олеиновой кислоты пленка уже не может больше растягиваться.

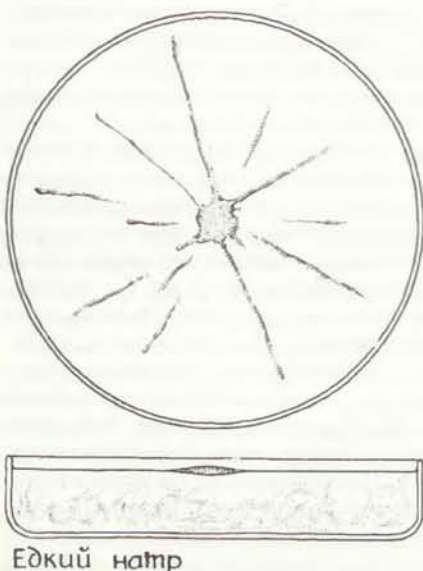
Если на поверхность воды попадает



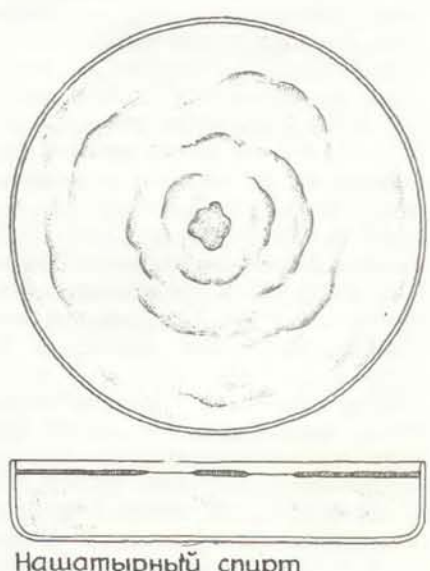
Вода



Соляная кислота



Едкий натр



Нашатырный спирт

Поведение капель олеиновой кислоты  
на поверхности четырех разных растворов



небольшое количество кислоты, то мономолекулярная пленка покрывает лишь ее часть. При избытке кислоты пленка образуется на всей поверхности, а избыток концентрируется в чечевицеобразную каплю (или в несколько капель), плавающую на поверхности. Когда поверхность полностью покрывается олеиновой кислотой, образование связей с молекулами воды прекращается. В этом случае действуют только силы Ван-дер-Ваальса и другие электростатические взаимодействия, которые способствуют стягиванию жидкости. Вот почему при избытке кислоты появляются новые капли.

Когда капля олеиновой кислоты оказывается на поверхности разбавленной соляной кислоты, повторяется почти такая же картина, за исключением одного обстоятельства. На этот раз избыток ионов водорода и хлора препятствует диссоциации групп  $\text{COOH}$ . Молекулы кислоты принимают такую же конфигурацию («головы» вниз, «хвосты» вверх), однако их взаимодействие с водой почти полностью ограничивается водородными связями. И снова капля олеиновой кислоты растекается по поверхности раствора.

Ситуация совершенно изменяется, когда капля олеиновой кислоты попадает на поверхность разбавленного едкого натра. Этот раствор нейтрализует кислоту; в результате образуется натриевая соль олеиновой кислоты. Виссинг использовал растворы такой концентрации, что молекулы соли объединялись в крошечные капельки, называемые мицеллами: Молекулы, попавшие на границу между мицеллой и окружающей водой, располагаются так, что их полярная «голова» направлена наружу, а углеводородный «хвост» — внутрь мицеллы. Группы  $\text{COOH}$  вступают во взаимодействие с окружающими их молекулами воды благодаря образованию водородных связей и в некоторой степени за счет электростатического притяжения между ионом водорода группы  $\text{COOH}$  и молекулой воды.

С помощью опытов Виссинга легко наблюдать образование мицелл. Вскоре после того, как капля олеиновой кислоты падает на поверхность раствора едкого натра, от нее разбегаются постепенно исчезающие «ручейки». В то же время под каплей и ручейками начинают образовываться мицеллы. Мицеллы препятствуют прохождению световых лучей через раствор, и он мутнеет.

Нашатырный спирт тоже нейтрализует олеиновую кислоту, однако при этом мицеллы не образуются. По мере нейтрализации олеиновая кислота резко выбрасывается из капли, появляются струйки, которые, как и капли, двигаются по поверхности. Мне не понятны причины этого явления.

Но особенно интересна следующая серия экспериментов Виссинга. Он на-

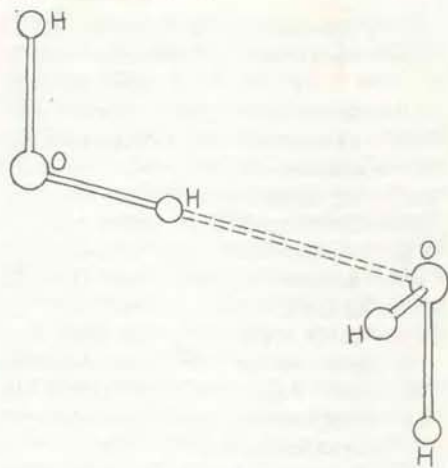
чинает работать с чистой водой, в которую добавляет три или четыре капли олеиновой кислоты. Снова на поверхности образуется мономолекулярная пленка, а избыток кислоты стягивается в большую каплю. На фотографии на с. 92 сверху слева показана капля на поверхности воды, еще дрожащей от быстрого образования мономолекулярной пленки.

Затем на некотором расстоянии от капли олеиновой кислоты Виссинг каплет пять каплей керосина. С добавлением первой из них капля олеиновой кислоты заметно расширяется. После добавления пятой капли керосина «язычок» олеиновой кислоты вытягивается по направлению к ближайшей капле керосина. За несколько минут капля олеиновой кислоты занимает место своей «жертвы» и наконец смешивается с ней, придавая керосину розоватый оттенок. Теперь капля олеиновой кислоты становится гораздо больше.

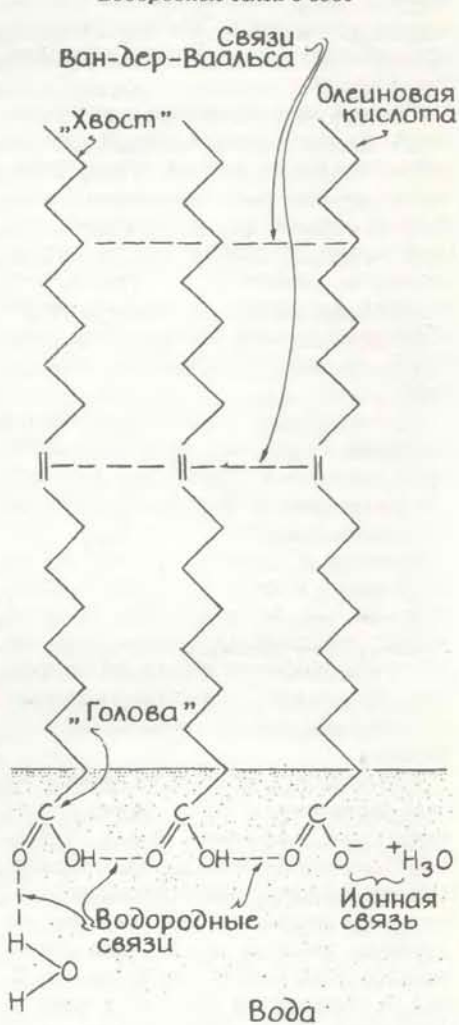
На фотографии (с. 92) слева в середине показана вторая капля керосина за мгновение до того, как она будет «поглощена» каплей олеиновой кислоты. Следы первой «жертвы» можно разглядеть с одной стороны капли олеиновой кислоты. Фотография, помещенная слева внизу, была сделана после того, как олеиновая кислота «поглотила» вторую и третью капли керосина. Следующие моменты показаны на фотографиях справа (сверху вниз)

Ни мне, ни Виссингу не удалось полностью объяснить этот опыт. Виссинг предполагает, что присутствие керосина способствует образованию связей между углеводородными группами керосина и углеводородными группами избыточных молекул олеиновой кислоты. Мое предположение состоит в том, что молекулы в капле керосина взаимодействуют с «хвостами» молекул олеиновой кислоты в окружающей мономолекулярной пленке. Поскольку молекулы в пленке прочно связаны друг с другом, возникающее натяжение передается капле олеиновой кислоты, и в результате она вытягивается по направлению к капле керосина.

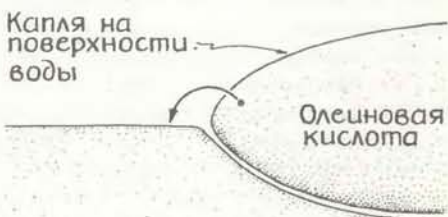
И все-таки я озадачен этим экспериментом. Почему одна капля керосина вызывает лишь растяжение капли олеиновой кислоты, в то время как присутствие пяти капель заставляет олеиновую кислоту начать «охоту» за керосиновыми каплями? Мне кажется, причина кроется в горизонтальных усилиях, действующих на мономолекулярную пленку со стороны каплей керосина. Предположим, что перед тем, как в чашку опускают первую каплю керосина, вся поверхность воды занята только мономолекулярной пленкой и каплей избыточной олеиновой кислоты. Поскольку жидкость в капле кислоты стремится растечься, она оказывает на пленку горизонтально направленное усилие.



Водородные связи в воде



Мономолекулярная пленка олеиновой кислоты



Как образуется мономолекулярная пленка



Когда добавляется первая капля керосина, она воздействует на пленку с дополнительной силой. Четыре капли создадут еще большее давление. В этот момент начинают образовываться связи между керосином и соседними молекулами олеиновой кислоты.

С какой стороны следует ожидать поступления новой порции олеиновой кислоты? Скорее всего, со стороны капли, так как она давит на мономолекулярный слой. Капля кислоты сползает на участок, ранее занятый мономолекулярной пленкой. Этот выступ растягивается благодаря воздействию пленки (так как около керосиновой капли образуются новые связи) и гидростатического давления со стороны жидкости в остатке капли олеиновой кислоты. В конце концов выступ достигает капли керосина и смешивается с ней.

Иной раз в тот момент, когда олеиновая кислота захватывает капли керосина, Виссинг изменяет условия опыта. Сбоку от капли олеиновой кислоты он добавляет 1—2 мм концентрированного нашатырного спирта. Вступая в реакцию нейтрализации с ним, капля начинает «бешено плыть». Появляются мицеллы. Экран на потолке аудитории оживает в безумном движении красных капель и ручейков, пока наконец избыток мицелл не преградит световым лучам путь через чашку Петри.

Заключительные опыты Виссинга столь же увлекательны. В одном из них он наносит на поверхность воды такое количество олеиновой кислоты, чтобы образовалась плавающая капля. Затем на середину этой капли стряхивает немного жидкого моющего средства тритон X-100. Когда этому препарату удастся проникнуть сквозь каплю и достичь воды, поверхность раствора моментально очищается от олеиновой кислоты.

В другом опыте Виссинг помещает на поверхность воды крошечную каплю олеиновой кислоты и добавляет такое количество керосина, чтобы образовалась капля диаметром около 3 см. Затем помещенные около керосина несколько дополнительных капель кислоты окружают ее, создавая в течение долгого времени сложную и весьма подвижную картину. В отдельном опыте Виссинг показывает, как можно «гонять» по воде каплю олеиновой кислоты, если подносить к ней ватный тампон, смоченный в концентрированном нашатырном спирте. Неожиданными толчками этого тампона он заставляет каплю кислоты «прыгать» по водной поверхности. Если капля прижимается к стенке сосуда, то в парах, выделяемых тампоном, она начинает мелко дрожать.

Образование мономолекулярных пленок малорастворимых органических соединений сыграло важнейшую роль в первых работах, посвященных

определению размеров молекул. В 1890 г. Рэлея использовал очень небольшое количество оливкового масла для оценки размеров молекул составляющих его соединений. Тонкая платиновая проволока погружалась в масло, а затем взвешивалась на аналитических весах. Некоторое количество масла стряхивалось на поверхность воды в круглом сосуде диаметром 84 см, после чего проволока взвешивалась снова. Разность результатов двух измерений представляла собой массу масла, покрывающего поверхность воды.

Для того чтобы наблюдать за поверхностью, покрытой мономолекулярной пленкой, Рэлея посыпал воду мелкими крупинками камфары. Расстворяясь с одной стороны крупинки, камфара уменьшала поверхностное натяжение воды. Больше поверхностное натяжение, сохранявшееся с другой стороны, приводило крупинку в движение. Когда Рэлея добавлял оливковое масло, поверхностное натяжение становилось слишком слабым, чтобы заставить крупинку двигаться. Таким образом, он мог следить за распространением масляной пленки, наблюдая «плывущую» крупинку камфары. Добавив именно столько масла, сколько было необходимо для того, чтобы замедлить движение крупинки, можно было убедиться в том, что вся поверхность покрыта мономолекулярным слоем оливкового масла. Зная площадь поверхности и массу капли, Рэлея рассчитал толщину пленки. Она составила 17 ангстрем ( $\text{\AA}$ ). Рэлея полагал, что такова длина молекул, из которых состояла пленка.

Р. Крэндолл и Дж. Делорд из Колледжа Рида модифицировали эксперимент Рэлея для его демонстрации при чтении вводного курса физики. Во время лабораторных работ студенты вычисляют длину молекулы олеиновой кислоты, среднюю длину ее связей, а также массу атома углерода. Поверхность воды сначала посыпают линолеидовой пылью. Когда на поверхность опускают каплю олеиновой кислоты, мономолекулярная пленка раздвигает пыльцу, составляя из нее окружность, которая затем сжимается по границе до неправильной формы. Прежде чем форма окружности начинает искажаться, студент зарисовывает границу на миллиметровой. Площадь круга, покрытого пленкой, вычисляют впоследствии по этому эскизу.

Заранее известны следующие данные. Используется раствор олеиновой кислоты в спирте в концентрации  $200 \text{ мл}^{-1}$  (по объему). (Как только капля касается поверхности воды, спирт моментально растворяется и в дальнейшем уже не влияет на поведение кислоты.) Объем капли составляет примерно  $0,05 \text{ см}^3$ . Когда молекулы кислоты выстраиваются вниз «головами» и вверх «хвостами», каждая «голо-

ва» занимает участок поверхности, примерно соответствующий квадрату со стороной в 10 раз меньше длины молекулы. Массы атомов кислорода, углерода и водорода соотносятся как 16:12:1. Удельный вес олеиновой кислоты приблизительно равен  $0,895 \text{ г/см}^3$ .

Умножая концентрацию олеиновой кислоты на объем капли, можно вычислить объем олеиновой кислоты, растекающейся по поверхности. Разделив полученный результат на площадь мономолекулярной пленки, можно получить толщину слоя, которая как раз равна длине молекулы олеиновой кислоты.

Затем определяют длину связей, т.е. расстояние между двумя соседними атомами углерода. Для упрощения двойную связь в середине молекулы можно считать одинарной. Остальные связи углеводородной цепочки являются одинарными. Кроме того, можно пренебречь «нелинейной» структурой «головы» молекулы. Таким образом, всего получаем 17 связей (или 18, если включить в рассмотрение атом водорода на конце «хвоста»). Будем считать, что все связи расположены на одной прямой. Тогда, если длину молекулы разделить на число связей, длина одной связи будет примерно равна  $1 \text{ \AA}$ .

Умножив объем олеиновой кислоты на ее плотность, можно определить массу мономолекулярной пленки. Для нахождения массы молекулы используется тот факт, что ее «голова» представляет собой квадрат со стороной в 10 раз меньше длины молекулы. Поскольку длина молекулы уже известна, площадь квадрата, в который вписывается ее «голова», можно легко вычислить.

Число молекул олеиновой кислоты можно получить, разделив площадь пленки на площадь, занимаемую каждой «головой». Разделив массу слоя на число молекул, получим массу молекулы. И наконец, массу атома углерода можно определить, подсчитав число атомов каждого вида и использовав приведенное выше соотношение их масс.

Молекулы — необычайно маленькие и сложные частицы, так что изобразить их очень трудно. Тем не менее с помощью экспериментов Рэлея можно оценить их размеры. Лабораторные работы Крэндолла и Делорда позволяют определить длину межатомных связей. Красочные демонстрационные опыты Виссинга дают возможность представить себе, как молекулы располагаются вдоль границы раздела между водой и органическим соединением, помогают понять, почему одни органические соединения растекаются по поверхности воды, а другие нет.



# Занимательный компьютер

## О конечном автомате и простейших моделях мышеловок, рибосом и человеческой души

БРАЙАН ХЭЙЕС

**У** САМЫХ мощных вычислительных машин, которые пока существуют лишь в нашем воображении, нет ни аппаратуры, ни программного обеспечения. Известнейшая среди этих абстрактных машин была придумана английским математиком Тьюрингом в 1936 г. Круг ее возможностей шире, чем у любого действующего компьютера на кремниевых кристаллах, и разумеется, она может вычислить все, что вообще поддается вычислению. Всем прочим умозрительным вычислительным машинам недостает всемогущества машины Тьюринга, но они не менее интересны. Их называют машинами с конечным числом состояний или конечными автоматами, и по их «возможностям» устанавливают минимальные технические требования к цифровой вычислительной машине.

Точное определение конечного автомата потребовало бы строгого математического изложения. Мы же в данном случае ограничиваемся рассмотрением нескольких конкретных примеров. Отправившись на поиски конечных автоматов, я нашел отличный образец на Лексингтон-авеню в нью-йоркском метро. Это был турникет старого образца (а не распространенная ныне компактная стальная вертушка) в виде дубовой крестовины, до блеска отполированной людскими руками.

Турникет имеет два состояния: заблокирован и разблокирован. Предположим, что он заблокирован, так что крестовину нельзя повернуть. Опускание жетона в прорезь каким-то образом изменяет внутренний механизм, что позволяет турникету поворачиваться; другими словами, жетон вызывает переход в состояние «разблокирован». Поворот крестовины на 90° приводит к другому переходу, что возвращает турникет в состояние «заблокирован». Переходы схематически показаны на верхнем рисунке на с. 99. Состояния системы представлены узлами (прямоугольниками), а переходы — дугами (стрелками) между ними.

**Н** А ЯЗЫКЕ конечных автоматов опускание жетона и нажатие на поручень турникета — это возможные входы системы. Реакция автомата зави-

сит и от входа, и от состояния в момент входа. Нажатие на поручень до того, как турникет получит жетон, не поможет вам попасть на станцию. Опускать жетон, когда турникет уже разблокирован, также бессмысленно, хотя по несколько иным причинам. Второй жетон будет принят, но это не отразится на состоянии автомата: пропускается один человек, а затем турникет снова блокируется. Три или четыре жетона подряд также будут приняты, но турникет пропустит только одного человека. Скептики потребовали бы больше данных, прежде чем сделать обобщение: все жетоны, опущенные после первого, не оказывают никакого действия. Но пусть они экспериментируют со своими жетонами.

Турникет не может пропустить нескольких человек за несколько опущенных подряд жетонов по той причине, что у него нет средства для подсчета полученных им жетонов. Он обладает единственным, довольно примитивным видом памяти: при изменении состояния «запоминается», был ли самый последний вход опусканием жетона или нажатием на поручень. Все более ранние входы теряются. Следует заметить, что от этой забывчивости городскому хозяйству нет никакого ущерба. Могло быть хуже: турникет можно было бы спроектировать так, чтобы он менял состояние после каждого опущенного жетона независимо от того, в каком состоянии он находится в данный момент; в этом случае два жетона подряд привели бы турникет в состояние «заблокирован».

Этот пример иллюстрирует большинство основных свойств конечного автомата. Автомат, очевидно, должен иметь некоторое число состояний, причем обязательно конечное. Должны быть входы и выходы, соответствующие любому состоянию. Состояния должны быть дискретными, или легко различимыми, а переходы между ними — действительно мгновенными. Здесь, разумеется, многое зависит от точки зрения: день и ночь — это дискретные состояния, если определить восход и заход как мгновенные процессы. Набор состояний, входы и выходы — вот и весь автомат; он может работать без

вспомогательных устройств, и в частности без каких-либо средств хранения информации.

Правила построения конечного автомата допускают некоторые варианты. Существуют детерминированные и недетерминированные автоматы, автоматы Мура и автоматы Мили. В детерминированном автомате данный вход в данном состоянии неизменно приводит к одному и тому же результату; в недетерминированном автомате может быть несколько возможных переходов. В автомате Мура (по имени Э. Мура) каждому состоянию соответствует единственный выход. В автомате Мили (по имени Дж. Мили) выходы соответствуют переходам, а не состояниям. Оказывается, однако, что это многообразие структур — всего лишь иллюзия. Любая задача, выполняемая конечными автоматами одного рода, может быть также выполнена автоматами другого рода, хотя число необходимых состояний может меняться. Здесь я буду преимущественно рассматривать детерминированные автоматы Мура, которые обладают простейшей структурой.

**С** ТОИТ пуститься на поиски конечных автоматов, как вы начнете находить их повсюду. Устройства, приводимые в действие монетой, — излюбленные примеры из учебников. Некоторые торговые автоматы не столь ненасытны, как турникет в метро: как только они получают нужное количество денег, они переходят в состояние, при котором все лишние монеты возвращаются. Устройство, приводимое в действие монетой и имеющее самое большое число состояний, — это, без сомнения, типичный лас-вегасский игорный автомат. В принципе он детерминирован, тем не менее при отыскании такого входа (монета и нажатие на рукоятку), который бы вызвал переход к желаемому заключительному состоянию, успех весьма сомнителен.

Многие бытовые приборы можно рассматривать как конечные автоматы, хотя и довольно «тупые». Стиральная машина проходит неизменную последовательность состояний — залив, стирка, полоскание, отжим, — и лишь несколько осмысленных входов, таких, как отключение машины от сети, приводит к одному и тому же результату при любом состоянии. Точно так же светофор имеет небольшой диапазон состояний, которые обычно повторяются. По-моему, самый скучный из всех конечных автоматов — электронные часы. Если они показывают месяц, число, часы, минуты и секунды, то имеют около 31 млн. состояний. В течение года они находятся в каждом состоянии ровно один раз.

Мышеловка — тоже конечный автомат: мышь, к своему несчастью, вызы-



вает переход от состояния с поднятой дверцей к состоянию с захлопнутой дверцей. Замок с шифром — конечный автомат со многими возможными входами, из которых только один приводит к переходу в другое состояние. Телефон имеет состояния, которые можно обозначить так: трубка на рычаге, трубка снята с рычага, сигнал «занято», сигнал «свободно», набор номера, звонок, соединение и неисправен. На примере автомобиля можно увидеть, что результат того или иного входа изменяется в зависимости от текущего состояния системы. Что происходит, если вы нажимаете на педаль акселератора? Это зависит от того, едет ли машина, включено ли сцепление, снята ли машина с ручного тормоза, включена ли передача — и на какой ход, передний или задний, — а также от того, открыта ли дверь гаража.

В живой клетке молекулярная система, состоящая из рибосомы и различных видов тРНК, действует как конечный автомат. Входами являются четыре нуклеотида мРНК, обозначенные сокращениями U, A, G и C. Выходами служат 20 аминокислот, из которых состоят белки. Цепочка нуклеотидов распознается как правильный вход для этого автомата, если только она состоит из начальной последовательности AUG. Затем автомат непрерывно считывает входную последовательность, каждый раз меняя состояние, когда распознается кодон, или триплет нуклеотидов. Три особо выделенных кодона UAA, UAG и UGA являются сигналами останова: когда встречается один из них, автомат останавливается. Весьма полезно представление и многих других биологических систем в виде конечных автоматов; первым, пожалуй, приходит на ум пример гемоглобина и бактериальных белков, являющихся активаторами или репрессорами.

Даже „душа“ в теологии Фомы Аквинского не что иное, как тщательно разработанный и полностью детерминированный конечный автомат. При сотворении она находится в состоянии осуждения за первородный грех. При крещении она переходит в состояние благодати, однако некоторые поступки (идолопоклонство, богохульство, прелюбодеяние и т.п.) вызывают переход в состояние греха. Тогда для возвращения души в состояние благодати необходимы исповедь, раскаяние и отпущение грехов. Результат самого последнего входа, смерти, очень сильно зависит от состояния души в этот момент: в состоянии благодати смерть приводит к спасению, а в состоянии греха — к осуждению на вечные муки. Механизм души, разумеется, гораздо сложнее, чем даваемое этим описанием представление о нем. При полном описании надо было бы различать степени

греха (простительный и смертный, случайный и привычный) и ввести другие возможные состояния души (те, которые связаны с преддверием ада и чистилищем), а также другие возможные входы (например, Страшный суд).

В квантовой механике конечным автоматом становится даже атом и, следовательно, все, что состоит из атомов. Состояния атомов — это разрешенные уровни энергии, входами и выходами служат фотоны, или кванты электромагнитного излучения. Я думаю, что при точном описании атом был бы классифицирован как недетерминированный автомат Мили с эпсилон-переходами. Он недетерминированный, потому что результат входа нельзя точно предсказать. Это автомат Мили, потому что природа выхода (а именно энергия фотона) определена переходом, а не состоянием, в которое он перешел. (Эпсилон-переходами называются такие переходы, которые могут произойти в отсутствие какого бы то ни было входа; их следует включить в модель, поскольку атом может испустить фотон и изменить свое состояние спонтанно.)

**Я**ВЛЯЕТСЯ ли мозг человека конечным автоматом? Дело в том, что современное изучение систем с конечным числом состояний началось с модели нейронной сети, введенной в 1943 г. У.Мак-Каллоком и У.Питтсом. Нейроны Мак-Каллока и Питтса представляли собой простые клетки со входами «возбуждение» и «торможение»; у каждой клетки были единственный выход и два внутренних состояния: возбуждения и покоя. Клетки могли образовывать цепи, реализующие различные логические функции: в том

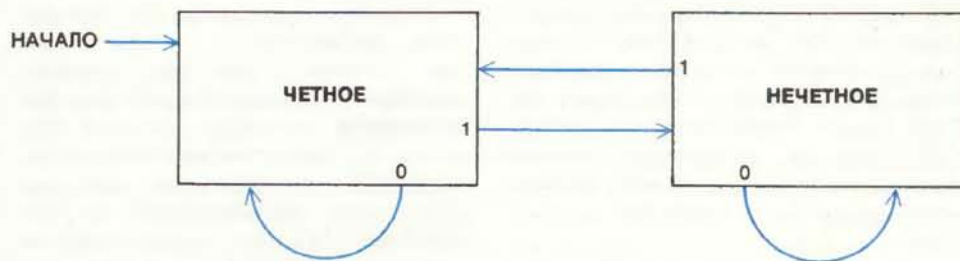
числе «и», «или» и «нет», которые теперь являются самыми обычными функциями логической схемы в электронных системах. Эквивалентность идеализированной нейронной сети с диаграммой переходов того типа, который показан здесь, была установлена в 1956 г. С. Клини из Висконсинского университета в Мадисоне.

И через сорок лет после появления работы Мак-Каллока и Питтса все еще обсуждается вопрос, можно ли с достаточным основанием квалифицировать мозг как систему с конечным числом состояний. Разумеется, число нейронов обязательно конечно, но дело не только в этом. Реальный нейрон гораздо сложнее клетки с двумя состояниями, и некоторые его свойства могут меняться непрерывно, а не ограничиваться дискретными состояниями. Кроме того, отсутствие возможности хранить дополнительную информацию для конечного автомата по меньшей мере неудобно. Если духовная жизнь не более чем последовательность мгновенных состояний без знания своей собственной истории, то что же такое память?

Эмоциональные состояния, являющиеся предметом обсуждения в психологии, такие, как скука, страх, тоска, экстаз и горе, по-видимому, более подвластны теории конечных автоматов. В то же время состояний так много, а переходы еще настолько не изучены и непонятны, что такая модель бесполезна. Только для низших животных возможно наметить нечто большее, нежели изолированные фрагменты диаграммы переходов, а человек в экспериментах с этими видами не получил прямого доступа к предполагаемым состояниям психики. Действительно, боль-



Диаграмма переходов для турникета метро



Автомат для проверки на четность



шая работа в этом направлении была проделана бихевиористами, которые отрицают само существование состояний психики.

Случай с цифровой вычислительной машиной (а здесь я имею в виду материальную машину, аппаратуру) также проблематичен. Распространенная умозрительная модель вычислительной машины, построенная Дж. фон Нейманом, делит машину на центральный процессор и массив ячеек памяти. Нет сомнения, что многие компоненты центрального процессора, такие, как регистры, сумматоры и механизмы управления, которые руководят внутренними операциями процессора, можно описать в терминах конечных автоматов.

Неприятности начинаются, когда дело доходит до памяти. По правилам построения конечного автомата внешняя память не допускается, и, таким образом, каждую ячейку надо рассматривать не как запоминающее устройство, отдельное от процессора, а как часть состояния всего автомата. Если все ячейки пусты, то компьютер находится в одном состоянии, если хотя бы одна заполнена, автомат перешел в другое состояние и т.д. Подобная концепция компьютера особенно бессмысленна, в частности, потому, что она не устанавливает связи между состоянием машины и тем, что она делает. Кроме того, число состояний огромно. Прimitивный компьютер, способный запомнить информацию в 100 бит, не сможет, по-видимому, пройти через все свои состояния, даже если будет постоянно работать на протяжении существования Вселенной.

**ПЕРВОСТЕПЕННАЯ** роль конечного автомата в теории вычислительных машин заключается в более высоком уровне абстракции, чем у обычного механизма аппаратуры. Вычислительная машина, работающая под руководством программы, это уже не нагромождение логических схем, регистров, ячеек памяти и других атрибутов электроники: это «виртуальная» машина, рабочие части которой определены программой и, если надо, могут быть определены заново. В то время как аппаратура знает лишь двоичные числа и простые команды для их перемещения и действий над ними, виртуальная вычислительная машина имеет дело с более выразительной символьной системой: словами, уравнениями, массивами, функциями, векторами, кодами, списками, образами, быть может, даже с идеями. Теория конечных автоматов ценна при создании виртуальных машин, и иногда виртуальная машина сама оказывается конечным автоматом.

Рассмотрим программу, цель которой — считывание последовательно-

сти двоичных разрядов (единиц и нулей) и выдача сообщения о том, четным или нечетным получилось число единиц. (Эта работа не лишена практической пользы: например, такие программы проверки на четность используются для обнаружения ошибок при передаче двоичных данных по телефону.) Программа может быть построена как конечный автомат с двумя состояниями, как показано на нижнем рисунке на с. 99. Операция начинается в четном состоянии, так как первоначально не получено ни одной единицы, а нуль считается четным числом. Каждая единица во входной последовательности приводит к изменению состояния, в то время как получение нуля в любом состоянии не изменяет его. Хотя машина не может «запомнить» никакого входа, кроме самого последнего, и, разумеется, не может считать единицы и нули, ее выход всегда отражает четность входной последовательности.

Модель вычисления с конечным числом состояний очень часто встречается в программах, так или иначе связанных с текстом или другой информацией, которая принимает лингвистическую форму. Замечательным примером служат компиляторы: программы, транслирующие операторы программы на входном языке в эквивалентные операторы на выходном языке, чаще называемом «машинным языком» данного компьютера. Компиляторы и другие программы — трансляторы — основные понятия, связанные с виртуальными машинами. Они являются посредниками между символами, имеющими смысл для человека, и символами, распознаваемыми вычислительной машиной.

Часть компилятора, которую можно представить как конечный автомат, называется сканером или лексическим анализатором. Подобно турникету метро, он тоже «пожирает жетоны». Но в этом случае, однако, в качестве «жетонов» выступают слова, или основные лексические единицы языка. Лексический анализатор распознает каждую группу символов и определяет, является ли она настоящим «жетоном», таким, как команда или число: если нет, то лексический анализатор отбрасывает ее как бессмыслицу, подобно турникету, не принимающему фальшивый жетон.

Операцию, производимую лексическим анализатором, можно проиллюстрировать с помощью конечного автомата, предназначенного для распознавания «жетонов» простого языка, пусть и с весьма ограниченными выразительными средствами: «жетоны» образованы исключительно из римских цифр. На самом деле допускаются только числа специального вида: они получаются путем сложения, так что 9

## Издательство МИР предлагает:

З. Лойда,  
Р. Госсrau,  
Т. Шиблер

### ГИСТОХИМИЯ ФЕРМЕНТОВ Лабораторные методы

Перевод с английского

Предлагаемое вашему вниманию пособие основано на самых последних методических достижениях гистохимии ферментов. Подробно рассмотрены более 100 методов гистохимического выявления ферментов, причем многие методы изложены в собственных удачных модификациях авторов, ведущих специалистов в этой области.

В книге много ценных технических рекомендаций, которые так важны при воспроизведении методик. Кроме того, обсуждаются возможные причины артефактов, столь частых в лабораторной практике. Приведены материалы по подготовке тканей для гистохимического исследования ферментов (отбор и обработка тканей, фиксация, промывка, приготовление срезов, заключение, инкубация и др.). Раздел, посвященный отдельным ферментам, весьма обширен — описываются методы выявления гидролаз, гликозидаз, пептидаз, трансфераз, лиаз, оксидоредуктаз.

Следует подчеркнуть, что пособие имеет практическую направленность, вопросы теории в нем обсуждаются в объеме, который необходим для понимания проводимых реакций и сознательного выбора из ряда аналогичных методов наиболее адекватного целям исследования.

Книга, несомненно, будет с интересом встречена специалистами-гистохимиками, а также гистологами, цитологами, биохимиками. Она пригодится врачам-лаборантам, студентам, аспирантам и преподавателям университетов, медицинских, сельскохозяйственных и педагогических институтов.

1982, 270 с. Цена 1 р. 60 к.



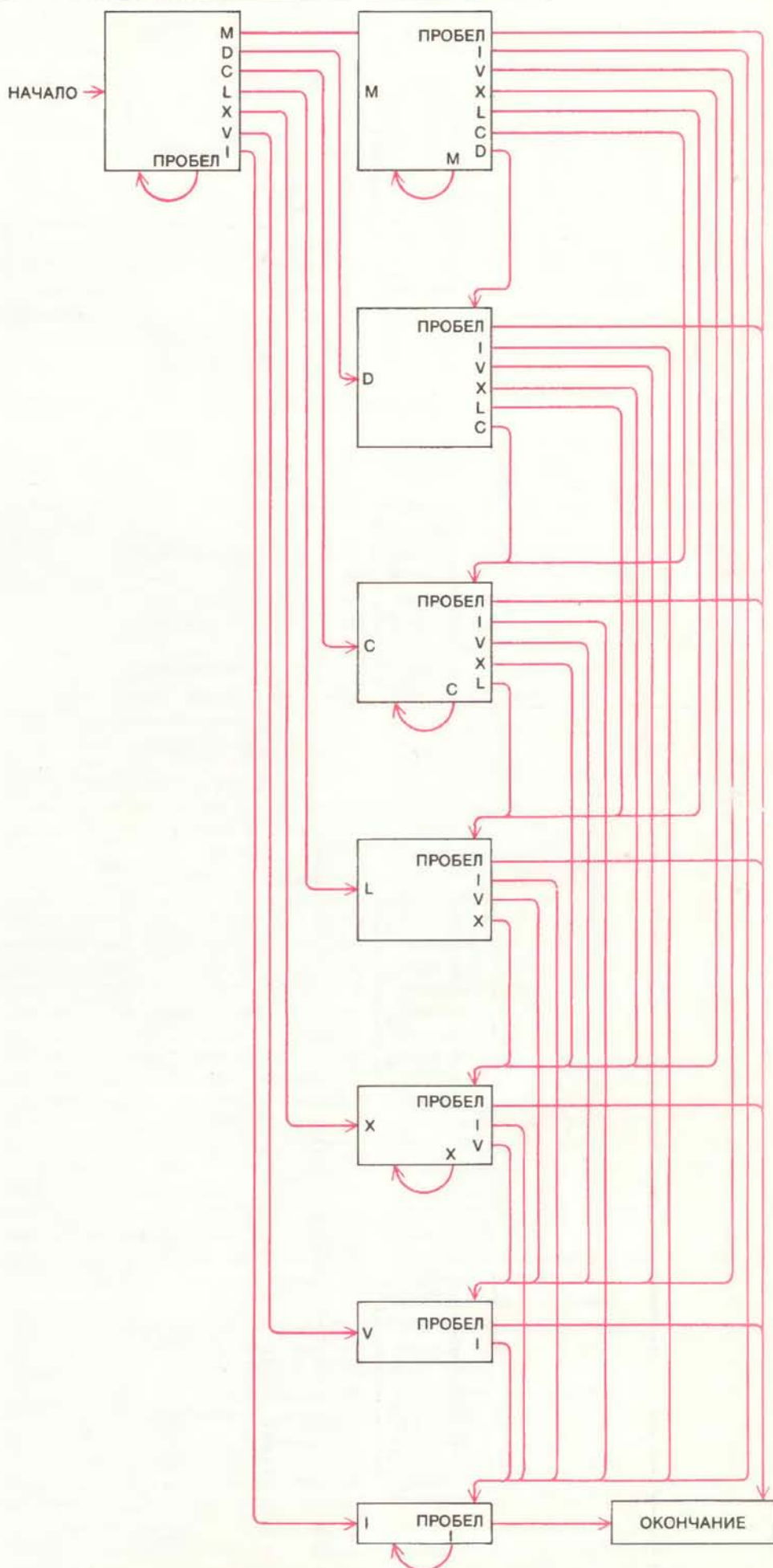


записывается как VIII, а не IX. (Имеются свидетельства, что сами римляне пользовались именно такой записью; представление при помощи вычитания является, по-видимому, более поздним германским новшеством.)

Диаграмма переходов для автомата, обрабатывающего числа, записанные римскими цифрами, показана справа. Ее входной алфавит состоит из букв M, D, C, L, X, V и I, а также символов пробела, или просто пробелов. Любой первоначальный пробел попросту игнорируется, но, как только получена первая буква, программа немедленно переходит в состояние, идентифицируемое (для удобства) названием буквы. Если первая буква есть M, то за ней может следовать любая буква из алфавита, включая другую букву M. Если следующая буква D, то ситуация несколько меняется. Из состояния D не определен переход обратно в состояние M, потому что любая последовательность символов, которая содержит DM, не может быть правильно составленным «жетоном»: такое число нельзя образовать из римских цифр путем сложения. Кроме того, невозможен переход из состояния D в состояние D, так что DD тоже исключенная последовательность. Причина здесь в том, что для «половинок» D, L и V в римской нумерации повторения не допускаются.

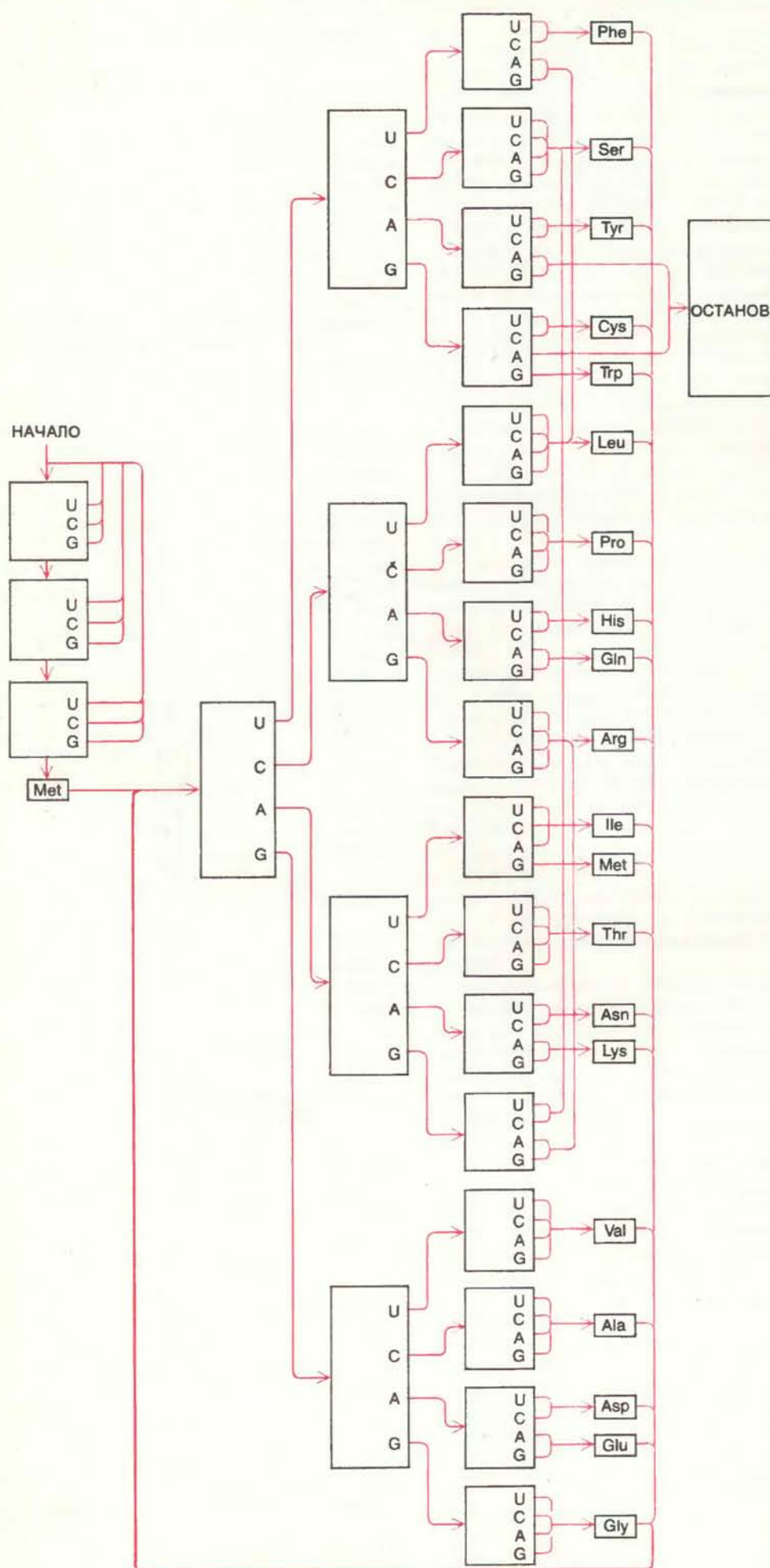
В состоянии D признаются только буквы C, L, X, V и I, имеющие значение, меньшее D. Та же самая последовательность допустима в состоянии C (поскольку C может повторяться), а в состоянии L признаются лишь буквы X, V и I. Правило, согласно которому происходят переходы, вам уже, наверное, понятно. Состояния упорядочены в иерархию, и, как только достигается данный уровень, автомат больше не может вернуться к более высокому уровню; на уровне «половинок» он даже не может остаться. К тому времени, как достигается состояние I, допускается лишь повторный символ I либо пробел. Пробел, поступивший в этот момент либо в любой другой момент после появления первой буквы, указывает на конец «жетона» и переводит автомат обратно в начальное состояние, когда он готов получить следующее число.

Ни один из известных мне языков программирования не допускает ввод чисел, записанных римскими цифрами, но фактически все такие языки имеют средства обращения с числами, записанными арабскими цифрами. Методы распознавания аналогичны, но имеется большее разнообразие форматов. Простые целые числа, например 137, могут обрабатываться в принципе автоматом с одним состоянием, но числа, состоящие из нескольких частей, такие, как  $+ 6.625 \cdot 10^{-27}$ , требуют более



Лексический анализатор для языка, состоящего из римских цифр





Конечный автомат расшифровывает генетический код

сложного лексического анализа.

Систему рибосом и тРНК можно рассматривать как лексический анализатор, который распознает биологически осмысленные последовательности нуклеотидов в молекуле мРНК. Для того чтобы последовательность была принята, она должна начинаться с иницирующего кодона и заканчиваться одним из трех терминирующих кодонов; между этими границами допускается любая комбинация входных символов U, A, G и C.

Лексический анализ — это первый шаг в процессе компиляции. После лексического анализатора вступают компоненты компилятора, носящие названия «программа грамматического разбора» и «генератор кода». В качестве входной последовательности программа грамматического разбора берет «жетоны», распознанные лексическим анализатором, и анализирует их синтаксические отношения; на этом этапе происходит более глубокое понимание компилятором смысла операторов программы, которые он транслирует. Программу, которая выполняет функции, определенные разобранными операторами, генератор кода пишет на объектном языке.

В рассмотренных здесь игрушечных языках задачи программы грамматического разбора и генератора кода тривиальны. Транслированная форма оператора на языке, использующем римские цифры, может оказаться просто эквивалентом этого числа, записанного арабскими цифрами. Ее можно было бы генерировать, следуя такой стратегии. Перед лексическим анализом «жетона» отводится ячейка памяти и туда засылается нуль. Затем каждый раз, когда лексический анализатор входит в состояние M, к содержимому ячейки прибавляется 1000; для состояния D прибавляется 500 и т.д. Когда лексический анализ закончен, в этой ячейке содержится число, записанное римскими цифрами. Заметим, что этот игрушечный компилятор уже не будет конечным автоматом, поскольку у него есть вспомогательная память.

Компилятор для генетического кода даже проще и полностью может быть построен в рамках конечного автомата. Транслируемая «программа» является последовательностью стандартных трехбуквенных символов для аминокислот; символы могут быть генерированы как выходная последовательность состояний лексического анализатора, распознающего кодоны. Три состояния, соответствующие трем терминирующим кодонам, не имеют выходной последовательности.

Создание настоящего компилятора для достаточно широкого языка, который имел бы практическую пользу, не слишком простое дело, но лежащая в основе его структура конечного авто-





Иерархия Хомского конечных и бесконечных автоматов

мата может по крайней мере помочь найти принцип организации. Если синтаксис языка определен достаточно точно, то часть работы даже можно автоматизировать: выполнить при помощи программы-компилятора нашего компилятора. Входной последовательностью для нее служит формальное описание языка, а выходной последовательностью — другая программа, которая транслирует операторы на этом языке. Насколько мне известно, еще не написан компилятор компилятора.

**РАСПОЗНАВАНИЕ «жетонов»** лексическим анализатором уже само по себе в некотором роде грамматический разбор, а множество всех возможных последовательностей символов «жетона» является своего рода языком. В сущности, это бесконечный язык: если только не наложено какое-нибудь искусственное ограничение на длину индивидуальной последовательности, можно образовать бесконечное множество распознаваемых «жетонов». Как может автомат, имеющий лишь конечное число частей, распознавать бесконечные последовательности правильно составленных операторов и отбрасывать бесконечное число неправильных? Разгадка заключена в самой структуре языка. Если операторы бесконечного языка должны распознаваться конечным автоматом, они должны быть образованы по строгим правилам.

Эти правила были сформулированы в 1956 г. С. Клини; они определяют класс языков, названных регулярными языками или регулярными множествами. Клини доказал, что конечный автомат может распознавать язык только тогда, когда этот язык регулярен, и, кроме того, что каждый регулярный язык может быть распознан некоторым конечным автоматом: в конце концов можно построить автомат, в котором имеется состояние для каждого возможного выражения языка. Далее, если язык бесконечен; должен

быть возможен грамматический разбор всех операторов посредством прочтения одного символа слева направо, либо начиная с конца (при этом не допускается ни забегающие вперед ни возвращения назад). Если допустимость какого-либо символа обусловлена присутствием другого символа, то обуславливающий символ должен находиться непосредственно слева.

Второе правило является немедленным следствием ограничений конечного автомата, который не может ни предвидеть свои будущие состояния, ни сохранить память о прошлых состояниях; он должен выбрать переход на основе только текущего состояния и текущего входного символа. Именно по этой причине конечный автомат не может обрабатывать числа, образованные римскими цифрами при помощи вычитания. Если записано выражение XI и автомат интерпретирует его как 11, он не может вернуться назад и пересмотреть значение, если следующая литера оказывается V. Многие другие функции управляются с помощью такого ограничения. Например, невозможно построить конечный автомат, который читал бы последовательность двоичных разрядов и определял бы, равно ли число единиц числу нулей. Аналогично, хотя конечный автомат может складывать двоичные числа, он не может их перемножать; я предоставляю читателю догадаться, почему.

**ЗА ПРЕДЕЛЫ** конечных автоматов и регулярных языков простирается иерархия более мощных машин и более общих языков. Она называется иерархией Хомского, по имени лингвиста Н. Хомского, который исследовал различные формальные языки как возможные модели естественных языков. Наиболее общие языки были созданы при помощи смягчения ограничения на грамматические правила регулярных множеств; автоматы же были построены добавлением к исходной модели

конечного автомата элементов памяти.

Следующий автомат в этом ряду называется автоматом с магазинной памятью. Он состоит из конечного автомата с добавлением массива памяти, которая имеет бесконечную емкость, но причудливую организацию. Эта память принимает форму стека, подобного стопке подносов в кафетерии. Для занесения единицы информации в память она должна быть помещена на вершину стека; восстановлена она будет не раньше, чем будут удалены все расположенные сверху единицы. Таким образом, последний из поступивших уходит первым.

Язык, распознаваемый автоматом с магазинной памятью, называется контекстно-свободным языком. При разборе его операторов допустимость символа может зависеть и от символа, стоящего непосредственно слева, и от символа, стоящего непосредственно справа. Эта двусторонняя зависимость разрешается, потому что каждый символ, допустимость которого нельзя немедленно установить, может быть сохранен в стеке, пока не будет разрешена неясность. Следовательно, автомат с магазинной памятью может оперировать с числами, записанными римскими цифрами и образованными при помощи вычитания, и он может распознавать выражения с одинаковым числом единиц и нулей (или иных символов, таких, как правые и левые скобки). С другой стороны, он не может обнаруживать предложения с равным числом символов трех видов, таких, например, как 0, 1, 2. Большинство языков программирования контекстно-свободные, а программа разбора компилятора обычно представляет собой автомат с магазинной памятью. Многие компьютеры имеют аппаратные средства для организации части памяти в виде стека. Язык программирования Forth за основную структуру памяти принимает структуру стека. Разумеется, стек в любой реальной машине не может иметь бесконечную глубину.



Контекстно-свободные языки оправдывают свое название, поскольку на распознавание любого символа могут прямо повлиять только его два ближайших соседа, а не более широкий контекст, в котором он находится. Снятие этого ограничения порождает контекстно-зависимые языки и еще больше увеличивает сложность интерпретации. Теперь далеко отстоящие друг от друга символы могут взаимодействовать; в самом худшем случае первый символ выражения нельзя интерпретировать, пока не будет прочитан последний. В обмен на дополнительную сложность получаем несколько больше возможности. Автомат, основанный на контекстно-зависимых языках, может определять, содержится ли в выражении одинаковое число символов трех видов.

Автомат, который может распознавать контекстно-зависимый язык, является линейно-ограниченным автоматом. В дополнение к обычному устройству конечного автомата он имеет память, организованную так, что любая ячейка памяти доступна в любой момент; это автомат со случайным доступом. Емкость памяти конечна, но предполагается, что она достаточно велика, чтобы вместить любую входную последовательность, которая поступает в автомат. Линейно-ограниченные автоматы, по-видимому, дают хорошее приближение к модели цифровой вычислительной машины фон Неймана. Но, как ни странно, соответствующие контекстно-зависимые языки программирования, по-видимому, мало распространены; очевидно, более простая контекстно-свободная структура почти всегда позволяет добиться желаемой выразительности.

Все описанные выше языки имеют одно общее свойство: говорят, что они рекурсивны. Для нас это означает, что можно вообразить процедуру порождения всех возможных «способов выражения» в языке в порядке возрастания длины. Отсюда следует, что существует гарантированный метод установления того факта, принадлежит ли данному языку данный оператор конечной длины, — для этого просто надо породить все операторы вплоть до данной длины и сравнить их.

Имеются языки, которые не удовлетворяют даже этим простейшим стандартам обрабатываемости. Для них существует лишь один возможный распознающий автомат, «последнее средство», — машина Тьюринга, конечный автомат со свободным доступом в бесконечную память. В описании, данном Тьюрингом, память представлена в виде бесконечной в обоих направлениях ленты, разделенной на клетки, в которые конечный автомат может записывать, считывать с них или стирать записанное.

Теперь с высот машины Тьюринга четче вырисовывается взаимосвязь вычислительных устройств более низких уровней. Линейно-ограниченный автомат — это просто машина Тьюринга с конечной лентой. Автомат с магазинной памятью имеет ленту, не ограниченную в одном направлении, но «головка» для чтения и записи на ленте всегда остается фиксированной над последней непустой клеткой. Конечный автомат — это машина Тьюринга во все без ленты.

Читателям, падким на все новое и

желающим заняться грамматическим разбором нерекурсивных языков, пора спешить приобрести машину Тьюринга. Следует только предупредить их, что этот чудо-компьютер имеет свои слабые стороны. Существуют языки с такими нелепыми грамматиками, что даже машина Тьюринга не сможет распознать их операторы за конечный отрезок времени. Пока такие языки нашли весьма ограниченное применение в мире вычислительных машин, но люди как-то ухитряются на них говорить.

## Издательство МИР предлагает:

Эрвин Фрид

### ЭЛЕМЕНТАРНОЕ ВВЕДЕНИЕ В АБСТРАКТНУЮ АЛГЕБРУ

Перевод с английского



Книга известного венгерского математика Эрвина Фрида содержит популярное, но достаточно строгое изложение основ абстрактной алгебры. В доступной, яркой и убедительной форме представлены теория групп и полугрупп, колец, тел и векторных пространств, рассмотрены структуры и операции над множествами, соотношения между структурами.

В книге отражены также основные направления развития

современной алгебры. Многочисленные примеры и задачи призваны помочь читателю активно овладеть специфическими особенностями алгебраического мышления. Текст книги сопровождается выразительными иллюстрациями.

Книга рассчитана на студентов, инженеров, ученых смежных специальностей и всех, кто интересуется современной математикой.

1979, 120 страниц с иллюстрациями.

Цена 1 р. 50 к.





# Наука и общество

## «Непослушное дитя»

ЭЛЬ-НИНЬО» в переводе с испанского означает «дитя». Такое невинное название получило явление, при котором массы необычно теплой воды вторгаются в центральную и восточную части экваториальной зоны Тихого океана. Периодичность Эль-Ниньо меняется от трех до десяти лет, причем вторжение совпадает со значительными колебаниями атмосферного давления, известными как южные осцилляции. Последствия этих двух взаимосвязанных процессов зачастую крайне серьезны: от засухи в Австралии и Южной Африке до проливных дождей и резкого снижения улова рыбы в прибрежных водах Эквадора и Перу. Эль-Ниньо 1982—1983 гг. было самым сильным в XX в.: в среднем температура воды на поверхности моря у берегов Южной Америки повышается на  $2 \div 3^\circ\text{C}$ , но в июне 1983 г. аномалия достигла  $7^\circ\text{C}$ . Особенность последней аномалии заключалась в том, что она наступила позже, чем предыдущие, и не предупредила о своем появлении обычным «атмосферным сигналом».

Во время южной осцилляции в зоне высокого давления в юго-восточной части Тихого океана атмосферное давление на уровне моря падает, а в зоне низкого давления, охватывающей обычно северную Австралию и Индонезию, оно, наоборот, повышается. В результате ослабевает барический градиент, который формирует восточные пассаты, дующие вдоль экватора. В обычных условиях эти ветры и экваториальное течение западного направления приводят к накоплению огромных масс теплой воды ( $+ 29^\circ\text{C}$ ) в западной части Тихого океана. В случае ослабления пассатных ветров теплые воды могут двигаться на восток, в результате чего температура поверхностного слоя воды в центральной части Тихого океана будет необычно высокой. Изменение направления ветра, очевидно, является причиной возникновения серии подповерхностных волн, называемых волнами Кельвина, которые распространяются вдоль экватора и выражаются в вертикальных перемещениях термоклина (границы между теплым верхним слоем воды в океане и ниже лежащей холодной водой). Волны Кельвина понижают эту границу и таким образом увеличивают глубину теплого поверхностного слоя.

Этим последним явлением океанографы сегодня объясняют вторжение необычно теплых вод у побережья Южной Америки, что иногда имеет катастрофические экологические и экономические последствия. Обычно юго-восточные пассаты, дующие вдоль по-

бережья, отгоняют поверхностные воды в открытый океан, позволяя тем самым холодным водам, расположенным под термоклином, подниматься на поверхность. При набегании волн Кельвина на берег повышается уровень воды и слой теплой воды становится таким глубоким, что на поверхность выходят не холодные, а, наоборот, теплые воды. Однако в отличие от холодных вод теплые воды не выносят на поверхность большого количества солей, которые необходимы фитопланктону для фотосинтеза. Сокращение популяций планктона отражается на всей пищевой цепи океана, последними звеньями которой являются морские птицы и люди, тоже использующие дары моря.

Раньше появлению Эль-Ниньо предшествовало усиление восточных пассатных ветров. Вслед за ослаблением ветров осенью теплые воды обычно появлялись сначала у побережья Южной Америки сразу же после рождества Христова, в январе или в феврале (отсюда и название Эль-Ниньо — дитя, младенец). Пик аномалии приходится на май или июнь. Последнее же Эль-Ниньо существенно отличалось от предыдущих: пассаты так и не достигли максимума в период, предшествующий ослаблению ветров, да и сами ветры не ослабевали вплоть до апреля 1982 г. Повышение температуры поверхностных вод в центральной части Тихого океана началось летом, а в восточной части — в сентябре.

Исследователи пришли к выводу, что усиление пассатных ветров — главная причина перемещения в западную часть Тихого океана теплой воды, которая возвращается назад на восток во время Эль-Ниньо. Сейчас они вынуждены пересмотреть это заключение. Несовпадение последнего Эль-Ниньо по времени с предыдущими также представляет загадку, которая, по мнению М. Кейна из Массачусетского технологического института, должна быть решена. Кейн полагает, что при Эль-Ниньо прежде всего должно произойти перемещение обширной Индонезийской депрессии вдоль экватора к центральной части Тихого океана. Во время предыдущих вторжений теплых вод такое перемещение циклона обычно приходилось на осень, хотя нет никаких препятствий тому, чтобы оно произошло весной, как это случилось в 1982 г.; и осенью и зимой этот циклон выражен не очень хорошо, отличается неустойчивостью и, следовательно, большей мобильностью.

До сих пор неизвестно, почему в некоторые годы Индонезийская депрессия перемещается, а в другие нет. Но если уж она начала перемещаться, то

вполне вероятно, что механизм обратной связи поддерживает ее движение и, в конечном счете, может служить причиной возникновения Эль-Ниньо, как считает Ю. Расмуссен из Национального метеорологического центра. Подобно другим депрессиям, Индонезийский минимум представляет собой зону конвергенции, где воздух хорошо прогревается, поднимается вверх и его место у поверхности занимает более холодный воздух, приносимый ветром. Зоны конвергенции в основном формируются там, где поверхность лучше прогревается и, следовательно, интенсивнее испарение и восходящие потоки воздуха.

Когда Индонезийский минимум занимает свое обычное положение над Индонезией, приток воздуха осуществляется восточными пассатами, дующими в западной части Тихого океана. По мере продвижения циклонической области к линии перемены дат в центральной части Тихого океана циклон увлекает за собой воздух с запада, образуя аномальные западные ветры, которые насыщают пассаты влагой. Теперь массы теплой воды в западной части Тихого океана могут начать перемещаться на восток, сопровождаемые зоной обильных осадков. Осадки повышают температуру атмосферы, усиливают западные ветры (в 1982—1983 гг. пассаты действительно изменили свое направление на противоположное в западной части Тихого океана) и тем самым способствуют продвижению зоны низкого давления дальше на восток. Сигналом о том, что ветры изменили свое направление на западе, служат образовавшиеся волны Кельвина, которые распространяются вдоль экватора по направлению к Южной Америке со скоростью несколько сот километров в день.

Как же этот сигнал передается в умеренные широты Северного полушария? Когда происходит Эль-Ниньо в экваториальной части океана, Эль-Ниньо умеренных широт почти неизменно приводит к незначительному повышению температуры воды на поверхности океана у побережья Северной Америки (на  $2 \div 3^\circ\text{C}$  в 1982—1983 гг.). Прошлой осенью, несмотря на ослабление экваториального Эль-Ниньо, среднширотная аномалия, которая распространилась на север до Британской Колумбии (Канада) и Аляски, подавала признаки дальнейшего развития. Очевидно, что эти два явления взаимосвязанны, но механика этой связи пока неизвестна.

По одной из гипотез, экваториальные волны Кельвина, достигнув берегов Южной Америки, расходятся вдоль побережья в северном и южном направлениях, перенося теплые воды в умеренные широты и увеличивая глубину термоклина по мере своего про-



## Книги

Новогодний обзор книг  
для юного читателя,  
посвященных науке и технике

ФИЛИП И ФИЛИС МОРРИСОН

движения. Однако Дж. Симпсон из Скриппсовского океанографического института сообщает, что теплые воды, достигшие Калифорнийского побережья во время последнего Эль-Ниньо, содержали слишком мало солей и слишком много кислорода, чтобы быть водами с юга. Тщательные исследования, проведенные Симпсоном и его коллегами вдоль линии, простирающейся к юго-западу от Сан-Диего, показали, что теплые воды поступают в основном с запада и их приносят к побережью те же самые аномальные юго-западные ветры, которые обрушили на Калифорнию жестокие штормы зимой 1982 г.

А. Дуглас из Крейтонского университета предложил возможную модель, по которой развивается эта связь. В обычные годы приэкваториальная зона низкого давления, где встречаются северо- и юго-восточные пассаты, которую называют междутропической зоной конвергенции, мигрирует на север в мае — июне. Во время Эль-Ниньо по не вполне понятным причинам междутропическая зона конвергенции не перемещается и остается на юге. Вследствие этого высотный антициклон, образовавшийся в субтропиках в результате притока избыточного воздуха из зоны конвергенции, сохранился над Мексикой в 1982 г.: в этом районе преобладала жаркая сухая погода, и поверхность Тихого океана прогрелась на расстоянии до 700 миль от побережья.

Тепловая энергия, выделяемая этой массой теплой воды, усилила юго-западные ветры, устремившиеся в высотную ложбину низкого давления, которая обычно располагается над Калифорнией в сентябре. Эти ветры нагоняли теплые воды к побережью и препятствовали выходу холодных вод на поверхность. К зиме теплые воды распространились до Британской Колумбии по мере того, как усилились ветры, дующие с океана в связи с формированием зоны низкого давления над заливом Аляска. Предполагают, что ветры связаны с большой разностью температур теплых вод экваториального Эль-Ниньо и необычно холодной в 1983 г. воды в центральной части Тихого океана.

Дуглас полагает, что аналогичная последовательность событий имела место в предыдущих Эль-Ниньо с той лишь разницей, что они оказывали различное влияние на погоду в Северной Америке. Во время Эль-Ниньо в 1976—1977 гг. в Калифорнии была засуха, а зима в США была необычно холодной. Последнее Эль-Ниньо принесло в Калифорнию ливни и дало основание предположить, что зима 1982—1983 гг. в США будет мягкой на большей части территории.

**В** 1983 году вышло в свет много книг об электронно-вычислительных машинах. В основном эти книги носят характер учебных пособий и руководств, т.е. представляют интерес главным образом для тех, кто овладевает основами вычислительной техники. Поэтому мы не включили их в обзор, посвященный на этот раз книгам для школьников старшего возраста.

*Гарольд Гэтти. Ориентирование на суше и в море. Читая карту природы FINDING YOUR WAY ON LAND AND SEA: READING NATURE'S MAPS, by Harold Gatty. The Stephen Greene Press, Brattleboro, Vt., and Lexington, Mass. (\$8.95)*

**Ч**УВСТВО направления — это, по моему, способность человека хорошо ориентироваться на местности с помощью пяти врожденных чувств и смекалки». Свою небольшую книгу об ориентировании без карты и компаса Гарольд Гэтти написал на Фиджи незадолго до смерти. Впервые она была издана в 1958 г. Морской офицер, пионер аэронавигации, Гэтти приобрел известность после своего кругосветного полета с Уайли Поустом в 1931 г. На протяжении всей своей жизни он интересовался способами нахождения курса без использования дорогостоящих приборов, таких, как гироскопы. В этой книге Гэтти делится с читателем своим опытом. Вы найдете в ней также интереснейший этнографический материал.

Запах горящей осины в Скалистых горах обычно говорит о близости жилья, а горящей сосны — о лесном пожаре. Ветер далеко разносит благоухание апельсиновых рощ с островов Зеленого Мыса, аромат кокосов ощутим задолго до того, как покажется в виду сам атолл. С Фолклендов распространяется далеко в море запах горящего торфа. Для моряков с судна, потерпевшего крушение, ориентиром может быть запах гуано, исходящий из колоний морских птиц. Генерал Р. А. Бэгнолд, замечательный исследователь пустыни, однажды нашел колодец в безводной местности по одному лишь запаху верблюда, находившегося в 8 милях от путешественника. В безжиз-

ненной пустыне редко что порождает запахи, поэтому даже самые слабые из них становятся различимыми. Как сказал бы физик, отношение сигнала к шуму велико.

Как видим, обоняние, роль которого мы иногда недооцениваем, может подсказать нам правильный путь. Еще большее внимание Гэтти уделяет возможности ориентироваться по особенностям местности. Он блестяще развивает эту тему. Мох на северной стороне деревьев — лишь самый известный из десятка всевозможных «советов», которые путешественник может получить от деревьев, других растений и даже деревенских домов. Такие ориентиры обычно характерны только для данной местности. Так, утверждение, что мох на стволах деревьев растет всегда с северной стороны, — «опасное обобщение». Расположение мха зависит прежде всего от дождя и ветра. Влага — вот что ему необходимо. В горах Юра, например, мхи и лишайники находятся на стволах деревьев с юго-восточной стороны. Есть и другие, более экзотические ориентиры — муравейники, снежные заструги, форма дюн в пустыне.

Угадывать по форме волн, в какую сторону нужно плыть, чтобы быстрее достигнуть суши, умеют лишь жители Полинезии и Микронезии. В книге рассказывается о специальном приспособлении, служащем для этой цели. Есть в ней также небольшая, но любопытная глава об этнокартографии с примерами использования карт (как воображаемых, так и рисованных) многими первобытными народами. Оказывается, нам есть чему поучиться у них! В книге есть даже глава об ориентировании в городе. Телевизионные антенны, ставни, ржавчина, облупившаяся краска, интенсивность уличного движения — вот прекрасная возможность потренироваться. А как насчет расстояний? Пятьдесят метров — расстояние, на котором вы начинаете различать белки глаз человека; человеческая фигура в 700 метрах от вас напоминает столб. Церковный шпиль можно заметить с расстояния 15 километров.

Эта мастерски написанная книга дополнена таблицами данных о Солнце, картами звездного неба и зарисовками птиц. Она читается легко и с большим



интересом. Всякий юный путешественник останется благодарен ее автору.

*Генри Стommel, Элизабет Стommel, Вулканы и погода: ГОД БЕЗ ЛЕТА*  
VOLCANO WEATHER: THE STORY OF 1816, THE YEAR WITHOUT A SUMMER, by Henry Stommel and Elizabeth Stommel. Seven Seas Press, Inc., Newport, R. I. (\$15)

**В**Ы не прочтете об этом в старинном «Календаре фермера». В отличие от народных легенд в сем почтенном источнике предсказаний погоды нет ни слова о небывалых морозах, стоявших в течение всего 1816 г. в горах Новой Англии. В народе же этот год получил заслуженное прозвище «тысяча восемьсот замерзший насмерть».

По всем свидетельствам, прежде всего по записям наблюдений за температурой, сделанным сотрудниками Гарвардского, Йельского и других университетов, совершенно очевидно, что лето 1816 г. было из рук вон плохим. В Нью-Хейвене в июле средняя температура была такая, какую можно было ожидать где-нибудь в Квебеке, т.е. в 300 км к северу; морозов не было всего 71 день, а обычно, даже в холодные годы, безморозный период длится в среднем 126 дней. На севере США урожай основной культуры — кукурузы, был крайне низкий, а в Квебеке не урождалась даже более неприхотливая пшеница. В штатах Мэн и Вермонт многие бросали фермы и переезжали в Огайо и Индиану. Хотя миграция, разумеется, происходила не только в 1816 г. и неурожай был не единственной причиной, все новые и новые факты дополняют картину поистине массового бегства.

Известна и причина: в апреле 1815 г. произошло извержение далекого вулкана Тамбора в Индонезии, которое сопровождалось выбросом пепла в высокие слои атмосферы. Остров Бали, находящийся на расстоянии нескольких сотен километров к западу, был покрыт слоем пепла толщиной 30 см. Извержение Тамборы, грандиознейшее из всех произошедших в историческое время, по объему вулканических продуктов в 100 раз превосходит извержение Сент-Хеленс и в 10 раз — Кракатау.

В заключительной главе читателю предлагается на основе сводки данных — графиков хода температуры, сведений о солнечных пятнах и источниках вулканической пыли за несколько десятков лет — самому сделать вывод. Статистический анализ здесь малоэффективен. Но авторы рецензии, как и авторы книги, считают, что эти графики убедительно свидетельствуют о связи между вулканами и похолоданиями. Компенсирует ли такое «пылевое» похолодание постоянно растущий из-за сжигания топлива парниковый эффект? Если произойдет ядерная война,

вызовет ли пепел сожженных атомными взрывами городов и лесов глобальную климатическую катастрофу? Эта лаконичная, увлекательная и безупречно честная книга, не решая «мировых» вопросов, ставит их и учит читателя искать ответы самостоятельно.

*Тосио Ито и Хироцугу Комура. ВОЗДУШНЫЙ ЗМЕЙ: НАУКА И ИСКУССТВО*  
KITES: THE SCIENCE AND THE WONDER, by Toshio Ito and Hirotsugu Komura. Japan Publications, Inc. Distributed by Kodansha International/USA, Ltd., through Harper and Row, Publishers, Inc. (\$11.95)

**Я**ПОНСКИЕ умельцы уже много веков назад научились изготавливать великолепные змеи самых разнообразных форм из прочной и тонкой тутовой бумаги и легких, крепких и упругих бамбуковых реек. Ныне этим занялись инженеры. Книга написана двумя опытными японскими инженерами, построившими и испытывавшими за четыре года свыше 1000 моделей змеев. Ими была разработана аэродинамическая теория полета воздушных змеев и несложная методика их изготовления, позволяющая использовать как традиционные, так и современные материалы и получать формы различных птиц, насекомых и рыб. Впервые опубликованная в Японии в 1979 г. эта книга теперь переведена на английский язык.

Первая глава, содержащая множество рабочих кривых и диаграмм, показывающих силы, действующие на воздушного змея, предлагает читателю, знакомому с основами механики, самую полную из когда-либо опубликованных теорий устойчивого полета змея. Далее следует также хорошо аргументированное, хотя и не столь полное количественное рассмотрение неустойчивого полета: всех этих рысканий, вращений, вибраций, известных всем тем, кто любит это увлекательное занятие. Вторая половина небольшой, но насыщенной новой информацией книги посвящена изготовлению змеев. Авторы рассказывают о различных материалах, в том числе самых современных, как, например, графитные композиты (правда, пользующаяся популярностью у американских любителей найлоновая парусина не попала в их поле зрения), приводят таблицы их свойств. Подробно излагается методика конструирования и изготовления змеев различных форм. Последняя, весьма краткая глава посвящена роли ветра и учету его силы при запуске змея.

Возможно, не каждый любитель этого тонкого и древнего искусства, до сих пор бывшего чисто эмпирическим, согласится, что создание теоретической основы приведет к появлению но-

вых возможностей для его развития. Конечно, змеи самых различных форм, изготовленные авторами книги, хорошо держатся в воздухе, но ведь и другим любителям удастся этого достичь. Однако ясно, что ни один серьезный моделист не может не отдать должное этой книге; еще больший интерес она, несомненно, представляет для клубов и кружков, члены которых теперь смогут обратить свой энтузиазм и опыт на решение настоящих инженерных задач.

Если верить авторам, оптимальная скорость ветра для змеев одинаковой формы уменьшается с увеличением размеров по закону квадратного корня, по такому же закону возрастает максимальная высота полета. Небо одинаково благосклонно и к большим, и к маленьким змеям.

*Наука в научной фантастике. Под редакцией Питера Николса; составители: Дейвид Лэндфорд и Брайен Стэблфорд*  
THE SCIENCE IN SCIENCE FICTION. General editor, Peter Nicholls; contributors, David Langford and Brian Stableford. Alfred A. Knopf, Inc. (\$25)

**О**КОЛО сотни лучших научно-фантастических рассказов (каждый объемом не более двух страниц) собраны в рецензируемой книге по темам и сопровождаются иллюстрациями, большая часть которых взята из опубликованных источников. Подбор тем традиционен для данного жанра: космические корабли, пришельцы, гиперпространство и гиперскорости, путешествие во времени, роботы, клоны, телекинез, летающие тарелки и силовые экраны. Составители и редактор сборника — великолепные знатоки канонов жанра научной фантастики; один из составителей по образованию физик, другой — биолог, и оба они известны как писатели-фантасты. На некоторых иллюстрациях изображены реальные объекты, например выброс радиогалактики M87, приводимый Эрихом фон Дзеникеном рельеф древних майя, напоминающий изображение астронавта, бронзовая статуя волчицы, кормящей Ромула и его брата Рема. Остальные взяты из научно-фантастических книг или представляя собой кадры из кинофильмов.

Почти по каждому вопросу в книге имеются ссылки на научно-фантастические произведения, классическую и современную литературу, где затрагивается данная тема, а также популярно и вполне аргументированно написанный комментарий, отражающий научные представления или предположения, подтверждающие или опровергающие идеи писателей. В целом книга свидетельствует о том, что предположения авторов научно-фантастических



книг часто превосходят последующее развитие науки и техники и что многие проблемы, связанные с бурным научно-техническим прогрессом и имеющие ныне всемирное значение, уже затрагивались в научно-фантастических книгах и фильмах.

Быть может, не каждый читатель согласится со всеми выводами, сделанными в книге, но это и невозможно при таком диапазоне проблем. Никто, однако, не сможет назвать эти небольшие произведения ошибочными с научной точки зрения или лишенными логики. Напротив, в книге критикуются многие низкопробные, но пользующиеся известной популярностью научно-фантастические «творения», а высказываемые писателями-фантастами предположения сравниваются с тем, что нам уже известно, или же с научными гипотезами. Так, в книге очень доступно объясняется, что такое скорость света, путешествие во времени и даже черные дыры и тахионы.

Благодаря огромным усилиям, затраченным ее создателями, книга как бы прокладывает мост между фантастикой и реальностью. Каждый старшеклассник несомненно прочтет ее с увлечением; она будет полезным приобретением для любой школьной библиотеки не только как удобный библиографический справочник по научной фантастике, но и как издание, содержащее строгие научные факты.

*Эдвин Х. Колберт. Иллюстрированная история динозавров*  
DINOSAURS: AN ILLUSTRATED HISTORY, by Edwin H. Colbert. Hammond Incorporated (\$30)

*Кристофер Мак-Гоуэн. Знаменитые драконы: история вымерших пресмыкающихся.*

THE SUCCESSFUL DRAGONS: A NATURAL HISTORY OF EXTINCT REPTILES, by Christopher McGowan. With original illustrations by Marg Sansom-Markezinis. Samuel Stevens and Company, Toronto and Sarasota (\$29.95)

ЭТИ ДВЕ замечательные книги еще раз доказывают, что специалисты по палеонтологии позвоночных, обычно изыскующиеся на своем малопонятном постороннему «древнегреческом» жаргоне\*, не утратили, однако, способность красиво и ясно писать научно-популярные книги, которые могут доставить немалое удовольствие даже совершенно неподготовленному читателю.

Доктора Колберта, вот уже 40 лет заведующего экспозицией ископаемых Американского музея естественной истории в Нью-Йорке, можно без преуве-

\* Многие названия вымерших пресмыкающихся составлены из древнегреческих корней. — Прим. перев.

личения назвать крупнейшим в США специалистом по динозаврам. Его коллега доктор Мак-Гоуэн, курирующий коллекцию древних рептилий Королевского музея в Торонто, также относится к числу наиболее авторитетных палеонтологов. Книга Колберта оформлена эффектнее: почти каждую страницу украшают великолепные цветные реконструкции внешнего вида различных динозавров. На первом же развороте книги помещен прекрасный снимок крупным планом реконструкции первого «опознанного» палеонтологами динозавра — игуанодона. Этот знаменитый макет был выполнен из черпичи и цемента и установлен в 1854 г. в Лондоне в Хрустальном дворце\*.

Книга Мак-Гоуэна, иллюстрированная красиво, но без особого шегольства, открывается кратким обзором всех отрядов пресмыкающихся и их эволюции с точки зрения теории Дарвина. Свою научную деятельность Мак-Гоуэн посвятил морским и летающим рептилиям прошлого, к которым относятся не только динозавры как таковые, притом его книга охватывает более широкий круг вопросов, чем «Иллюстрированная история динозавров». Много внимания Мак-Гоуэн уделяет физическим и биологическим проблемам, связанным с полетом и быстрым передвижением в воде, а также с теми ограничениями, которые законы природы налагают на максимальные размеры животных. Колберта же увлекают подробности биологии ящеров — всех этих малых и больших «завров», изучение их следов, яиц, покровов и скелетов. Если Мак-Гоуэн оперирует такими понятиями, как, например, число Рейнольдса, то Колберт не прибегает к физике, зато описывает гораздо больше видов. «Иллюстрированная история» предназначена для самой широкой аудитории, она быстро вводит читателя в науку о древних рептилиях, а «Знаменитые драконы» больше подходит для тех, кто захочет продолжить свое знакомство с динозаврами и подробнее изучить их биологию.

При всей разнице подходов обеим книгам присущи высокий уровень и качество. Сходство их этим не исчерпывается. Авторы интересуют, по существу, одни и те же проблемы, например вопрос о теплокровности некоторых ископаемых рептилий, проблема вымирания динозавров. Оба ученых считают, что ни одна из предложенных к настоящему времени гипотез, в том числе и предположение о столкновении Земли с метеоритным телом, не может объяснить неожиданно быстрое исчез-

\* Хрустальный дворец (Crystal Palace) — огромный выставочный павильон из стекла и чугуна, построенный в 1851 г. для «Великой выставки». Сгорел в 1936 г. — Прим. ред.

новение множества видов. Собственно, Мак-Гоуэн и Колберт настроены весьма скептически и полагают, что мы можем вообще никогда не узнать истинной причины вымирания гигантских пресмыкающихся; впрочем, будущее покажет, правы ли они.

И еще один образ сближает эти две книги. О нем стоит рассказать особо. Берега реки Ред-Дир-Ривер, протекающей через городок Драмхеллера в провинции Альберта (Канада), в наше время стали подлинной Меккой динозавропоклонников. В песчаниковых слоях здесь найдено уже около 500 скелетов. Каждый год благодаря эрозии из пород высвобождаются все новые и новые остатки. Еще в начале нашего столетия окрестности Драмхеллера привлекали внимание палеонтологов. Тогда летними вечерами можно было часто видеть собирателей костей, не без приятности (если не считать туч комаров) плывущих на больших плотах с тентами вниз по реке в поисках ископаемых. Находки сыпались как из рога изобилия, и какие находки! Колберт приводит в своей книге старую фотографию, запечатлевшую одну из таких плывучих экспедиций, а Мак-Гоуэн заканчивает один из разделов снимком, на котором мы видим тонкий слой угля, отмечающий эпоху великих перемен: ниже него находятся отложения Века Рептилий, выше — Века Млекопитающих. В Хелл-Крик (шт. Монтана) путешественник может встать на склоне холма так, что ноги его будут в мире динозавров, а голова — в новом мире, возникшем «внезапно» — всего за 2 млн. лет.

*Рональд М. Новак, Джон Л. Парадайзо. Млекопитающие мира*  
WALKER'S MAMMALS OF THE WORLD, by Ronald M. Nowak and John L. Paradiso. Fourth edition, Volume 1 and Volume 2. the Johns Hopkins University Press (\$65)

ПЕРВОЕ издание этой грандиозной книги вышло в свет в 1964 г. Оно было итогом тридцатилетней работы Эрнста П. Уокера, заместителя директора Национального зоопарка. Его преемники продолжают его труд и подготовили три переиздания. И вот теперь вашему вниманию предлагается четвертый, наиболее полный и продуманный вариант. Пожалуй, эта книга — единственный исчерпывающий справочник по современным млекопитающим, она содержит сведения обо всех известных на сегодняшний день родах млекопитающих, а их примерно 1000. Описано 4000 видов — естественно, их характеристики весьма кратки. Так, человеку, *Homo sapiens*, уделено всего две с половиной странички, да и то без рисунков. Зато статьи о прочих млекопитающих богато иллюстрированы, что, конечно, очень украшает



книгу и делает ее особо привлекательной для юного читателя. Текст не слишком специален и порой приятно удивляет прямо-таки художественными описаниями внешнего облика животных. Для каждого вида непременно даются сведения о его распространении, экологии и особенностях поведения. Хочется подробнее остановиться на некоторых статьях. Например, в заметке о чернохвостой луговой собаке (между прочим, это вовсе не собака; луговые собачки — родственники сусликов, они похожи на коренастых коротконогих белок) рассказывается о том, что на западе шт. Техас когда-то существовал целый «город» луговых собачек: на довольно небольшой территории обитало 400 тыс. особей. А вот статья о белобоких дельфинах. Один из видов распространен по реке Янцзы более чем на 1500 км вверх от устья. Эти животные всегда под охраной — прежде по традиции, ныне по закону. Тем не менее численность их падает из-за загрязнения воды, обилия моторных лодок и прочих «благ» цивилизации. Среди иллюстраций обращает на себя внимание фотография шарового трехпоясного броненосца, сидящего на ладони Эрнста Уокера, — такое впечатление, что ученый держит в руке кокосовый орех. Читатель найдет немало интереснейших историй. Помимо них в книге имеется прекрасный справочный аппарат. Каждый том снабжен указателем тривиальных и латинских названий. Цитируется более 3000 работ — как фундаментальных, так и из периодической печати. Одним словом, «Млекопитающие мира» станут весьма ценным приобретением для любой библиотеки.

Лоуренс Прингл. ОДИЧАВШИЕ ДОМАШНИЕ ЖИВОТНЫЕ

FERAL: TAME ANIMALS GONE WILD, by Laurence Pringle. Macmillan Publishing Co., Inc. (\$9.95)

**К**ОГДА-ТО дикие сизые голуби жили в скалах. Однако искусственные постройки из дерева и камня предоставляли голубям вполне удовлетворявшее их убежище, тем более что тут же они могли найти и воду, и зерно. Уже у древних греков голубь был наполовину прирученной птицей. Позже люди стали даже строить специальные голубятни, хотя все хозяйственное значение голубей сводилось к тому, что их иногда употребляли в пищу. Постепенно эта птица стала домашней. Однако в наше время голубятен в городах не так много, и голубей, пожалуй, почти никто не ест. Миллионы городских голубей, по существу, одичали, и это далеко не единственный пример такого рода. Только в Нью-Йорке с человеком сосуществуют, не подчиняясь ему, еще два

вида птиц, не свойственных фауне этих широт: длиннохвостый попугайчик и лебедь-шипун.

По лесам Гавайских островов, Калифорнии и юго-восточных штатов бродят стада одичавших свиней, всеядных, свирепых и хитрых. Их численность оценивают в 2 млн. голов. В 70-х годах прошлого века в западных штатах насчитывалось до 3,5 млн. одичавших лошадей. Теперь их примерно в 200 раз меньше, однако они по-прежнему представляют для этого региона весьма серьезную проблему. Одичавшие ослы, живущие в пустынях юго-западной части США, и знакомые каждому горожанину бездомные кошки и собаки также самым фактом своего существования свидетельствуют о том, что люди нарушили неписаный договор с теми немногими видами животных, которые тысячелетия занимали такое важное место в жизни человека.

Безыскусный, но богатый фактами рассказ Лоуренса Прингла об одичавших животных, несомненно, окажется увлекательным для многих подростков, которых естественное сочувствие к живым существам, уже не нужным человеку, но все еще не чужим для него, подведет ближе к сложным этическим и экономическим проблемам наших дней. Остается заметить лишь, что автор не без юмора посвятил свою книгу бирманскому коту, которого мы видим на одной из фотографий — «такому дикому, такому домашнему и такому славному».

Джон Парселл. ОТ КАМЕННОГО ТОПОРА К ЛАЗЕРУ: ЧЕЛОВЕЧЕСТВО ОВЛАДЕВАЕТ ЭНЕРГИЕЙ

FROM HAND AX TO LASER: MAN'S GROWING MASTERY OF ENERGY, by John Purcell. Illustrated by Judy Skorpil. The Vanguard Press (\$16.55)

**В**ЭТОЙ почти художественной книге, полной неожиданных идей о самых привычных ситуациях и предметах, автор сумел кратко, но убедительно обрисовать всю историю развития техники с древнейших времен до наших дней. Повествование «начинается с начала», т.е. с появления первых орудий у наших далеких предков, обитавших в Восточной Африке. Затем автор отмечает весьма важный этап в истории человечества — использование огня, зафиксированное, например, у древних обитателей пещеры в Чжоукоудянь. Однако проблема источников энергии — далеко не единственное, что привлекает внимание Парселла. Не меньше места на страницах книги он уделяет простейшим механизмам, для анализа которых достаточно школьных знаний по физике. Ведь развитие техники началось когда-то с кремневых рубящих камней и с простейшего рычага —

палки-копалки. Не без остроумия автор рассказывает о спорах среди археологов по вопросу о том, когда же древние люди научились добывать огонь. Представитель одной из сторон — ученый-консерватор — изображен задумчиво разглядывающим обугленный буковый прут, найденный в Югославии на месте одной из стоянок мустьерской культуры. Возможно, это всего лишь копье с обожженным для прочности концом. Однако радикально настроенный археолог не сомневается: перед нами палка для добывания огня трением. Разве так уж невероятно, что в ту холодную эпоху, около 100 тыс. лет назад, люди уже умели не только пользоваться огнем, но и добывать его? «Лично я, — пишет автор, — считаю вполне возможным, что некоторые неандертальцы при необходимости могли добыть огонь».

Именно в таком ключе, нигде не смешивая достоверные факты с предположениями, автор ведет рассказ в той части книги, которая открывается описанием деятельности ранних гоминидов, главным образом собирателей и довольно посредственных охотников, и заканчивается эпохой изобретения колеса со спицами (которое, возможно, изобретали не раз). В книге использованы результаты последних исследований археологов, в частности касающихся гипотез о широком распространении в неолитическую эпоху добычи кремня и о происхождении письма. Например, Дениза Шмандт-Бессер предполагает, что появлению письменности непосредственно предшествовало использование глиняных символических фигурок, которые часто находят при раскопках торговых поселений Юго-Западной Азии дописьменной эпохи. Урукские печати, к которым иногда возводят истоки письма, появились на три тысячелетия позже. Столь же подробно автор останавливается на развитии гончарного дела, металлургии и на том периоде, когда колесо начинает находить широкое применение. Повествование богато археологическими фактами и демонстрирует добросовестность автора в обосновании своих утверждений. Более поздним этапам развития — начиная с изобретений Джеймса Уатта — посвящено лишь около одной десятой объема книги. Однако из этого раздела мы узнаем и об истории появления паровой машины, и об опытах по звуковому радиовещанию, которые проводил в 1906 г. в Кейп-Коде один из пионеров радио Реджинальд Обри Фессенден. Заканчивается книга рассказом о лазерах.

Широкая эрудиция, логика и присущее автору чувство юмора позволили ему написать замечательную книгу, в которой рассказывается о технической эволюции человечества. Из нее читатель узнает много нового из области



естествознания и техники: как высесть огонь с помощью кремня, как бороться с инфекцией, как работает паровой двигатель и многое другое. Книга несомненно заинтересует не только юных читателей, но и их родителей.

*Дейвид Вейцман. Мельницы, мосты и старинные машины: наше индустриальное прошлое*

WINDMILLS, BRIDGES, AND OLD MACHINES: DISCOVERING OUR INDUSTRIAL PAST, by David Weitzman. Charles Scribner's Sons (\$13.95)

**Ч**ЕРТЕЖИ построенной в 1849 г. Адирондакской сталеплавильной печи, руины которой находятся неподалеку от Тахауса в шт. Нью-Йорк, и знаменитого скоростного локомотива «Атлантик» как бы определяют ключ, в котором написана эта замечательная книга. Несомненно, она привлечет внимание как юных, так и взрослых любителей индустриальной археологии. Предельно сжатый рассказ о развитии промышленности за последние несколько столетий (например, эволюция локомотивов прослеживается, начиная от паровоза «Том-Там» до модели «Биг-Бой») помогает читателям не только проследить процесс этого головокружительного развития, но и сделать первый шаг к пониманию самой техники. Автор не пожалел усилий, чтобы просто и ясно рассказать о принципах действия паровых двигателей, шлюзов, котлов и плавильных печей, об основах строительной механики и законах статики, лежащих в основе таких конструкций, как мосты и перекрытия.

Гораздо удобнее начать изучение устройства машин со знакомства с более ранними и, следовательно, более простыми моделями, чем сразу же браться за рассмотрение сложнейших современных механизмов. Автор обращает наше внимание на то, что «памятники» истории промышленности можно встретить практически повсюду. Например, каждый из нас не раз пересекал небольшие невзрачные мостики, однако «если вас интересует индустриальная археология, вы не преминете обследовать такой мостик, спустившись по заросшему травой склону», и если вам посчастливится, сможете, как и автор книги, увидеть старинные чугунные балки и обнаружить, что только что пересекли старейший в Калифорнии стальной мост.

*Алан Холден. Правильные переплетения: клеверный лист, гордиев узел, полисоединения*

ORDERLY TANGLES: CLOVERLEAFS, GORDIAN KNOTS, AND REGULAR POLYLINKS, by Alan Holden. With

photographs by Doug Kendall. Columbia University Press (\$19.95)

**В** ТРЕХМЕРНОМ пространстве можно огромное многообразие взаимопересекающихся структур. Об их строении и свойствах увлекательно рассказывает Алан Холден — известный популяризатор геометрии многогранников. В этой книге по занимательной геометрии вы не встретите ни одной формулы, зато текст в ней сопровождается множеством великолепных иллюстраций. Первая половина книги посвящена переплетениям, нашедшим практическое применение. Одним из них является известная каждому автодорожная развязка «клеверный лист», весьма распространенная в наши дни. Такая форма развязки наилучшим образом удовлетворяет требованиям движения транспортных потоков и удобна для водителей. На практике из двенадцати возможных соединений между четырьмя полосами обычно используются лишь восемь.

Гораздо более широкое применение имеет другой вид переплетений — ткань. Перед нами изготовленные из деревянных прутьев модели, имитирующие строение муара и саржи. А вот модели узлов, таких, как квадратный узел, «бабий» узел, не говоря уже о «голове турка» и других гордиевых узлах, которые можно только разорвать. Тут же читатель может узнать кое-что об их теории. Очень интересная глава посвящена колыбели для кошки — этой древней забаве с веревочкой. И здесь симметрия семи положений этой игры показана на деревянных прутьях. И наконец, последняя часть этой в высшей степени оригинальной книги посвящена полисоединениям — различным видам цепочек.

*Гуго Штейнгауз. МАТЕМАТИЧЕСКИЙ КАЛЕЙДОСКОП\**. (С новым предисловием Мориса Клайна) MATHEMATICAL SNAPSHOTS, by H. Steinhaus. With a new preface by Morris Kline. Oxford University Press (\$7.95)

**Э**ТА КНИГА, принадлежащая весьма узкому кругу популярных книг по математике, ныне впервые издана в мягкой обложке (текст печатается по изданию 1969 г.). Ее первое издание на английском языке получило в высшей степени благожелательный отклик на страницах журнала «Scientific American» еще в 1950 г.

Около десятка коротких, но ярких глав, щедро иллюстрируемых простыми и ясными диаграммами и фотографиями, останавливают внимание чита-

теля на примерах из самых разных разделов математики: от планиметрии и теоремы Пифагора до теории вероятности. Рассказ поражает глубиной и подчас вызывает удивление, но никогда не нагоняет скуку. Слово «калейдоскоп» как нельзя более удачно выражает сущность книги: несколькими лаконичными фразами, сопровождаемыми одним-двумя наглядными рисунками, профессор Штейнгауз добивается цели, снова и снова заставляя читателя поверить в доказательство и прийти в восторг. Материал излагается просто, без длинных математических выкладок или громоздких логических построений. Доступная любому читателю, знакомому с основами школьной алгебры и геометрии, книга насыщена интереснейшим содержанием и в то же время лишена претенциозности. Даже читатель, не искушенный в математике, но проявляющий к ней интерес, найдет в ней много полезного.

Вот некоторые из рассмотренных в ней задач: как поровну разделить торт между произвольным числом людей; как измерить диагональ коробки для обуви с помощью слишком длинной линейки; как разделить угол на три равные части с точностью выше одного процента; как вписать в квадрат озеро Мичиган (или любую другую замкнутую кривую); как классифицировать правильные (платоновы) многогранники, не прибегая к геометрии на плоскости (с помощью топологического деления сферы). Этот маленький, но уже ставший классическим томик — находка для любителя математических досугов. Читая его, понимаешь, какое истинное наслаждение доставляет математика тому, кто ею увлечен.

*Что есть что. Иллюстрированный словарь. Под редакцией Реджинальда Брагониера и Дэвида Фишера* WHAT'S WHAT: A VISUAL GLOSSARY OF THE PHYSICAL WORLD, edited by Reginald Bragonier, Jr., and David Fisher. Ballantine Books (\$9.95)

*Оксфордско-дуденский немецко-английский иллюстрированный словарь*

THE OXFORD-DUDEN PICTORIAL GERMAN-ENGLISH DICTIONARY, edited by the Dudenredaktion and the German Section of the Oxford University Press (\$29.50)

**И**ЗВЕСТНО, что ученые мужи Лапути, дабы не напрягать легких и елико возможно уменьшить двусмысленность изречений, никогда не говорили, но носили с собой различные предметы, о которых им могло случиться «побеседовать». Ту же традицию продолжили большие толковые словари, украшенные множеством миниатюрных изображений различных

\* Имеется перевод: Гуго Штейнгауз. Математический калейдоскоп. — М.: Наука, 1981. — Прим. перев.



предметов. Кому из нас не приходилось пользоваться ими, когда мы встречали в книге какое-нибудь заковыристое слово вроде брам-стенги или астрала.

И вот вышли в свет еще два новых словаря. «Что есть что» — это своего рода мешок с предметами. Сотни фотографий изображают столь различные объекты, как вигвам и игральные карты, коньки и «Спейс Шаттл», причем на них обозначено название почти каждой детали. Большинство страниц занято фотографиями, что делает книгу внешне похожей на старинные иллюстрированные толковые словари. У человека, просматривающего «Что есть что», возникает впечатление, что его составители извлекают на свет множество новых слов, и что изучение, например, названий деталей тостера, — занятие не слишком полезное.

Оксфордско-Дуденский словарь, подобно старым изданиям, в основном иллюстрирован рисунками. Каждая страница предлагает обилие информации, как правило, по какой-нибудь одной теме. Например, читатель встретит здесь изображение цементного завода или вестибюля гостиницы, к каждому из которых даны английские и немецкие названия многих деталей или предметов. Здесь и молотковая дробилка, и охладитель клинкера, и доска для ключей, и буфетная стойка. Составителей словаря вдохновляла идея, что использование иллюстраций окажет большую помощь переводчикам технической литературы, уже осуществленная прежде при издании японско-английского словаря.

Оксфордско-Дуденский словарь содержит около 28 тыс. слов, примерно в полтора раза больше, чем «Что есть что». Однако словарь Брагонира и Фишера составлен и оформлен в более привычной манере и к тому же не лишен доли юмора. В целом же оба словаря несомненно интересны, и читатель может немало из них узнать.

## ЗАНИМАТЕЛЬНЫЙ КОМПЬЮТЕР

COMPUTATION: FINITE AND INFINITE MACHINES. Marvin L. Minsky. Prentice-Hall, Inc., 1967.

MATHEMATICAL STRUCTURES FOR COMPUTER SCIENCE. Judith L. Gersting. W. H. Freeman and Company, 1967.

ALGORITHMS + DATA STRUCTURES = PROGRAMS. Niklaus Wirth. Prentice-Hall, Inc., 1976.

INTRODUCTION TO AUTOMATA THEORY, LANGUAGES, AND COMPUTATION. John E. Hopcroft and Jeffrey D. Ullman. Addison-Wesley Publishing Company, 1979.

## СОВРЕМЕННЫЕ ЛЕДОКОЛЫ

THE NORTHEAST PASSAGE AS A COMMERCIAL WATERWAY. Terence Armstrong in *Vega* 1880—*Ymer* 1980: *Arsbok* 1980 Svenska Sällskapet för Antropologi och Geografi, pages 86—129; 1980.

SHIPPING ROUTES, ICE COVER AND YEAR-ROUND NAVIGATION IN THE CANADIAN ARCTIC. Balaram B. Dey in *Polar Record*, Vol. 20, No. 129, pages 549—559; September, 1981.

Каштелян В. И., Ривлин А. Я., Фаддеев О. В., Ягодкин В. Я. Ледоколы. — Л.: Судостроение, 1972.

Белкин С. И. Сокрушающие лед. — М.: Знание, 1983.

## ИО

MELTING OF IO BY TIDAL DISSIPATION. S. J. Peale, P. Cassen and R. T. Reynolds in *Science*, Vol. 203, No. 4383, pages 892—894; March 2, 1979.

THE ROLE OF SO<sub>2</sub> IN VOLCANISM ON IO. B. A. Smith, E. M. Shoemaker, S. W. Kiefer and A. F. Cook II in *Nature*, Vol. 280, No. 5725, pages 738—743; August 30, 1979.

THE GALILEAN SATELLITES AND JUPITER: VOYAGER 2 IMAGING SCIENCE RESULTS. Bradford A. Smith, Laurence A. Soderblom et al. in *Science*, Vol. 206, No. 4421, pages 927—950; November 23, 1979.

THE GALILEAN MOONS OF JUPITER. Laurence A. Soderblom in *Scientific American*, Vol. 242, No. 1, pages 68—83; January, 1980.

HEAT FLOW FROM IO (JI). Dennis L. Matson, Gary A. Ransford and Torrence V. Johnson in *Journal of Geophysical Research*, Vol. 86, No. B3, pages 1664—1672; March 10, 1981.

SATELLITES OF JUPITER. Edited by D. Morrison. University of Arizona Press, 1982.

TWO CLASSES OF VOLCANIC PLUMES ON IO. Alfred S. McEwen and Laurence A. Soderblom in *Icarus*, Vol. 55, No. 2, pages 191—217; August, 1983.

Маров М. Я. ПЛАНЕТЫ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ. — М.: Наука, 1981.

## СЕЛЬСКИЕ ОБЩИНЫ В НАЧАЛЕ РАННЕГО ЖЕЛЕЗНОГО ВЕКА НА ТЕРРИТОРИИ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЕВРОПЫ

EUROPEAN PREHISTORY. Sarunas Milisauskas. Academic Press, 1978.

FROM BRONZE AGE TO IRON AGE: ECONOMIC, HISTORICAL AND SOCIAL CONSIDERATIONS. R. Peroni in *Italy before the Romans: The Iron Age, Orientalizing, and Etruscan Periods*, edited by David and Francesca R. Ridgway. Academic Press, 1979.

RURAL ECONOMY IN THE EARLY IRON AGE: EXCAVATIONS AT HASCHERKELLER 1978—1981. Peter S. Wells. Peabody Museum of Harvard University, 1983.

## СПИРАЛЬ ДНК

DNA: RIGHT-HANDED AND LEFT-HANDED HELICAL CONFORMATIONS. Alexander Rich, Gary J. Quigley and Andrew H.-J. Wang in *Biomolecular Stereodynamics*: Vol. 1, edited by R. H. Sarma. Adenine Press, 1981.

THE ANATOMY OF A-, B-, AND Z-DNA. Richard E. Dickerson, Horace R. Drew, Benjamin N. Conner, Richard M. Wing, Albert V. Fratini and Mary L. Kopka in *Science*, Vol. 216, No. 4545, pages 475—485; April 30, 1982.

MECHANICS OF SEQUENCE-DEPENDENT STACKING OF BASES IN B-DNA. C. R. Calladine in *Journal of Molecular Biology*, Vol. 161, No. 2, pages 343—352; October 25, 1982.

ORDERED WATER STRUCTURE AROUND A B-DNA DODECAMER: A QUANTITATIVE STUDY. Mary L. Kopka, Albert V. Fratini, Horace R. Drew and Richard E. Dickerson in *Journal of Molecular Biology*, Vol. 163, No. 1, pages 129—146; January 5, 1983.

SEQUENCE-DEPENDENT CONFORMATION OF AN A-DNA DOUBLE HELIX. Z. Shaked, D. Rabinovich, O. Kennard, W. B. T. Cruse, S. A. Salisbury and M. A. Viswamitra in *Journal of Molecular Biology*, Vol. 166, No. 2, pages 183—201; May 15, 1983.

BASE SEQUENCE AND HELIX STRUCTURE VARIATION IN B AND A DNA. Richard E. Dickerson in *Journal of Molecular Biology*, Vol. 166, No. 3, pages 419—441; May 25, 1983.

Иванов В. И. ДВОЙНАЯ СПИРАЛЬ ДНК. — Молекулярная биология (1983), т. 17, вып. 3, с. 616—621.

Журкин В. Б. Локальная подвижность двойной спирали ДНК. СРАВНЕНИЕ КОНФОРМАЦИОННЫХ РАСЧЕТОВ С ЭКСПЕРИМЕНТОМ. — Молекулярная



# Наука и общество

(начало см. на с. 25, 73)

сильных взаимодействий, которые могут маскировать данные, получаемые на других установках. Одна из главных целей, которая должна быть достигнута на ускорителе HERA, — проникнуть в поле, окружающее кварк, на расстояние порядка  $10^{-17}$  см. Если кварки не являются точечными частицами, то на таких расстояниях конечные размеры кварков уже проявят себя. В том случае, если у кварка есть структура и форма, на долю установки Desertron останется лишь их детальное изучение. Предполагается, что установка HERA будет готова к экспериментам в 1990 г.

На 12-й Международной конференции по ускорителям на высокие энергии, проходившей в Fermilab в августе 1983 г., было сделано несколько докладов о разработке и строительстве ускорителей в Китае, СССР и Японии. Недалеко от Пекина будет построен электрон-позитронный коллайдер на энергию 3 ТэВ, который должен войти в строй в 1987 г. В Институте физики высоких энергий в Серпухове (СССР) строится протонный ускоритель на 400 ГэВ — УНК (ускорительно-накопительный комплекс); его завершение намечено на 1988 г. В 90-х годах энергия, получаемая на УНК, достигнет 3 ТэВ, а впоследствии второй пучок протонов с энергией также 3 ТэВ будет сталкиваться с первым. Осуществление японского проекта Tristan началось в 1981 г.; его завершение намечено на 1986 г. Пучок электронов с энергией 30 ГэВ будет сталкиваться с пучком позитронов такой же энергии.

биология (1983), т. 17, вып. 3, с. 622—638.

Франк-Каменецкий М. Д. ФЛУКТУАЦИОННАЯ ПОДВИЖНОСТЬ ДНК. — Молекулярная биология (1983), т. 17, вып. 3, с. 639—652.

## КВАНТОВАЯ ГРАВИТАЦИЯ

ОБЩАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ. Под ред. С. Хокинга, В. Изразля. Пер. с англ. — М.: Мир, 1983.

QUANTUM GRAVITY II. Edited by C. J. Isham, R. Penrose and D. W. Sciama. Oxford University Press, 1981.

АЛЬБЕРТ ЭЙНШТЕЙН И ТЕОРИЯ ГРАВИТАЦИИ. Сборник статей. — М.: Мир, 1979.

## СМЕНА ЖЕРТВЫ В ПРОСТОЙ ЭКОСИСТЕМЕ

THE DISTRIBUTION AND ABUNDANCE OF ANIMALS. H. G. Andrewartha and L. C. Birch. University of Chicago Press, 1954.

ECOLOGICAL GENETICS. E. B. Ford. John Wiley & Sons, Inc., 1965.

OF PREDATION AND LIFE. Paul L. Errington. Iowa State University Press, 1967.

## АЭРОДИНАМИКА АППАРАТОВ, ДВИЖИМЫХ МУСКУЛЬНОЙ СИЛОЙ ЧЕЛОВЕКА

MAN-POWERED VEHICLE DESIGN CRITERIA. Chester R. Kyle and Walter Edelman in *Proceedings of the Third International Conference on Vehicle System Dynamics held at Virginia Polytechnic Institute and State University, August 12—15, 1974, Blacksburg, Virginia*, edited by H. K. Sachs, Swets & Zeitlinger, Amsterdam, 1975.

PROCEEDINGS OF THE FIRST HUMAN POWERED VEHICLE SCIENTIFIC SYMPOSIUM. Edited by Alan Abbott. IHPVA, P. O. Box 2068, Seal Beach, Calif. 90740, 1981.

BICYCLES & TRICYCLES: AN ELEMENTARY TREATISE ON THEIR DESIGN AND CONSTRUCTION. Archibald Sharp. Reprint of 1896 edition by the MIT Press, 1982.

BICYCLING SCIENCE. Frank R. Whitt and David G. Wilson. The MIT Press, 1982.

Охлябинин С. Д. ДАВАЙ ИЗОБРЕТЕМ ВЕЛОСИПЕД. — М.: Молодая гвардия, 1981.

## ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ЗРИТЕЛЬНЫХ ИЛЛЮЗИЙ

DIFFERENTIAL GEOMETRY OF CURVES AND SURFACES. Manfredo P. do Carmo. Prentice-Hall, Inc., 1976.

VISION: A COMPUTATIONAL INVESTIGATION INTO THE HUMAN REPRESENTATION AND PROCESSING OF VISUAL INFOR-

MATION. David Marr. W. H. Freeman and Company, 1982.

THE MODULARITY OF MIND. Jerry Fodor. The MIT Press, 1983.

Грегори Р. Л. РАЗУМНЫЙ ГЛАЗ. Пер. с англ. — М.: Мир, 1972.

Рок И. ВВЕДЕНИЕ В ЗРИТЕЛЬНОЕ ВОСПРИЯТИЕ. — М.: Педагогика, 1980.

Шостаков В. И. ПРИРОДА НАШИХ ОЩУЩЕНИЙ. — М.: Просвещение, 1983.

## НАУКА ВОКРУГ НАС

THE HYDROPHOBIC EFFECT: FORMATION OF MICELLES AND BIOLOGICAL MEMBRANES. Charles Tanford. John Wiley & Sons, Inc., 1980.

INTERATOMIC AND INTERMOLECULAR FORCES. John P. McTague in *Encyclopedia of Physics*, edited by Rita G. Lerner and George L. Trigg. Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1981.

## В МИРЕ НАУКИ

Подписано в печать 07.02.84.  
По оригинал-макету. Формат 60 × 90/4.  
Гарнитуры таймс, гелиос  
Офсетная печать.  
Объем 7,00 бум. л.  
Усл.-печ. л. 14,00,  
Уч.-изд. л. 18,13  
Усл. кр.-отт. 43,36  
Изд. № 36/3472. Заказ 124-84  
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





*Издательство МИР предлагает:*

---

**П. Брода**  
**ПЛАЗМИДЫ**

Перевод с английского

---



---

Книга, написанная крупным английским ученым П. Бродой, посвящена молекулярной биологии и биохимии бактериальных плазмид. Подробно изложены выделение и методы исследования плазмидной ДНК, структура и эволюция плазмид, их реплика-

ция и конъюгация, значение плазмид в медицине и ветеринарии.

Предназначена для молекулярных биологов, биохимиков, генетиков, вирусологов, микробиологов.

1982, 224 страницы, с иллюстрациями.

Цена 2 р. 30 к.

---





# *В следующем номере:*

---



СЕЛЕКЦИЯ И ВЫРАЩИВАНИЕ РИСА

ИЗВЕРЖЕНИЕ ВУЛКАНА ЭЛЬ-ЧИЧОН  
И ЕГО ВОЗДЕЙСТВИЕ НА АТМОСФЕРУ ЗЕМЛИ

СТОЛКНОВЕНИЕ АТОМНЫХ ЯДЕР  
ПРИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЯХ

КОЛЬСКАЯ СВЕРХГЛУБОКАЯ СКВАЖИНА

РЕГУЛЯЦИЯ БИОСИНТЕЗА РИБОСОМ

ОДНОПОЛЫЕ ЯЩЕРИЦЫ

КАК ПЛОТНЕЕ ВСЕГО  
УПАКОВАТЬ ШАРЫ В ПРОСТРАНСТВЕ?

ИЗОБРЕТЕНИЕ ВОЗДУШНОГО ШАРА  
И РОЖДЕНИЕ СОВРЕМЕННОЙ ХИМИИ

ЧИСЛА-ГРАДИНЫ, ИЛИ ПРОБЛЕМА  $3N + 1$

СПЕКТРЫ УЛИЧНЫХ СВЕТИЛЬНИКОВ  
КАК ИЛЛЮСТРАЦИЯ ОСНОВНЫХ ПРИНЦИПОВ  
КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ