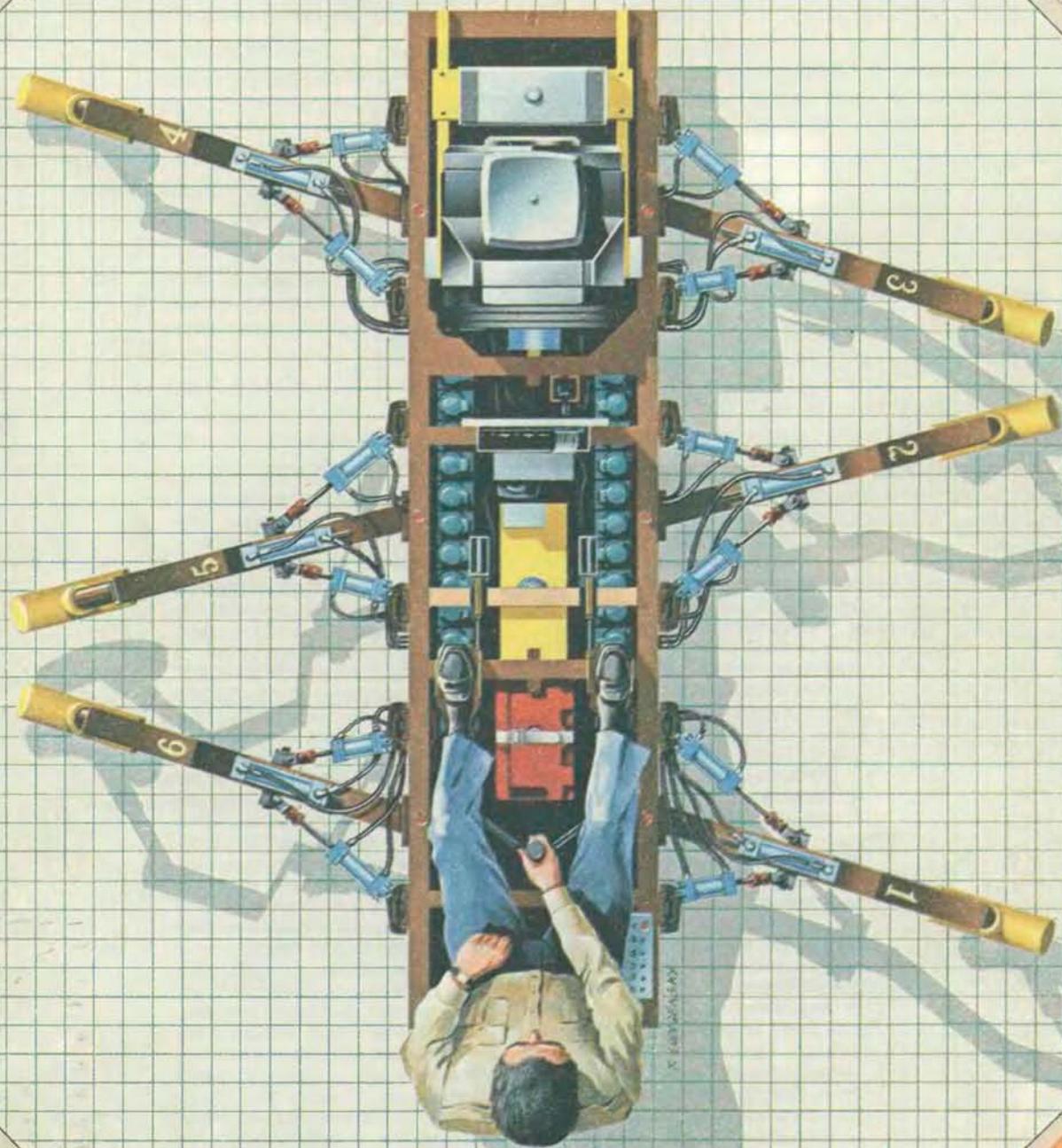


В МИРЕ НАУКИ

SCIENTIFIC
AMERICAN

Издание на русском языке



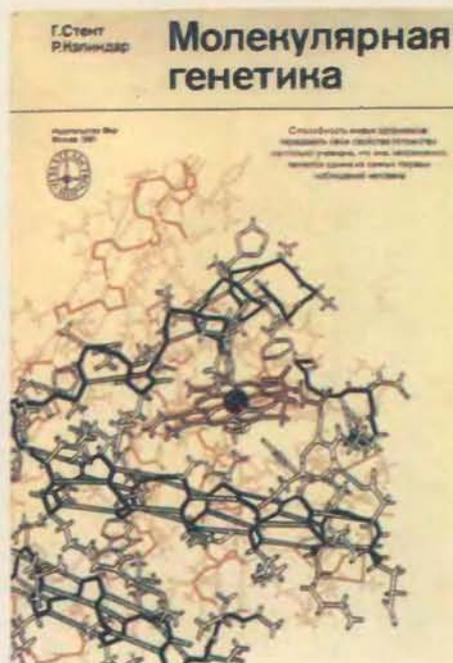
Март **3** 1983

ХОДЯЩИЕ МАШИНЫ

Издательство МИР предлагает:

Г. Стент, Р. Кэлиндар
МОЛЕКУЛЯРНАЯ ГЕНЕТИКА

Перевод с английского



Первое издание монографии Г. Стента вышло в русском переводе в 1974 г. и имело большой успех у читателей. Настоящее, второе издание демонстрирует стремительное развитие генетики. В книгу включены совершенно новые материалы (по генетике плазмид, генной инженерии и другим проблемам), ряд разделов значительно расширен, отдельные главы кардинально переработаны.

Необходимо подчеркнуть, что своими достижениями молекулярная генетика обязана главным образом исследованиям в области генетики микроорганизмов. Подъем, который в настоящее время переживает молекулярная генетика, стал возможен благодаря появлению двух таких взаимосвязанных методов, как клонирование генов и быстрое определение последовательности ДНК. И хотя развитие этих методов началось в рамках генетики бактерий и энзимологии, успехи, сделанные с их помощью в генетике микроорганизмов, способствовали интереснейшим открытиям в генетике эукариот.

Принятый в книге повество-

вательный стиль изложения отличается, с одной стороны, глубиной и полнотой, а с другой — удивительной простотой.

Книга адресована в первую очередь студентам, поэтому материал излагается в той исторической последовательности, в которой он становился известен. Авторы считают, что основы молекулярной генетики лучше воспринимается, если их преподнести именно в органической, а не логической манере. Книга построена так, что единственная формальная подготовка, которая требуется, — это знание основ химии; знание биологии и генетики не обязательно, хотя знакомство с их основами в объеме средней школы, несомненно, облегчает понимание книги.

«Молекулярная генетика» предназначена, конечно, не только студентам. Она будет интересна биологам всех специальностей, а также химикам, физикам, математикам, занимающимся проблемами биологии. Книга Стента и Кэлиндара — лучшая монография в современной мировой литературе по молекулярной генетике.

1981, 646 с. Цена 5 р. 60 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

№ 3 · МАРТ 1983

В номере:

- СТАТЬИ**
- 4 **Массовое культивирование клеток млекопитающих** *Джозеф Фидер и Уильям Р. Толберт*
Разработаны новые конструкции реакторов для массового выращивания капризных в культуре, сложно устроенных клеток, которые продуцируют нужные в медицине белки — интерферон и моноклональные антитела
- 14 **Ходящие машины** *Марк Х. Рейберт и Айвен Е. Сазерленд*
Пешее движение трудно воспроизвести искусственным путем, но решение этой проблемы, возможно, станет реальным с помощью современной техники управления. Эксперименты с прыгающими и ползающими машинами — еще одно средство на пути к пониманию механизма естественной ходьбы
- 26 **Волосковые клетки внутреннего уха** *А. Дж. Хадспет*
От этих сверхчувствительных передатчиков зависят наш слух и чувство равновесия. В ответ на малейшее давление на верхнюю часть клетки у ее основания возникает биоэлектрический сигнал
- 38 **Следы вымерших животных** *Дэвид Дж. Мосман и Уильям А. С. Сарджент*
Следы позвоночных животных встречаются в отложениях со времени выхода их на сушу 370 миллионов лет назад. Большинство вымерших животных вообще известно нам только по оставленным ими следам
- 50 **Исследование живых организмов методом ЯМР** *Р. Г. Шульман*
Обычно химические реакции обмена веществ изучают *in vitro*. Методом спектроскопии ядерного магнитного резонанса (ЯМР) можно исследовать реакции непосредственно в органах и тканях
- 60 **Физические процессы в органах трубах** *Невилл Х. Флетчер и Сусанна Туэйтс*
Величественное звучание органа создается благодаря взаимодействию строго синхронизированных по фазе воздушной струи, проходящей через разрез в трубе, и воздушного столба, резонирующего в ее полости
- 72 **Космический рентгеновский фон и его происхождение** *Брюс Маргон*
Как возникает диффузное рентгеновское излучение, которое, по-видимому, равномерно заполняет Вселенную? Новые открытия позволяют предположить, что один из источников рентгеновского излучения Вселенной — множество очень далеких квазаров
- 84 **Производство металлических отливок в древнем Китае** *Хуа Цзюемин*
К 500 году до н.э. в Китае уже существовал технологически совершенный способ стопочного литья: одновременной заливкой металлом многоярусных форм получалось большое количество одинаковых изделий
- РУБРИКИ**
- 25 50 и 100 лет назад
3 Об авторах
98 Магия математики
104 Книги
12, 13, 58, 71, 103 Наука и общество
92 Наука вокруг нас
107 Библиография

SCIENTIFIC AMERICAN

BOARD OF EDITORS

Gerard Piel
PUBLISHER

Dennis Flanagan
EDITOR

Brian P. Hayes
ASSOCIATE EDITOR

Philip Morrison
BOOK EDITOR

Francis Bello
John M. Benditt
Peter G. Brown
Michael Feirtag
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

© 1982 by Scientific American, Inc.

Торговая марка *Scientific American*,
ее 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

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

ХУДОЖЕСТВЕННЫЙ РЕДАКТОР
С. А. Стулов

ТЕХНИЧЕСКИЙ РЕДАКТОР
Л. П. Чуркина

КОРРЕКТОР
И. И. Дериколенко

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

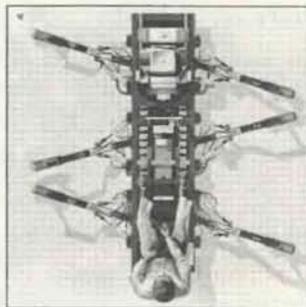
ТИТУЛЬНАЯ НАДПИСЬ,
ШРИФТОВЫЕ РАБОТЫ:
В. В. Ефимов

АДРЕС РЕДАКЦИИ
129820, Москва, И-110, ГСП
1-й Рижский пер., 2

ТЕЛЕФОН РЕДАКЦИИ
286.2588

© Перевод
на русский язык и оформление:
издательство «Мир», 1983

На обложке



ХОДЯЩИЕ МАШИНЫ

Машина с шестью ногами, которая в основном управляется встроенным микропроцессором (см. статью М. Рейберта и А. Сазерленда «Ходящие машины», с. 14). Она перемещается «ползком»; при таком движении проблема сохранения равновесия не имеет существенного значения, так как машина постоянно может опираться по меньшей мере на три ноги, образующие треножник. Установленные на машине датчики передают в управляющий микропроцессор данные о положении каждой ноги и о действующих на нее силах. Человек, ведущий машину, может изменять направление движения, придавая большую скорость ногам с левой или с правой стороны. Он может также менять положение корпуса машины — поднимать его выше или ниже над землей и корректировать команды микропроцессора при выборе опорных точек на неровной поверхности. Машина приводится в действие бензиновым двигателем мощностью 18 л.с.; ноги перемещаются с помощью гидравлических приводов. Водитель сидит сзади, откуда ему хорошо видно, как маневрируют ноги. Подобные машины могут успешно использоваться там, где колесные и гусеничные транспортные средства неэффективны.

Иллюстрации

ОБЛОЖКА: Ted Lodigensky

СТР.	АВТОР/ИСТОЧНИК	СТР.	АВТОР/ИСТОЧНИК	СТР.	АВТОР/ИСТОЧНИК
5	Jack C. Wahl, Monsanto Company	38	Suzanne Swibald		Columbia University (внизу)
6—10	Jerome Kuhl	40—45	Patricia J. Wynne		
11	Jerome Kuhl (вверху); Joseph Feder and William R. Tolbert, Monsanto Company (внизу)	46	Philip J. Currie (вверху), Giuseppe Leonardi (внизу)	74	Ilil Arbel
15	Leg Laboratory, Carnegie-Mellon University	48	American Museum of Natural History	75	Walken Graphics
16—21	George V. Kelvin	51—57	Gabor Kiss	77	© 1960 National Geographic Society—Palomar Observatory Sky Survey. Воспро- изводится с раз- решения California Institute of Technology (вверху); Gary A. Chanan, Columbia University (внизу)
22	R. F. Bonifield	61	Pieter Stroethoff		
23	R. F. Bonifield, с любезного раз- решения New York Public Library	62	Andrew Christie		
27	Richard A. Jacobs, California Insti- tute of Technology	63	Neville H. Fletcher		
28	Bunji Tagawa	64—65	Andrew Christie		
29	A. J. Hudspeth	66	Pieter Stroethoff		
30—32	Bunji Tagawa	67	Neville H. Fletcher		
33	A. J. Hudspeth	68—69	Andrew Christie		
34—36	Bunji Tagawa	73	© 1960 National Geographic Society—Palomar Observatory Sky Survey. Воспро- изводится с раз- решения California Institute of Technology (вверху); Gary A. Chanan,	79	Bruce Margon, University of Washington (слева); Ilil Arbel (справа)
				80—81	Ilil Arbel
				84, 86	Michael Goodman
				87	Hua Jue-ming
				88, 90	Michael Goodman
				89	Hua Jue-ming
				91—96	Michael Goodman

Об авторах

Joseph Feder и William R. Tolbert (ДЖОЗЕФ ФИДЕР и УИЛЬЯМ Р. ТОЛБЕРТ «Массовое культивирование клеток млекопитающих») — сотрудники исследовательского отдела фирмы Monsanto. Над проблемой, которой посвящена статья, они работают вместе восемь лет. Фидер — старший научный сотрудник, в 1953 г. окончил Университет Рузвельта со степенью бакалавра. Впоследствии в Иллинойском технологическом институте (ИТИ) он получил степени магистра (1961 г.) и доктора (1964 г.) в области биохимии. Он является адъюнкт-профессором биохимии в Миссурийском университете (г. Сент-Луис). Толберт — руководитель исследовательской группы в фирме Monsanto. Степень бакалавра получил в 1964 г. в Ричмондском университете, а степени магистра (по физике) и доктора (по биофизике) получил соответственно в 1966 и 1971 гг. в Висконсинском университете (г. Мадисон). В 1971—1972 гг. работал в составе исследовательской группы в Университете Дюка. С 1972 по 1974 г. он вел самостоятельную научно-исследовательскую работу в исследовательском отделе больницы округа Аллегейни.

Marc H. Raibert и Ivan E. Sutherland (МАРК Х. РЕЙБЕРТ и АЙВЕН Е. САЗЕРЛЕНД «Ходящие машины») работают в Университете Карнеги—Меллона, первый из них — ассистентом, а второй — приглашенным* старшим исследователем на кафедре вычислительной техники и робототехники. С 1979 г. они одновременно и коллеги и соперники в области создания шагающих машин. Рейберт пишет о себе: «Получив докторскую степень в Массачусетском технологическом институте (МТИ), я пришел в лабораторию реактивного движения Калифорнийского технологического института (КТИ), где занимался разработкой ряда проектов в области робототехники. Там я и познакомился с Айвеном Сазерлендом, который тогда возглавлял в КТИ кафедру вычислительной техники. Вместе с ним мы . . . провели немало времени в мастерских, принимая участие в постройке небольшой шагающей машины с пневматическим приводом». Сазерленд получил степень доктора в МТИ, сейчас он сотрудничает с несколькими университетами и промышленными фирмами. О себе Са-

зерленд говорит: «Созданием роботов я занимался еще во время учебы в колледже, но затем увлекся другими исследованиями, а в 1979 г. Марк Рейберт возродил во мне интерес к шагающим механизмам. С тех пор примерно половину своего рабочего времени я посвящаю проблемам робототехники.

A. J. Hudspeth (А. ДЖ. ХАДСПЕТ «Волосковые клетки внутреннего уха») до конца прошлого года был профессором биологии в КТИ, а затем перешел на работу в Медицинскую школу Калифорнийского университета в Сан-Франциско на должность профессора физиологии. Имеет четыре ученые степени, которые все были получены в Гарвардском университете, — бакалавра (1967 г.), магистра (1968 г.) и доктора* (1973 г.), а также доктора медицины (1974 г.). В 1974 г. Хадспет был приглашен на научно-исследовательскую работу в Королевскую больницу в Стокгольме. С 1975 г. работал в КТИ.

David J. Mossman и William A. S. Sargeant (ДЭВИД ДЖ. МОССМАН и УИЛЬЯМ А. С. САРДЖЕНТ «Следы вымерших животных») — геологи, оба проявляют интерес к проблеме, которой посвящена статья. Моссман, уроженец Канады, получил степени бакалавра, а затем магистра в Университете г. Далхузи в провинции Новая Шотландия (Канада). Свое образование продолжил в Новой Зеландии, получив степень доктора в Университете провинции Отаго. Сейчас он доцент экономики геологии в Университете Маунт-Аллисон в провинции Нью-Брансуик. Сарджент родился и получил образование в Англии; степени бакалавра и доктора он получил в Шеффилдском университете. В 1972 г. он переехал в Канаду. Сейчас он профессор геологии Соскачеванского университета.

R. G. Shulman (Р. Г. ШУЛЬМАН «Исследование живых организмов методом ЯМР») — профессор, специалист в области молекулярной биофизики и биохимии, а также в области химии, возглавляет отделение биологических наук в Йельском университете. Имеет три ученые степени — бакалавра (1943 г.), магистра (1947 г.) и доктора (1949 г.). Как стипендиат Комиссии по атомной энергии в 1949—1950 гг.

* В данном случае речь идет о традиционной степени доктора философии (в области физики, биологии, техники, истории и т. д.). В ряде областей, например в медицине, педагогике, в юридических науках и др., существуют свои докторские степени. — *Прим. перев.*

занимался научно-исследовательской работой в Калифорнийском технологическом институте. С 1950 по 1953 г. возглавлял исследования в области полупроводников в фирме Hughes Aircraft Company. С 1953 по 1979 г. работал в научно-исследовательском институте фирмы Bell Laboratories, а затем перешел в Йельский университет.

Neville H. Fletcher и Suzanne Thwaites (НЕВИЛЬ Х. ФЛЕТЧЕР и СУСАННА ТУЭЙТС «Физические процессы в органических трубах») живут и работают в Австралии. Н. Флетчер — профессор физики в Университете Новой Англии, С. Туэйтс готовится в том же университете к получению степени доктора. Флетчер имеет две ученые степени — бакалавра и доктора. Первоначально сферой его научных интересов была физика твердого тела и физика атмосферы, но последние 10 лет он уделяет много внимания музыкальной акустике и механизмам генерации звуков у животных. Флетчер — директор Австралийского физического института и ученый секретарь отделения физических наук в Австралийской Академии наук. Туэйтс имеет степень бакалавра и магистра в области естественных наук, которые получила в Университете Западной Австралии.

Bruce Margon (БРЮС МАРГОН «Космический рентгеновский фон и его происхождение») — профессор, заведующий кафедрой астрономии Вашингтонского университета (г. Сиэтл, шт. Вашингтон). Окончил Колумбийский университет, в 1973 г. получил степень доктора (в области астрономии) в Калифорнийском университете в г. Беркли. В настоящее время он занимается исследованиями по программе, финансируемой фондом А. П. Слоуна. В 1981 г. Американское астрономическое общество присудило ему премию имени Н. Л. Пирса.

Hua Jue-ming (ХУА ЦЗЮЕМИН «Производство металлических отливок в древнем Китае») — научный сотрудник Института истории естествознания (ИИЕ) Академии наук КНР в Пекине. В 1958 г. окончил Университет Цинхуа, где изучал механику. С 1956 по 1964 г. изучал историю плавки и литья металлов в Китае. Впоследствии поступил в аспирантуру ИИЕ, специализируясь в истории металлургии. Хуа Цзюемин — член совета Китайского общества истории науки и техники; возглавляет в этом обществе комиссию по истории металлургии. Последние его работы посвящены производству бронзовых изделий Шень Чжоу, изготовлению колокольчиков в эпоху, предшествовавшую династии Цинь, а также литых железных изделий в эпоху династий Хань и Вэй.

* В американских университетах существует практика приглашения отдельных выдающихся ученых и специалистов для выполнения какой-либо конкретной исследовательской работы или ведения учебных спецкурсов. — *Прим. перев.*

Массовое культивирование клеток млекопитающих

Разработаны новые конструкции реакторов для массового выращивания капризных в культуре, сложно устроенных клеток, которые продуцируют нужные в медицине белки — интерферон и моноклональные антитела

ДЖОЗЕФ ФИДЕР И УИЛЬЯМ Р. ТОЛБЕРТ

КУЛЬТИВИРОВАНИЕ клеток человека или других млекопитающих — часто наилучший путь получить некоторые соединения, важные в научно-исследовательской работе, медицинской практике или в промышленности. Однако вырастить большое количество таких клеток в искусственной среде совсем не просто. Хорошо освоенные приемы технической микробиологии годятся лишь для бактерий, дрожжей и грибов. Клетка одноклеточного организма с ее прочной оболочкой представляет собой вполне автономную в смысле метаболизма систему. Для ее питания нужны относительно простые вещества: для бактерий, например, достаточны лишь глюкоза и простые соли. Микроорганизмы прекрасно размножаются, плаывая в жидкой питательной среде в ферментерах объемом до 200 000 л. Они хорошо переносят даже условия густых клеточных суспензий, которые получают при активном размножении микроорганизмов, причем энергичное перемешивание таких суспензий механическими приспособлениями клеткам не вредит.

Совсем другое дело — клетки млекопитающих. Они крупнее большинства микробных клеток, сложнее устроены и менее стойки к внешним воздействиям. Тонкая цитоплазматическая мембрана животной клетки не защищена прочной клеточной стенкой. Потребности таких клеток в питательных веществах разнообразнее, к тому же они до конца еще не изучены. Клетка млекопитающего в отличие от свободно живущего одноклеточного организма всегда часть какой-либо специализированной ткани, она зависит от жизнедеятельности других клеток и от работы систем циркуляции жидкостей организма — именно таким путем обеспечиваются для каждой клетки оптимальные и стабильные условия ее существования. Выделение из состава ткани и культивирование в искусственной среде крайне неблагоприятны для

нее. Большинство животных клеток вообще не растет в суспензионных культурах, им надо прикрепляться к какой-нибудь поверхности. Многие годы разрабатывались методы выращивания клеток млекопитающих в небольших количествах в условиях лаборатории. Наладить массовое культивирование оказалось гораздо труднее.

ПОТРЕБНОСТЬ в методах массового выращивания клеток млекопитающих сегодня очень велика. Возьмем, к примеру, интерферон. Это вещество выделяют клетки животных, оно способно подавлять вирусную инфекцию. Интерферон открыли еще в 1957 г., но его действенность при лечении заболеваний до сих пор не доказана окончательно, потому что до недавнего времени не умели культивировать помногу клетки млекопитающих, в которых можно индуцировать синтез интерферона.

Еще пример. Моноклональные антитела к специфическим белкам образуются в так называемых гибридомах, т.е. клетках, получившихся в результате слияния клеток — продуцентов антител и клеток злокачественной миеломы. Гибридомы клеток мышей легко выращивать, так как они образуют опухоли у лабораторных животных. Моноклональные антитела человека эффективны как терапевтические средства, но методы выращивания гибридом человека в культуре еще не разработаны.

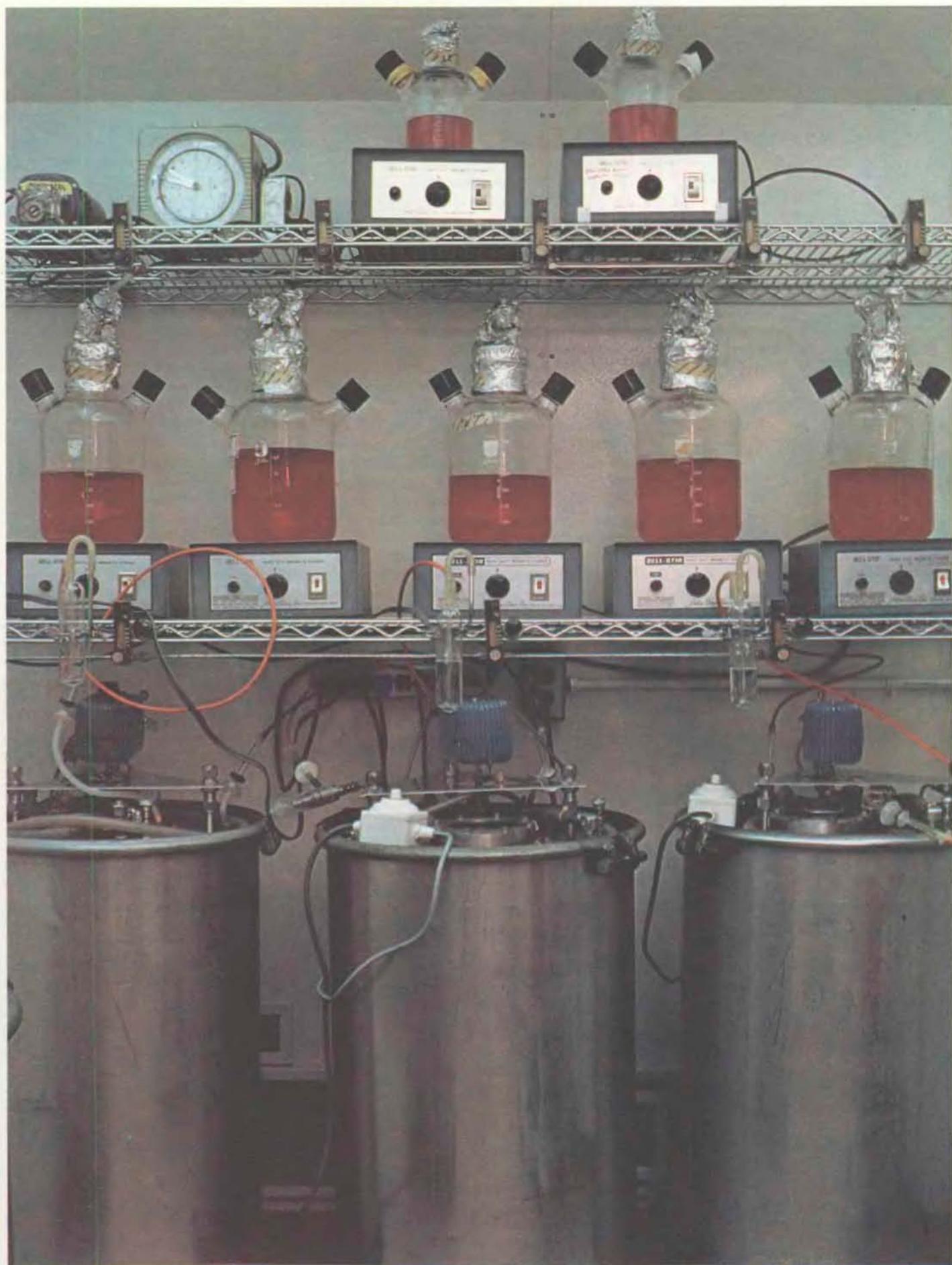
Большие перспективы открывает в медицине использование фермента урокиназы. При участии урокиназы пламиноген превращается в фермент плазмин, который разрушает тромбы. Урокиназу лучше всего выделять из почечных клеток человека, но их трудно выращивать в большом количестве. Свой проблемы есть и у фармакологов, занятых разработкой новых средств, влияющих на развитие сосудов и на рост опухолей. В этих исследованиях нужны так называемые ангиогенные факторы (факторы роста сосудов),

причем в больших количествах. В норме эти вещества действуют как межклеточные регуляторы — они способствуют росту кровеносных сосудов. Специфические опухолевые ангиогенные факторы, которые образуются в опухолевых клетках, вызывают васкуляризацию и рост опухолей. Сейчас изучают возможность массированного применения препаратов, содержащих ангиогенные факторы; предполагается, что таким путем можно индуцировать новообразование сосудов.

Интересны также поверхностные антигены клеток человека. С их помощью клетки узнают друг друга — отличают «своих» от «чужих», они различны в опухолевых и в нормальных клетках. Поверхностные антигены — предмет активных исследований. Потребность в них велика, и удовлетворить ее можно одним путем — массовым культивированием клеток.

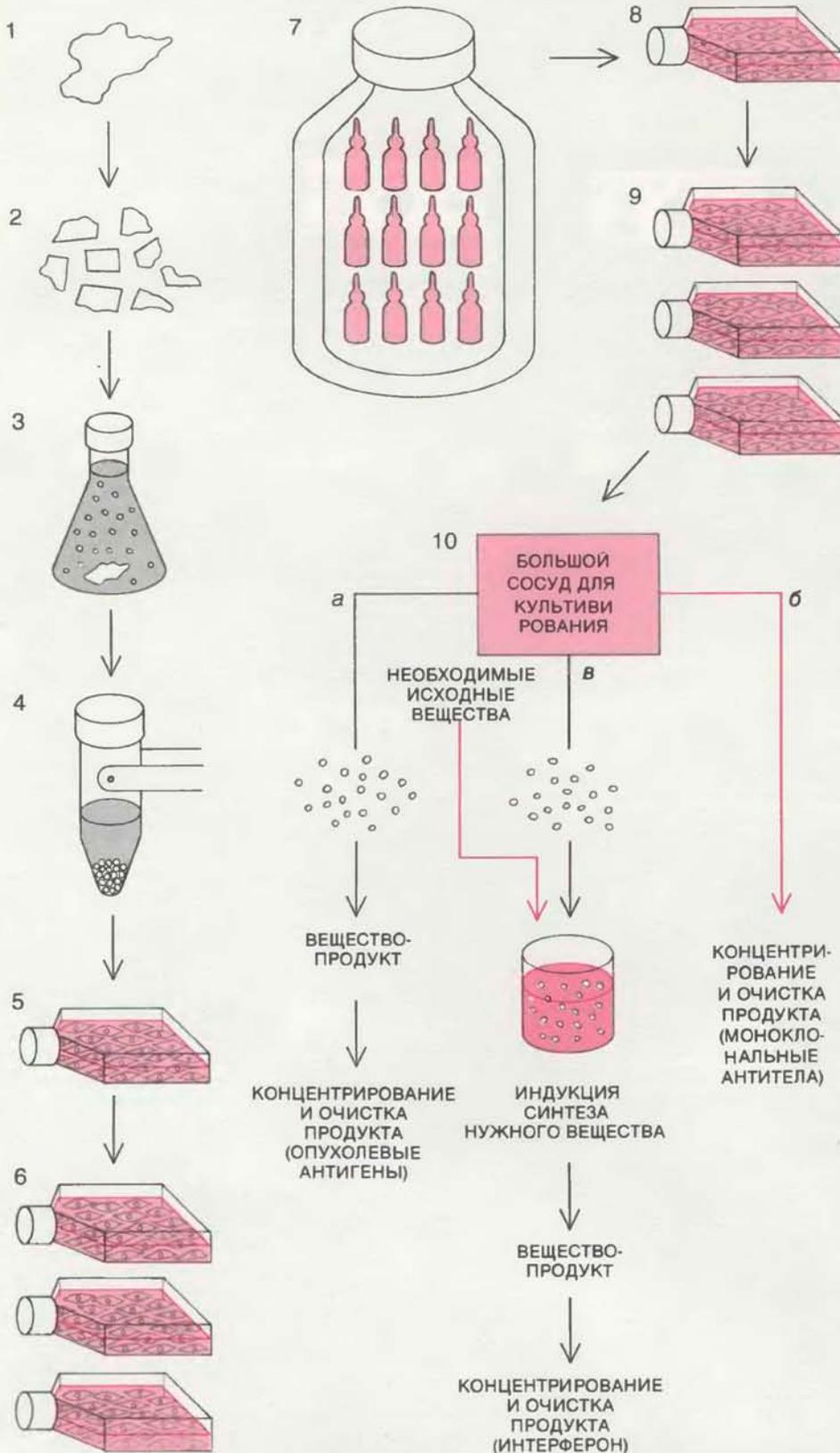
Большая практическая ценность этих и ряда других соединений побудила исследователей заняться поиском методов массового культивирования клеток млекопитающих. Ученых, работающих в этой области, не останавливают даже очевидные успехи геной инженерии. Мы знаем, что теперь есть методы, при помощи которых в бактерию можно ввести ген, ответственный за синтез нужного белка, и заставить бактериальную клетку его синтезировать. Но далеко не все биологически важные соединения можно получить методами геной инженерии. Когда мы имеем дело с мало изученными веществами, такими, как ангиогенные факторы, остается одно — выращивать клетки, которые их синтезируют, и выделять из них интересующие нас соединения.

КУЛЬТИВИРОВАНИЕ клеток млекопитающих начинается с того, что какую-то ткань животного тщательно измельчают механически или при помощи ферментов (иногда эти два способа сочетают). В результате получают смесь из отдельных клеток и их



СОСУДЫ для культивирования больших количеств клеток млекопитающих. Три цилиндрических стальных бака — это 100-литровые реакторы для суспензионных культур. Стекланные сосуды, которые стоят на полках, используются для культивирования клеток до переноса их в реакторы

большого объема. Каждый сосуд стоит на магнитной мешалке. Среда в них красного цвета, так как содержит pH-индикатор. (Снимок сделан в лаборатории Monsanto Company.)



БЕЛКИ из культуры клеток млекопитающих выделяют так. Ткань (1) режут на мелкие кусочки (2), обрабатывают ферментом, разрушающим белки (3), и получают суспензию отдельных клеток. Их собирают при помощи центрифуги (4) и переносят в питательную среду, в которой они размножаются, пока не покроют дно флакона (5). Слой клеток отделяют от дна флакона при помощи фермента и переносят в новые флаконы, чтобы размножить культуру (6). Хранят культуру замороженной в жидком азоте (7). По мере надобности порции ее оттаивают и используют для дальнейшего культивирования (8), которое ведут в больших масштабах (9), чтобы получить достаточно клеток для емкостей большого объема (10). Нужные белки можно получить разными способами. Можно собрать клетки, отделить синтезированный ими продукт (например, поверхностный антиген опухолевых клеток) и очистить его (а). Чтобы получить моноклональные антитела, которые клетки выделяют в окружающую среду, жидкость откачивают из реактора, не трогая клетки (б). В случае интерферона нужна еще одна стадия — индукция синтеза (в).

агломератов. Эту смесь переносят в соответствующую питательную среду, в состав которой обычно входят соли, глюкоза, некоторые аминокислоты и сыворотка крови (на долю сыворотки обычно приходится от 5 до 20% объема всей жидкости). Сыворотка в такой искусственной среде служит источником веществ, которые не идентифицированы, но, как показал опыт, совершенно необходимы для жизнедеятельности клеток и их роста в культуре. Сыворотка — дорогой препарат, и именно это обстоятельство, как правило, определяет экономическую целесообразность культивирования клеток. Так как в культуре клетки не находятся под защитой иммунной системы организма, во избежание инфекции обычно приходится добавлять в среду антибиотики. Необходимо также внимательно следить за pH среды, температурой, содержанием кислорода и углекислого газа. Приходится также контролировать содержание солей, поскольку, чтобы обеспечить целостность легко повреждаемых клеточных мембран, необходимо поддерживать определенное осмотическое давление.

Большинству клеток млекопитающих надо прикрепляться к какой-то поверхности, но клетки крови и лимфы, клетки опухолей и некоторые другие трансформированные клетки растут и в суспензионных культурах. Суспензию клеток можно держать просто в колбе, перемешивая среду магнитной мешалкой — она вращается внутри сосуда благодаря магнитному приводу под дном колбы. Такие колбы емкостью от 25 мл до 15 л и применяют в лабораториях. Для культивирования клеток, растущих только в прикрепленном состоянии (к ним относится большинство нормальных клеток), придумано множество приспособлений: здесь и плоскостонные чашки Петри, и многолунковые пластинки, и разнообразные флаконы. Лучше всего клетки растут во вращающихся бутылках — сосудах цилиндрической формы, лежащих в горизонтальном положении. Клетки прикрепляются к внутренней их поверхности. При медленном вращении сосуда (около одного оборота в минуту) клетки попеременно то погружаются в питательную среду, то оказываются в воздухе. В самых больших бутылках площадь внутренней поверхности, на которой могут расположиться клетки, составляет около 1600 см².

Для выращивания клеток в суспензионных культурах разработаны реакторы большого объема. За основу взяли ферментеры для одноклеточных микроорганизмов. Однако по ходу дела обнаружилось существенные недостатки таких систем. Прежде всего построенные по образцу ферментеров реакторы были сложной конструкции и

стоили дорого. Чтобы создать в них асептические условия, приходилось применять для стерилизации сложное оборудование и вводить в среду антибиотиков.

Массовое выращивание прикрепляющихся к поверхностям клеток еще труднее. До недавнего времени выход находили простейшим способом: увеличивали число сосудов для культивирования.

Несколько лет назад в нашей лаборатории в научно-исследовательском центре Monsanto Company начали разрабатывать новые системы для массового культивирования клеток. Нам необходимо было устройство, позволяющее получать еженедельно сотни литров суспензионной культуры клеток. Желательно было сделать такую систему, для стерильности которой антибиотиков не нужны. Дело в том, что в присутствии антибиотиков иногда бывает трудно заметить медленно развивающееся загрязнение среды микроорганизмами; кроме того, антибиотики могут непредсказуемым образом влиять на обмен веществ культивируемых клеток. Решено было собрать установку из отдельных модулей: большой объем продукции можно было бы получать, просто увеличивая число одновременно действующих отдельных сосудов для культивирования. Нам хотелось также применить некоторые новые приспособления, поскольку крупным, легко повреждаемым клеткам млекопитающих нужно было создать особые условия.

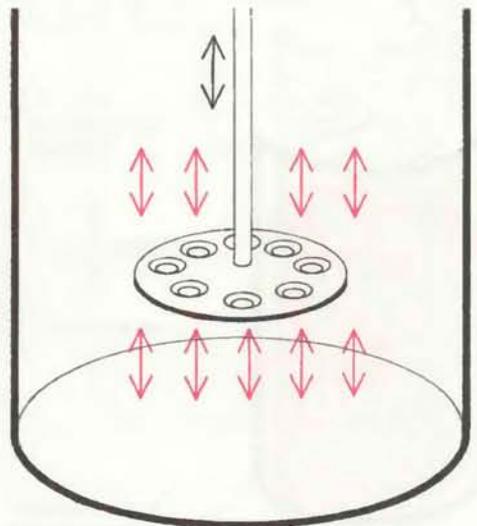
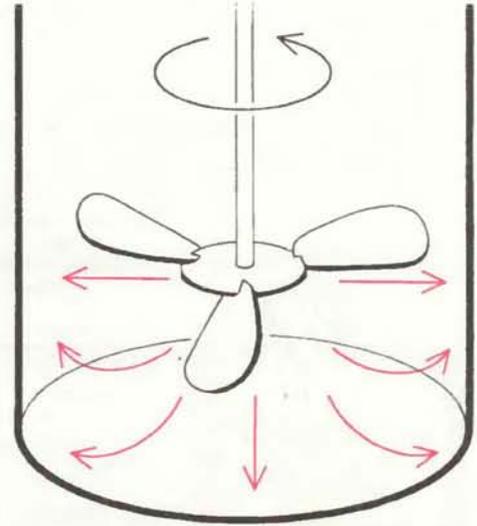
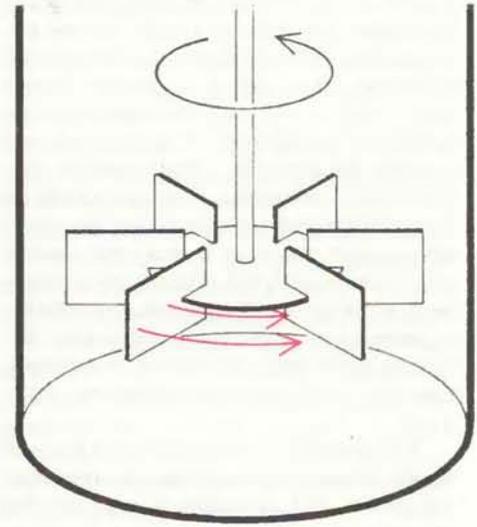
Для этих целей мы разработали недорогой, простой по устройству 100-литровый реактор. Основная его часть — барабан объемом 120 л, он сделан из нержавеющей стали и снабжен съемной головкой, через которую проходят все вводы и выходы системы. Реактор не такой уж большой, так что его можно стерилизовать в автоклаве. В съемной его части есть специальное устройство, позволяющее отбирать пробы из культуры без риска занести при этом инфекцию. Для перемешивания служит вибратор, разработанный в 1965 г. Дж. Муром, сотрудником Института имени Росвелла Парка. Этот вибратор представляет собой диск с коническими отверстиями, прикрепленный к вертикальному стержню. Стержень вибрирует с высокой частотой, и жидкость перемешивается — причем главным образом в вертикальном направлении — благодаря колебаниям диска, сквозь отверстия которого она проходит. Движение передается вибратору посредством гибкой диафрагмы в верхней части реактора, так что устройство Мура имеет еще одно преимущество: сохраняется герметичность сосуда. Кислород в среду поступает по шлангам, проходящим через головку реактора; так же удаляется

воздух, насыщенный углекислым газом.

Мы сделали несколько таких 100-литровых реакторов, причем расходы составили всего двадцатую часть от стоимости обычных ферментеров. В реакторах можно с успехом выращивать в суспензионной культуре самые разнообразные клетки; за прошедшие несколько лет мы получили сотни тысяч литров суспензионных культур клеток человека и грызунов. Несмотря на очевидный успех, работая над созданием более крупных реакторов, мы решили не копировать эту конструкцию, просто увеличив ее, а разработать новую систему. Нам хотелось больше приблизить условия в культуре к естественным условиям существования клеток млекопитающих.

В НАШЕЙ системе со 100-литровым реактором клетки растут в меняющихся условиях. Вначале среда богата всеми необходимыми веществами и практически не содержит конечных продуктов метаболизма. Со временем доля полезных веществ в среде уменьшается, а доля отходов соответственно растет, что ограничивает размножение клеток и плотность культуры. Живой организм обеспечивает своим клеткам совсем иные условия — условия гомеостаза. Система кровообращения бесперебойно поставляет клеткам кислород и питательные вещества, она же удаляет углекислый газ и другие отходы жизнедеятельности. Несмотря на то что плотность клеток в живой ткани в 500-1000 раз больше, чем в культуральной жидкости, каждая клетка существует в стабильных условиях. К такому постоянству культуральной среды и надо стремиться. Для этого можно, например, постоянно вводить в культуру свежую питательную среду и удалять отработанную; трудность здесь в том, что среда должна сменяться, а клетки оставаться на месте. В 1969 г. Ф. Химмельфарб и Ф. Тейер (Arthur D. Little, Inc.) разработали проточную систему для культивирования клеток млекопитающих в суспензиях. Плотность клеток в среде у них оказалась гораздо выше, чем в обычных суспензионных культурах.

Мы также создали небольшие проточные установки с 4- и 44-литровыми реакторами, в которых можно вырастить столько же клеток, сколько и в 100- и 1000-литровом реакторах обычной конструкции. Среда в этих реакторах сменяется при помощи вспомогательного сосуда с цилиндрическим фарфоровым фильтром с порами менее 2 мкм. Фильтр задерживает клетки, часть отфильтрованной среды снова попадает в реактор для повторного использования, а часть идет в отходы. Убыль жидкости восполняется свежей питательной средой. Для того чтобы



ПЕРЕМЕШИВАНИЕ микроорганизмов в ферментерах производится турбинной мешалкой (вверху). Для культур клеток млекопитающих предпочтительнее мешалка в форме винта, которая перемешивает жидкость и по вертикали, и по горизонтали при небольшой скорости вращения (в середине), или вибротомашалка (внизу) — она колеблется вверх-вниз, перемешивая среду в вертикальном направлении.

клетки и их обломки не забивали поры фильтра, его вращают; для той же цели можно использовать механическую мешалку. И в том и в другом случае слои жидкости вблизи поверхности фильтра смещаются, не давая клеткам оседать на фильтре. При помощи специальных датчиков, приспособления для отбора проб, системы питающих и отводящих шлангов в реакторе можно контролировать pH среды и поддерживать оптимальный уровень кислорода, углекислого газа и питательных веществ даже при активном размножении клеток и высокой плотности культуры.

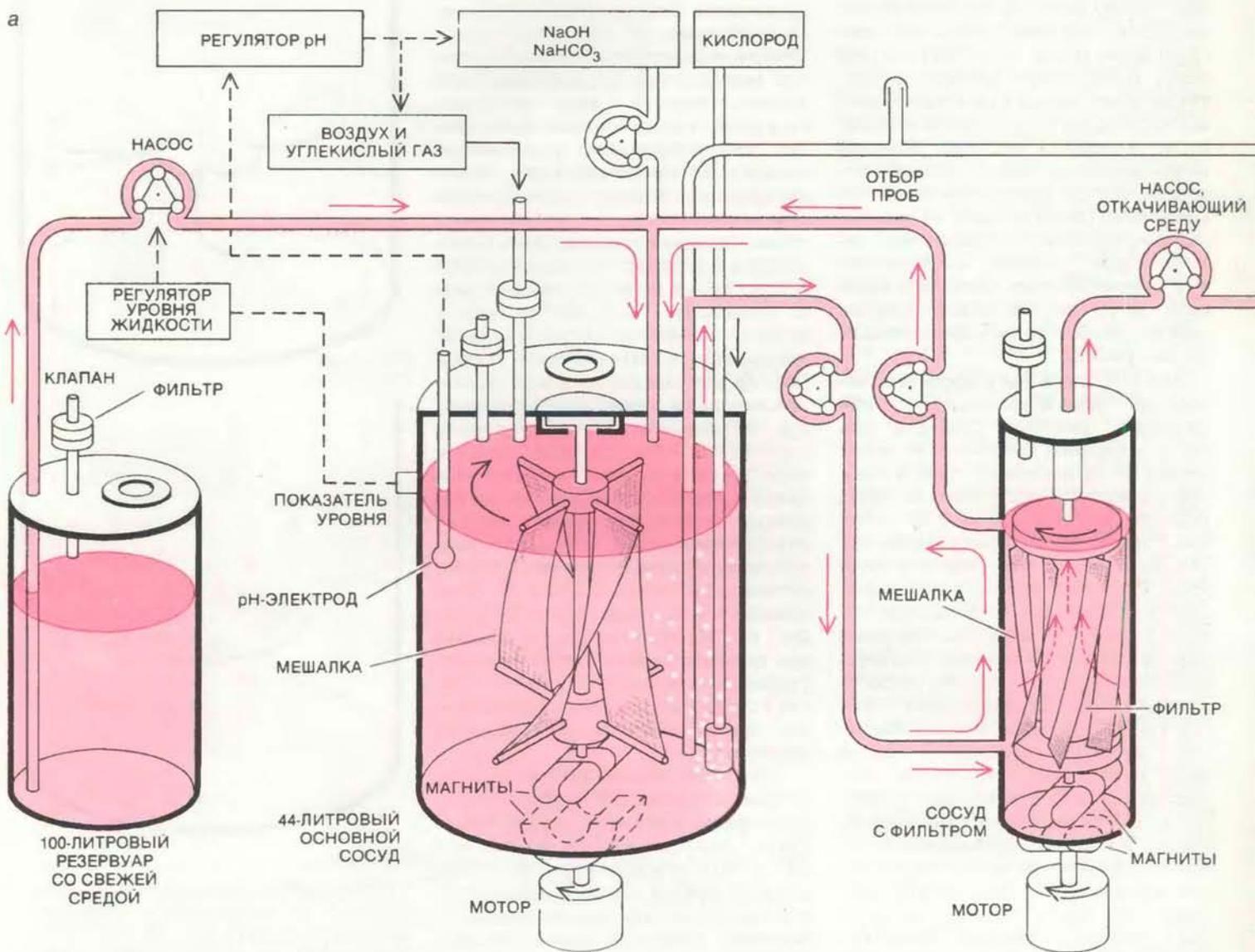
Для культур с большой плотностью необходимы щадящие способы перемешивания. Мы применили следующую конструкцию. Четыре гибкие лопасти,

сплетенные из нейлоновых нитей, медленно (8 — 20 об/мин) вращаются в реакторе. Концы лопастей движутся, как рыбий хвост, и перемешивают жидкость. Так как энергия движения такой мешалки распределяется на всю площадь лопастей, перемешивание получается довольно деликатным и клетки не повреждаются.

Чтобы сравнить эффективность проточных и обычных систем, мы выращивали крысиные опухолевые клетки и в тех и в других реакторах. Мы определяли концентрацию глюкозы и молочной кислоты (молочная кислота — основной продукт обмена веществ) в удаляемой из реакторов среде. Скорость роста культуры в реакторах обоих типов была одинаковой, но плотность клеток в проточной системе ока-

залась гораздо выше — около 25 млн. клеток на 1 мл жидкости против 1 млн. на 1 мл в реакторе обычного типа. При максимальной плотности культуры в проточном реакторе все клетки оставались живыми, а в обычных реакторах 30% погибало. Не следует пренебрегать и экономической стороной дела: выход клеток на 1 л среды был в проточных реакторах в 2,5 раза выше (и это при том, что среду через проточные реакторы прокачивают). Более того, проточный реактор может работать как своего рода хеостат: часть среды с клетками можно отбирать и таким путем поддерживать оптимальную плотность культуры.

НАПОМИМ, что большинство клеток млекопитающих может расти,



ПРОТОЧНЫЙ РЕАКТОР, разработанный авторами этой статьи. В нем культуральная среда постоянно обновляется. На рисунке а изображена схема установки для суспензионных культур, а на рисунке б — ее вариант, приспособленный для выращивания клеток на гранулах-микроносителях. Культуру в основном объеме реактора перемешивает не-

обычная мешалка — четыре гибкие лопасти, сделанные из нейлоновых нитей. Из основного объема среда прокачивается через сосуд с встроенным фарфоровым фильтром в резервуар для отработанной среды. Фильтр задерживает клетки, которые затем уносятся током среды обратно в реактор. Небольшая лопастная мешалка перемешивает среду в

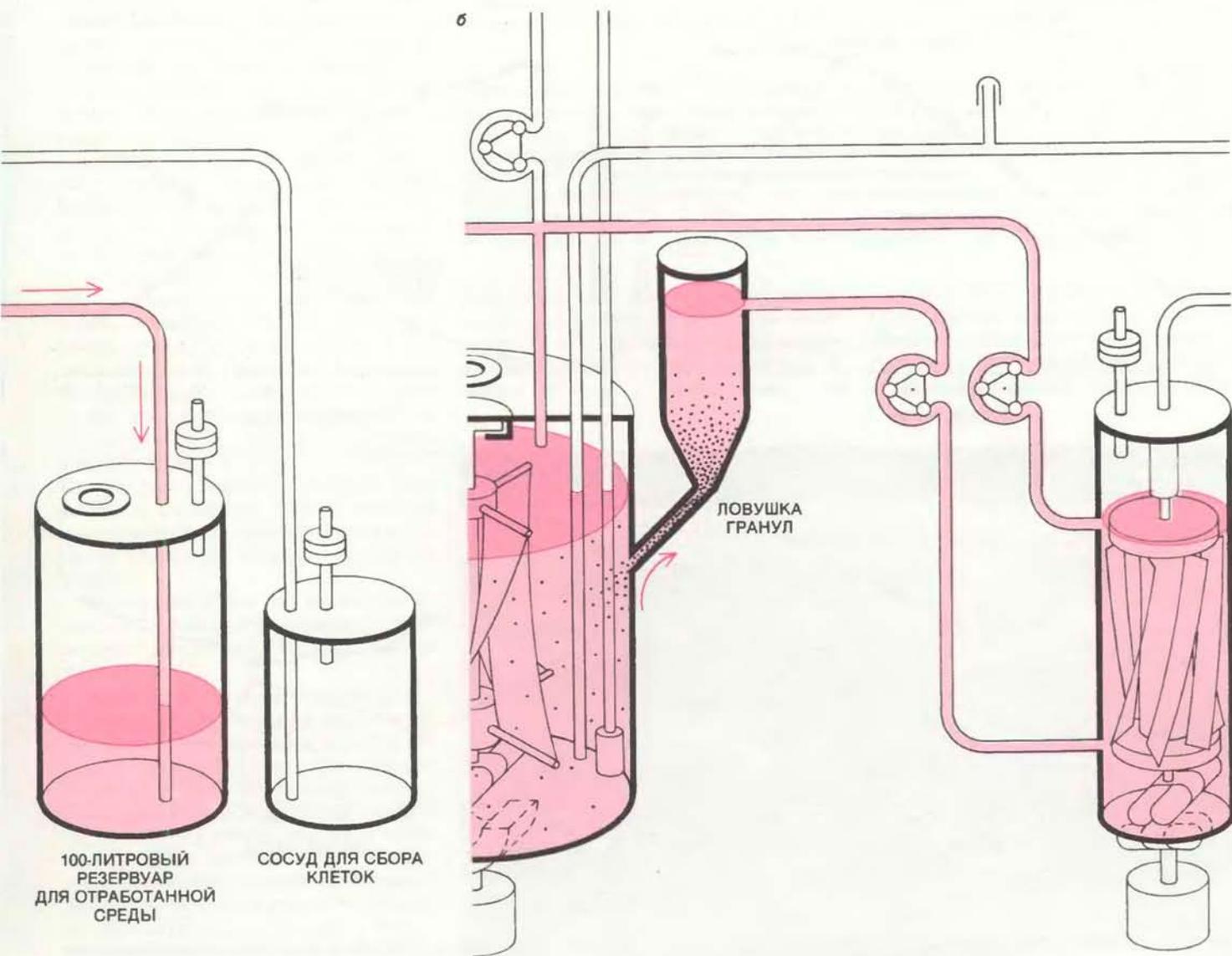
только прикрепившись к поверхности стенок сосуда для культивирования. К сожалению, отношение площади стенок к объему во флаконах и во вращающихся бутылках невелико. Для выращивания клеток в большом количестве это не годится. Было предложено немало хитроумных способов, как увеличить отношение поверхности к объему: клетки выращивали на губчатых полимерах, на тонких трубочках или нитях, стопках тонких пластинок либо крошечных гранулах (микроносителях). Мы попытались приспособить для массового культивирования клеток гранулы-микроносители и нитевидные трубочки.

В наших исследованиях и в работах Р. Кнацка и его сотрудников (Национальный институт рака) выяснилось,

что клетки млекопитающих хорошо растут на трубочках с внешним диаметром от $\frac{1}{3}$ до $\frac{3}{4}$ мм. Трубочки следует брать пористые, чтобы проходящий через них воздух мог диффундировать к клеткам, которые растут на наружной поверхности трубочек, омываемой питательной средой. Из множества способов расположения носителей мы выбрали «плоскую подушку»: трубочки размещали в реакторе в 3—6 слоев.

Свежая питательная среда поступает в реактор под подушку из трубочек, проходит сквозь нее и затем удаляется из верхней части реактора. Чтобы ток жидкости был равномерным и перпендикулярным плоскости подушки, среду прокачивают через микропористый фильтр. Он представляет собой пла-

стинку из нержавеющей стали с отверстиями диаметром 2 мкм. Другой фильтр с отверстиями диаметром 20 мкм помещают над подушкой, чтобы уменьшить противоток жидкости. Преимущество такой конструкции в том, что расстояние между входом и выходом системы очень небольшое (в отличие, например, от цилиндрического «патрона», в котором жидкость движется параллельно нитям). По этой причине в установке почти нет градиентов концентрации питательных веществ и отходов жизнедеятельности клеток и клетки постоянно омываются практически свежей средой. Концы трубочек соединяют нетоксичным эластичным веществом, а затем, срезав начало и конец пучка трубочек по этому месту, их подсоединяют к системе,



сосуде с фильтром, чтобы поры фильтра не засорялись. Вещества, секретирруемые клетками, можно получать из отработанной среды. Откачав культуру из основного объема реактора, собирают сами клетки. Большинству клеток млекопитающих для роста необходимо прикрепиться к какой-нибудь поверхности — в суспензиях они не растут. Для это-

го очень хороши микроносители. Чтобы приспособить проточный реактор для выращивания клеток на микроносителях, между основным объемом и фильтром помещают емкость-ловушку. Гранулы с сидящими на них клетками образуют в ней осадок, стекающий затем обратно в основной объем реактора.

обеспечивающей циркуляцию воздуха и углекислого газа.

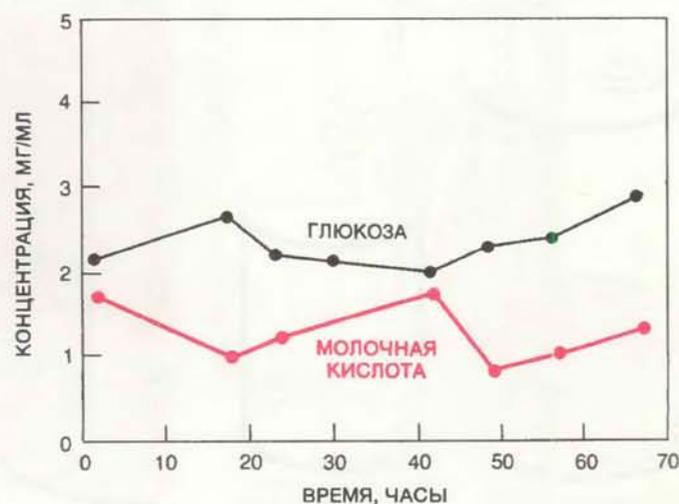
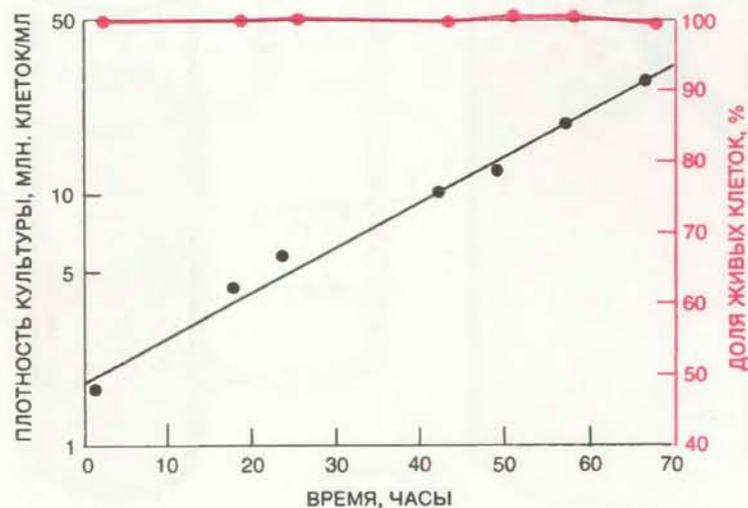
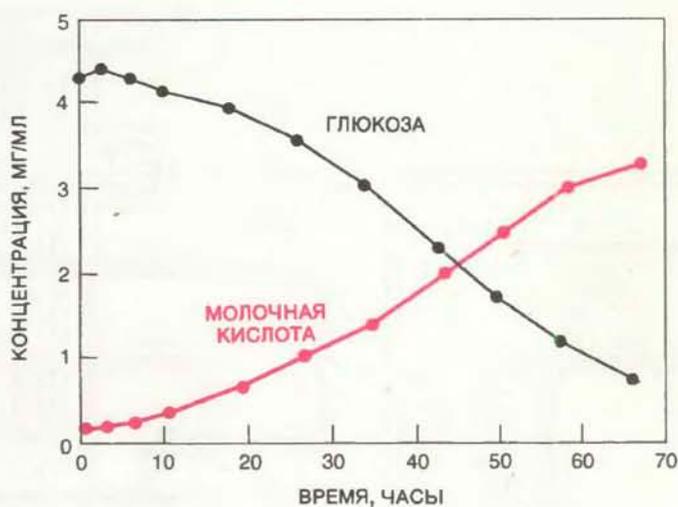
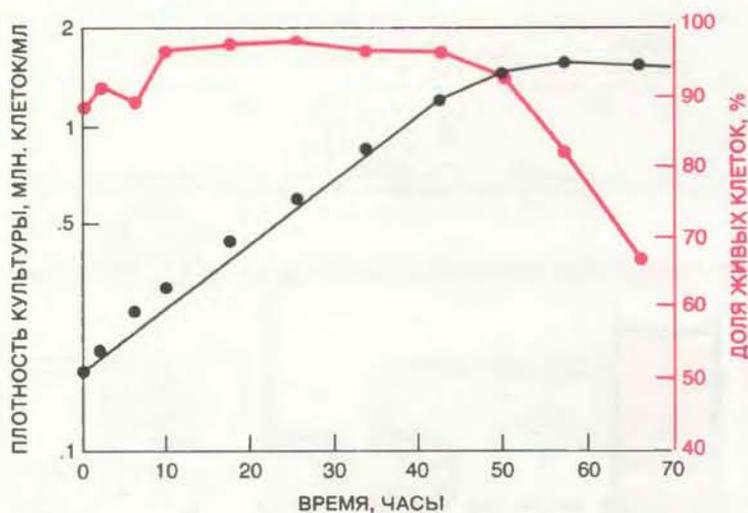
Мы сделали два реактора-прототипа; в одном площадь подушек из трубочек была 930 см², а в другом 9300 см², причем больший из них имел размеры всего 40 см² × 4,5 см. В течение долгого времени в этих реакторах удавалось поддерживать культуры с высокой плотностью клеток. В малом реакторе мы выращивали культуру легочных клеток человека. Плотность культуры достигла 1 млн. клеток на 1 см² поверхности трубочек, что в 10 раз больше, чем при культивировании во вращающихся цилиндрических бутылках. В этих установках особенно удачно решена задача смены среды: скорость ее протекания можно отрегулировать таким образом, чтобы содержание питательных веществ и отходов при размноже-

нии клеток не менялось. Обычно для этого следят за содержанием молочной кислоты на выходе реактора — по нему судят о количестве клеток, выросших на трубочках, и в зависимости от их массы устанавливают необходимую скорость поступления свежей питательной среды.

В таком реакторе вырастает не просто много клеток. В нем, по сути дела, образуется искусственная ткань. Миллиарды клеток сплошным слоем покрывают трубочки и растут даже внутри них. В наших опытах огромные колонии клеток жили в благоприятных условиях очень долго — от 21 до 59 дней. Все это время клетки непрерывно синтезировали нужные нам вещества — урокиназу и ангиогенный фактор, которые мы выделяли из среды, прошедшей через реактор. Если культура

не загрязняется микроорганизмами, то такая система может работать долго. Когда рост культуры закончится, дорогую сывоточную среду для культивирования можно заменить на более дешевую — с небольшой долей сывотки или совсем без нее. Клетки при этом чувствуют себя прекрасно и продолжают продуцировать биологически активные вещества.

КУЛЬТИВИРОВАНИЕ клеток на микроносителях впервые осуществил в 1967 г. А. Ван-Везель в Национальном институте здравоохранения Голландии. С тех пор появилось множество вариантов этого метода для промышленных целей небольших масштабов. Гранулы микроносителя делают из природного полимера глюкозы — декстрана — или какого-либо синтети-



ЭКОНОМИЧНОСТЬ ПРОТОЧНОЙ СИСТЕМЫ очевидна, если сравнить рост клеток (слева) и истощение среды (справа) в сосудах с магнитной мешалкой (вверху) и в 4-литровом проточном реакторе (внизу). Крысиные опухолевые клетки, которые хорошо растут в суспензиях, в обеих системах размножаются с одинаковой скоростью, но в проточном реакторе культура достигает гораздо большей плотности (черные кривые слева), причем даже при очень высокой плотности клетки сохраняли жизнеспособность (цветные кривые

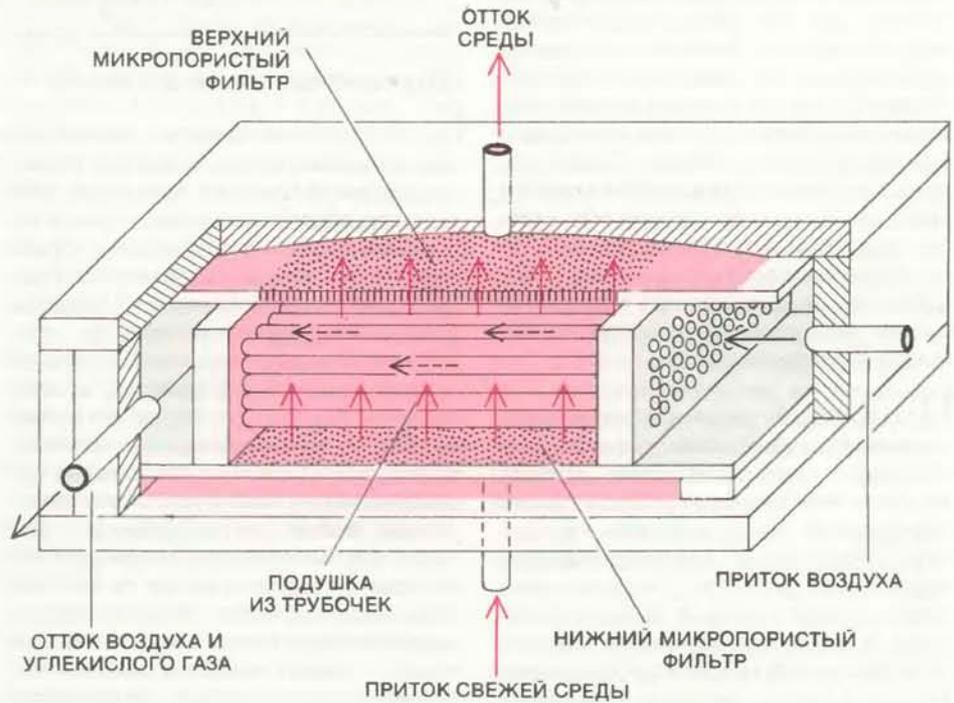
слева). Содержание глюкозы и содержание молочной кислоты отражают соответственно концентрацию питательных веществ и накопление отходов метаболизма в среде по мере роста культуры. В сосудах с магнитной мешалкой уровень глюкозы постепенно падает, одновременно накапливается молочная кислота. В проточном реакторе концентрации питательных веществ и продуктов метаболизма в среде держатся на постоянном уровне.

ческого полимера; размер их — от 50 мкм до нескольких сотен микрометров в диаметре. Микроносители суспендируют в культуральной среде, затем добавляют клетки, которые прикрепляются к поверхности гранул и начинают размножаться. Система с микроносителями хороша тем, что, хотя клетки растут на поверхности гранул, мы, по сути дела, имеем суспензионную культуру, поскольку сами гранулы взвешены в жидкости. Это позволяет применять установки, предназначенные для суспензий клеток.

Впрочем, выращивание клеток на микроносителях в реакторах для суспензионных культур не очень рационально. Приходится контролировать не только состав среды, но и распределение в системе микроносителей. При энергичном перемешивании гранулы часто сталкиваются, клетки на них повреждаются. С одной стороны, гранулы нужно хорошо суспендировать, а с другой — нельзя допускать массовой гибели клеток. Пришлось разработать особые, щадящие способы перемешивания. Чтобы выращивать клетки в большом количестве, нужна соответственно большая площадь поверхности, значит, необходима высокая плотность гранул в среде. Но чем она выше, тем чаще гранулы сталкиваются. В случае микроносителей отношение поверхности к объему среды велико, что благоприятно для клеток, и они бурно размножаются, но соответственно быстро истощается среда, в ней накапливаются токсичные продукты обмена веществ. Выросшую культуру далеко не просто перенести в реактор большего объема: для этого надо снять клетки с гранул и суспендировать их в свежей среде с новыми гранулами. При работе с обычными реакторами для суспензионных культур отделить клетки от гранул без больших потерь не удается.

Мы приспособили для микроносителей проточный реактор и добились заметного увеличения плотности клеток в культуре.

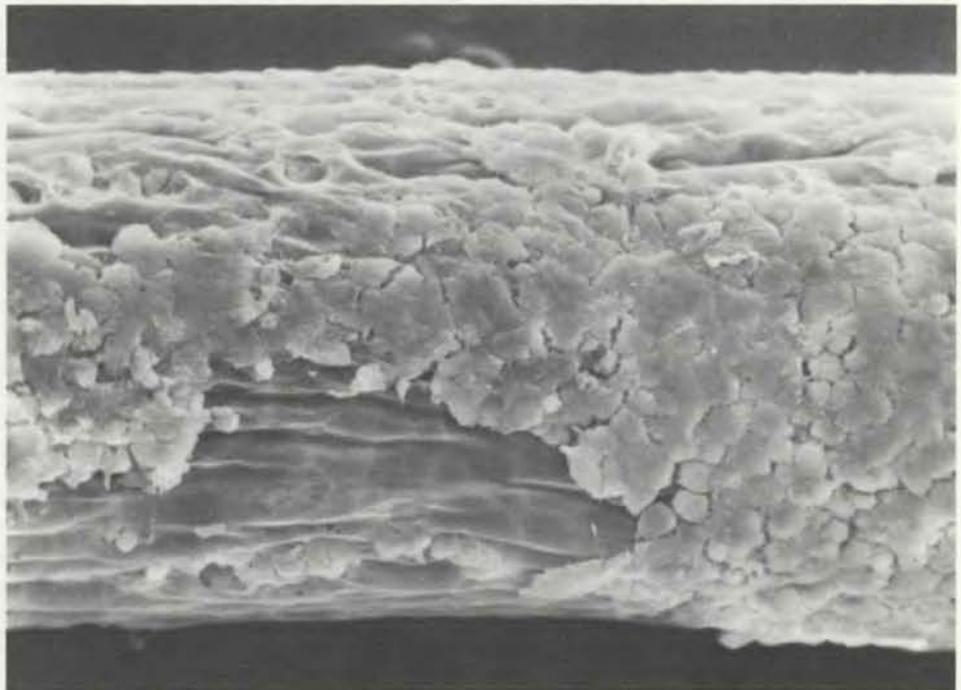
Мешалка с гибкими лопастями достаточно деликатно и в то же время эффективно перемешивала суспензию гранул; при небольшой скорости вращения (8 — 20 об/мин) можно было создать высокую концентрацию гранул — до 12 г/л, а клетки при этом не повреждались. Конструкцию нашего проточного реактора для этих опытов пришлось несколько изменить. Между основным сосудом и сосудом с фильтром мы поместили ловушку гранул. Среда прокачивается к фильтру, и по пути гранулы, покрытые клетками, попадают в ловушку-отстойник, где и собираются на дне. В ловушке гранулы не перемешиваются, они начинают слипаться и образуют густой осадок, который постепенно перетекает в основ-



ПРОТОЧНЫЙ РЕАКТОР С ПОДУШКОЙ ИЗ ПОРИСТЫХ ТРУБОЧЕК ДИАМЕТРОМ 0,3 мм. В нем создаются оптимальные условия для роста клеток. Трубочки изготовлены из пластмассы. Концы трубочек подсоединены к камерам с воздухом и углекислым газом (направление движения газов показано черными стрелками). Равномерность потока среды (ее движение показано цветными стрелками) обеспечивается двумя микропористыми фильтрами. Клетки прикрепляются к поверхности трубочек и размножаются. Со временем они образуют нечто вроде искусственной ткани, которая может существовать довольно долго — несколько месяцев.

ной объем реактора, а практически не содержащая теперь гранул среда течет через фильтр. Далее она либо вновь поступает в реактор, либо удаляется. В осадке гранулы с сидящими на них

клетками тесно прилегают друг к другу. В то же время к ним продолжает поступать свежая питательная среда из основного объема реактора. Между отдельными гранулами образуются мо-



РАКОВЫЕ КЛЕТКИ ЧЕЛОВЕКА (клетки HeLa), растущие на полых нитях. Они не только покрывают всю ее поверхность, но проникают и в полости. Микрофотография сделана на сканирующем электронном микроскопе (увеличение $\times 250$).

стики из клеток, на них нарастают еще клетки, так что общее число клеток иногда вчетверо больше, чем может поместиться на поверхности гранул. Агрегация клеток и гранул неожиданно решила проблему переноса культуры в реактор большего объема. Оказалось, что в комочках клетки слабее связаны с гранулами, видимо, потому, что сильны межклеточные взаимодействия. Если откачать из реактора культуру и обработать ее ферментом трипсином, клетки легко отделяются от гранул без всяких повреждений.

ПРОТОЧНЫЙ реактор с микроносителями оказался очень удачным для массового культивирования клеток, которым необходимо прикрепляться к поверхности. Давно известно, что гранулы обеспечивают культуре большую поверхность для роста. Теперь мы научились снимать урожай со всего этого поля, и даже многократный урожай, если использовать эффект образования мостиков между клетками. Весь секрет в том, что в проточном реакторе клеткам создаются оптимальные условия для роста и размножения даже при высокой плотности культуры, а она здесь в 5—10 раз больше, чем в обычных реакторах.

Соединение двух приемов — выращивание культур с высокой плотностью клеток и перенос их в реактор большего объема — дало поразительные результаты. Так, в одном из опытов мы вырастили в маленьком (4-литровом) проточном реакторе 40 млрд. фибробластов человека. Чтобы получить такое количество клеток во вращающихся бутылках, нужно 1300 сосудов. Фибробласты отделили от гранул-микроносителей и перенесли в 44-литровый реактор, добавив 400 г новых гранул (общая площадь их поверхности 188 м²). Второй цикл культивирования дал 340 млрд. клеток. Чтобы получить такой урожай, нужно было бы взять 11 000 вращающихся бутылок. Полученные таким методом фибробласты дали нам не только интерферон, но и урокиназу, и ангиогенный фактор. Наилучший показатель экономичности проточной системы на микроносителях — число выращенных клеток в расчете на литр израсходованной культуральной среды, оно приблизительно в 4 раза больше, чем для вращающихся бутылок.

Такие высокопроизводительные и экономичные системы для массового выращивания разнообразных клеток млекопитающих без антибиотиков найдут самое широкое применение как в научных исследованиях, так и в промышленности. Эффективная новая технология позволит не только глубже изучить биологические процессы, но и получать вещества, которые так нужны в медицине.

Платоновы тела в химии

С ТЕХ ПОР как Фридрих Август Кекуле установил форму молекулы бензола, увидев во сне змей, кусающих себя за хвост, исследование топологии и геометрии органических молекул стало одной из наиболее увлекательных задач структурной химии. Молекула ДНК тысячекратно изгибается, прежде чем ее концы соединятся, образуя кольцо; известны ферменты, в присутствии которых молекула ДНК сворачивается в замысловатые топологические узлы. Однако лишь недавно исследователям удалось создать молекулярный аналог ленты Мёбиуса — полоски, у которой концы соединены после поворота одного из них на 180° относительно другого. Упорядоченное расположение атомов в кристалле, как правило, характеризуется высокой периодической симметрией, тем не менее синтез молекул в форме пяти правильных многогранников (тел Платона) сопряжен с серьезными трудностями. Недавно проведен синтез молекулы — додекаэдра.

Молекула в форме ленты Мёбиуса была синтезирована Д. Уолбой, Р. Халтиунгером и Р. Ричардсом из Университета шт. Колорадо (г. Боулдер); в принципе они действовали тем же способом, каким это делается на бумажной модели с помощью ножниц и клея. На первом этапе атомы углерода и кислорода объединяют в две параллельные цепи, которые сращиваются за счет образования связей между атомами углерода одной цепи и ближайшими к ним атомами углерода другой цепи. При этом двойные связи разбивают всю молекулу, названную ТНУМЕ-диолдитозилат (трис-тетраоксиметилэтилендиолдитозилат), на конденсированные циклы, что придает ей форму лестницы — сетка химических связей в такой лестнице задает поверхность, аналогичную поверхности длинной, узкой полоски бумаги. «Вершина» и «основание» этой лестницы обладают взаимным химическим средством, поэтому они могут соединяться, образуя кольцо. Если перед соединением концов молекулы «лестница» перекручивается, то поверхность, определяемая системой химических связей, будет иметь те же топологические свойства, что и полоска бумаги, концы которой скручены на пол-оборота и склеены.

Одно из замечательных свойств ленты Мёбиуса заключается в том, что она имеет только один непрерывный край: проведите пальцем вдоль края бумажной модели — и вам придется пройти весь край, прежде чем вы вернетесь в исходную точку. Более того, если разрезать ленту вдоль по всей дли-

не, то получится одна более узкая полоска, которая в два раза длиннее и которая перекручена на полный оборот вокруг своей оси. Уолба и его коллеги провели химическую имитацию такого разрезания. Под действием озона ступеньки молекулярной ленты Мёбиуса — двойные связи углеродных колец — разрушаются; оказалось, что в результате образуется цикл, вдвое больше исходного. Следующим шагом, по мнению Уолбы, будет создание более длинных молекулярных лестниц, с тем чтобы перед соединением концов молекулы было возможно более сильное перекручивание. Разрезав вдоль кольцо, скрученное на полный оборот, получим два кольца, продетых одно в другое; разрезание ленты, перекрученной на полтора оборота, дает одно кольцо, продетое само в себя так, что образуется узел, по форме напоминающий лист клевера.

Синтез молекулы в форме додекаэдра требует еще большей изобретательности: отдельные части 12-гранного полиэдрического каркаса молекулы необходимо соединить в строго определенной последовательности, в противном случае вся структура сплющится и разрушится вследствие собственного энергетического напряжения. Л. Пакетт и его коллеги из Университета шт. Огайо — единственные химики, которым пока что удалось этот синтез; другие группы исследователей изучают иные подходы к созданию такой же структуры. Пакетт и его сотрудники исходили из циклопентадиена — углеводорода, состоящего из пяти атомов углерода, образующих правильный пятиугольник; в конечном счете он становится одной из граней додекаэдра. Отдельные грани додекаэдра соединяют последовательно таким образом, что промежуточно образующиеся молекулы сохраняют приблизительно осевую симметрию. Конечный продукт, получивший название додекаэдрана, имеет молекулы из 20 атомов углерода, расположенных в вершинах додекаэдра. Двадцать атомов водорода, каждый из которых присоединен к атому углерода, лежат вне полиэдрической поверхности, образованной атомами углерода и связями между ними.

Додекаэдран — последний из пяти синтезированных углеводородов с молекулами в форме правильных многогранников. Кубан, в молекуле которого атомы углерода лежат в вершинах куба и с каждым из них связан атом водорода, был синтезирован в 1964 г. Ф. Итоном и Т. Коулом-младшим из Чикагского университета. Соответствующий четырехгранный остов из атомов углерода следовало бы назвать тетраэдром, он не был синтезиро-

ван, однако исследователям в ФРГ удалось получить тетраэдр из атомов углерода, расположив в его вершинах бутильные группы (C_4H_9). По-видимому, как октаэдр, восьмигранная, так и икосаэдр, двадцатигранная органическая молекула, слишком нестабильны, чтобы существовать, но подобные молекулы вполне можно синтезировать из неуглеродных атомов.

Геометрическое моделирование в химии может показаться не более чем элегантным фокусом, однако высокая симметрия молекул в форму правильных многогранников позволяет подробно исследовать свойства химических связей. Кроме того, как отмечает Пакетт, высокосимметричные молекулы с присоединенной к одной из вершин аминогруппой легко проникают через клеточную мембрану и могут разрушать вирусные частицы внутри клетки.

Судьба больных в руках предпринимателей

В УСЛОВИЯХ свободного предпринимательства товар не станет производить, если спрос на него не может обеспечить прибыль от торговли. Если товаром являются медикаменты, потребность в которых диктуется болезнями, то такая экономическая система уже угрожает жизни людей. Владельцы предприятий американской фармацевтической промышленности цинично считают, что, пока от какой-либо болезни не умрут по меньшей мере 100 000 человек, производство нужного лекарства не даст прибыли. Заболеваний, от которых в США умерли менее 100 000 граждан, насчитывается около 2000. Фармацевтическая промышленность страны проявляет полное равнодушие к тому, что эти болезни уносят все больше и больше жизней, в то время как лекарства от них существуют — производство их до сих пор не налажено, потому что это невыгодно!

Эта проблема недавно обсуждалась на специальной конференции, которая проходила в Мичиганском университете в Анн-Арборе. Вопрос о недостатке необходимых лекарств стоит сейчас очень остро. Палата представителей и Сенат недавно приняли ряд законопроектов, в которых предусматривается введение налоговых стимулов для компаний, выпускающих экономически невыгодные лекарства. В США по инициативе Управления по контролю за качеством пищевых продуктов, медикаментов и косметических средств (FDA) создано специальное учреждение, которое должно улучшить обеспечение недостающими лекарствами и упростить процедуру одобрения лекарств, к которой фирма-изготовитель не будет иметь отношения.

Некоторые обозреватели считают, что дефицит многих медикаментов создается из-за того, что слишком сложны и строги правила испытания лекарств до выпуска их в продажу. Они отмечают, что действующие постановления предусматривают тщательные испытания новых лекарств, а это стоит часто очень дорого. Дж. Брюэр, сотрудник Медицинской школы Мичиганского университета, один из организаторов конференции, оспаривает эту точку зрения. Он считает, что «дело не в строгости постановлений. ... FDA стремится упростить процедуру одобрения лекарств».

Брюэр утверждает, что основная причина недостаточного производства лекарственных средств от некоторых болезней заключается в слабой заинтересованности фармацевтических компаний в их изготовлении, а также в том, что в стране недостаточно широко ведутся прикладные медико-биологические исследования. Брюэр приводит в пример три лекарственных препарата. Один из них — L-5-гидрокси-триптами, которым можно лечить миоклонию, редкое нервно-мышечное расстройство. Другое вещество — цистамин, который применяется при лечении цистинозии — врожденного нарушения обмена аминокислот; цистинозия — довольно редкое заболевание, оно встречается у одного ребенка из 50 000. Третий препарат — ацетат цинка; Брюэр исследует его с целью использовать для выявления симптомов серповидно-клеточной анемии, врожденного дефекта эритроцитов, от которого страдают 25 000 американских негров. По данным Брюэра, с помощью соединений цинка можно контролировать один из основных симптомов этой болезни — патологически высокий уровень кальция в эритроцитах. По словам Брюэра, ни одна фармацевтическая компания не проявила интереса ни к одному из трех названных веществ, несмотря на то что они очень эффективны как лекарственные препараты.

Что касается ацетата цинка, то его производство затрудняется еще и потому, что активным началом в нем является цинк — природный элемент и его нельзя патентовать. Если какая-либо компания предпримет шаги к тому, чтобы FDA одобрило ацетат цинка и санкционировало его применение в лечебной практике, то она не сможет настаивать на исключительных правах на его производство. А другая компания, сэкономив средства на разработке этого препарата, могла бы продавать его дешевле.

Число лекарственных средств, которые уже разработаны, но отсутствуют в продаже, оценивается по-разному. Фармацевтические компании теперь не обязаны сообщать, сколько препара-

тов они испытали, но не пустили в продажу. На конференции в Анн-Арборе представители Ассоциации изготовителей фармацевтической продукции говорили, что при ревизии фирм, производящих медикаменты, и учреждений, ведущих медико-биологические исследования, было обнаружено, что лишь около 10 лекарств, в которых есть потребность, не производится. Брюэр же считает это обследование недостаточным полным. По его словам, ни он сам, ни другие известные ему исследователи, которые работали над созданием недостающих лекарств, не подвергались никакой проверке. Вероятно, к категории неразрабатываемых и невыпускаемых лекарств можно отнести больше 10 наименований.

Далее можно отметить, что пути лечения или эффективной терапии известны лишь примерно для 10% из 2000 «невыгодных» болезней. Биологи не проявляют особого интереса к изысканиям лекарств для остальных 90% заболеваний. Одна из причин — недостаточное финансирование федеральным правительством исследований, направленных на разработку лекарственных препаратов и специфических методов лечения. Большая часть фондов, отпускаемых на медико-биологические исследования, идет на изучение механизмов заболеваний и основных физиологических процессов. Лекарства и лечебные диеты остаются фирмам-изготовителям.

Брюэр утверждает, что если ставить вопрос о разработке методов лечения болезней, от которых сейчас нет лекарств, то национальные институты системы здравоохранения и Главное федеральное управление, финансирующее работы в области биологии, должны установить специальную процедуру пересмотра положения о дотации биологических исследований. Заявки на дотации от федерального правительства на создание новых лекарств и методов лечения удовлетворяются значительно хуже, чем заявки на финансирование фундаментальных исследований в области биологии. «Нам бросают какие-то крохи, ловко сводят субсидии к минимуму», — говорит Брюэр.

Брюэр добавляет, что без более активной общественной поддержки лекарства от многих болезней вообще никогда не появятся. Владельцы предприятий фармацевтической промышленности не могут радикально изменить свое отношение к создававшемуся положению, так как благополучие компаний зависит от их прибыли. Как говорит Брюэр, «фармацевтические компании могут быть полезны на последней стадии (испытания и продажи медикаментов), но начать должны специалисты в области медико-биологических исследований».

Ходящие машины

Пешее движение трудно воспроизвести искусственным путем, но решение этой проблемы, возможно, станет реальным благодаря современной технике управления. Эксперименты с прыгающими и ползающими машинами — еще одно средство на пути к пониманию механизма естественной ходьбы

МАРК. Х. РЕЙБЕРТ И АЙВЕН Е. САЗЕРЛЕНД

МНОГИЕ машины имитируют природу; наглядным примером является самолет, копирующий парящую птицу. Единственная форма передвижения животных, воспроизвести которую пока еще удастся с трудом, — это ходьба. Возможно, современные ЭВМ и системы управления с обратной связью окажут существенную помощь в создании ходящих машин. Этот вопрос мы сейчас изучаем, используя машинные модели и действующие механические конструкции.

Пока нам удалось построить две такие машины. Одна имеет шесть ног и управляется человеком; она предназначена для исследования особенностей передвижения насекомых, при котором равновесие не играет существенной роли. У второй машины только одна нога, и передвигается она скачками; эта модель используется для изучения проблем равновесия. Первый вид движения мы называем ползанием, чтобы отличать его от ходьбы, при которой обязательно требуется сохранять равновесие, а также от бега, который сопряжен еще и с полетом. Наша работа помогла нам понять, каким образом человек и животные ползают, ходят и бегают.

В отличие от колеса, которое при движении, находясь под нагрузкой, постепенно меняет точку опоры, нога меняет точку опоры сразу, и для этого она должна освободиться от нагрузки. Чтобы система на ножных опорах ползала, ходила или бегала, каждая нога ее должна попеременно находиться то в положении, когда она опирается о землю, будучи нагруженной, то в положении, свободном для перемещения, когда нагрузка снята. Такое циклическое чередование этапов движения — стойки, когда действует нагрузка, и переноса, когда нагрузка снимается, — наблюдается во всех системах, передвигающихся на ногах. Каждый, кто скакал на лошади рысью или галопом, знает, что чередование стойки и переноса сопровождается хорошо ощутимым движением вверх-вниз. Вероятно, можно

построить такую машину с ножными опорами, у которой это сопутствующее движение почти полностью будет отсутствовать.

Наши и другие работы в этой области могут в конечном итоге привести к созданию машин, которые будут ползать, ходить и бегать по мягкому грунту, преодолевать рытвины и ухабы на пересеченной местности, непроходимой для транспортных средств на колесном и гусеничном ходу. Такие машины смогут найти полезное применение в промышленности, сельском хозяйстве и военном деле. В условиях труднопроходимой местности машины на ножных опорах имеют явные преимущества. Они могут выбирать точки для лучшей опоры, уменьшать крен, а также перешагивать через препятствия. В принципе эксплуатация транспортных средств на ножных опорах может почти не зависеть от характера пересеченной местности. Цель наших исследований заключалась в постановке расчетных задач на ЭВМ для управления процессом движения ног и их координации. Понятно, что составление крайне сложных машинных программ для этих целей — один из важных этапов в работе по созданию ползающих, ходящих или бегающих машин с устойчивым передвижением.

КАК УЖЕ отмечалось, передвижение в одних случаях возможно только при наличии динамического равновесия, в других оно не требуется. Так, насекомым не нужно сохранять равновесие, поскольку у них как минимум шесть ног, три из которых всегда могут быть задействованы для опоры в виде треножника. При просмотре ускоренной киносъемки движения насекомых видно, что они, передвигаясь ползком, как правило, одновременно опираются на три ноги, чередуя их.

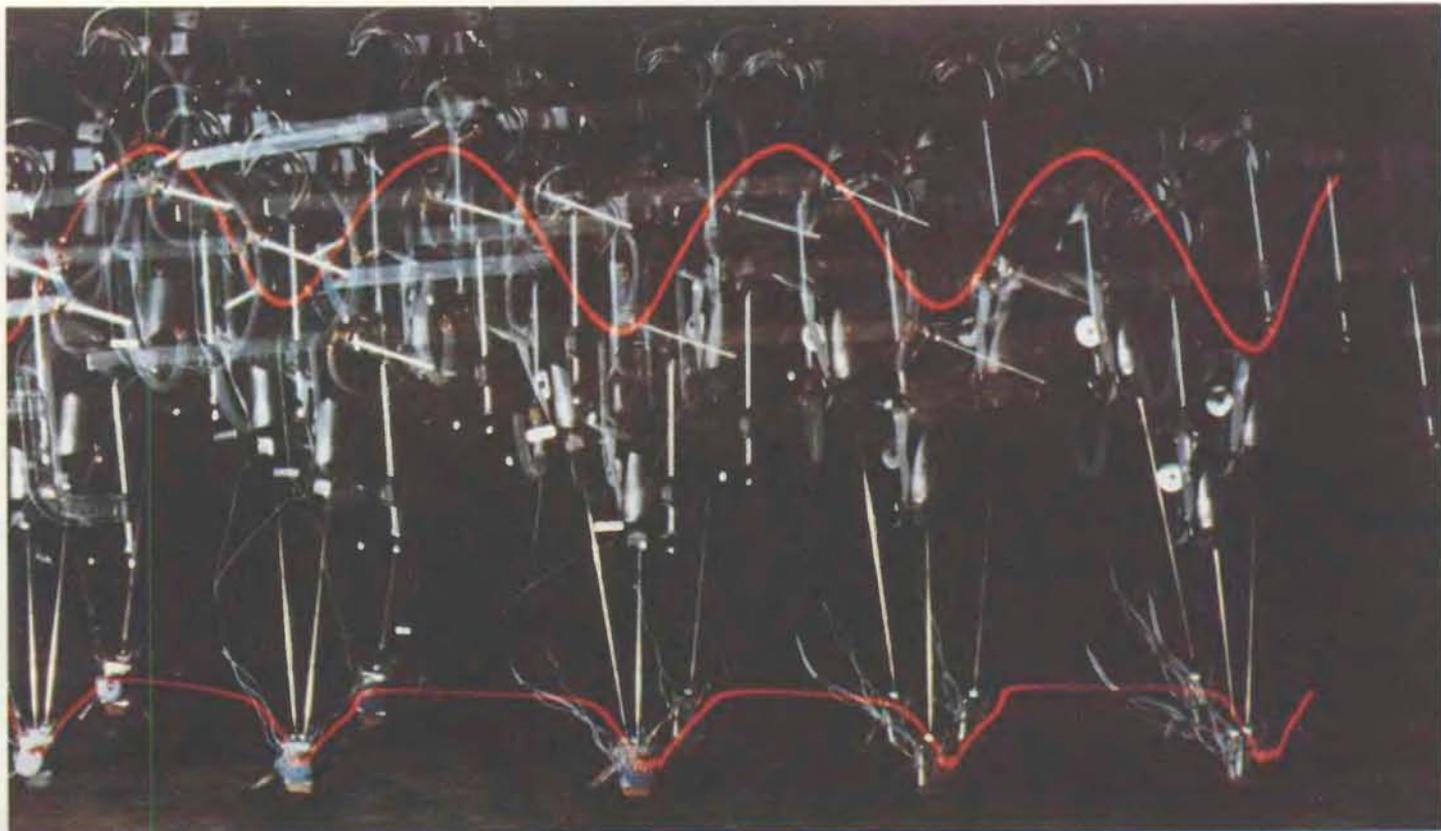
В принципе можно построить ползающую машину, не нуждающуюся в сохранении динамического равновесия, и на четырех ногах, но двигаться такая машина будет неуклюже, потому что

при каждом шаге ей придется корректировать положение центра тяжести, чтобы не перевернуться. Для удовлетворительной работы машины без динамического уравнивания она должна иметь как минимум шесть ног — наименьшее число ног, при котором всегда обеспечивается опорный треножник, даже если половина из них находится в поднятом положении. Сейчас уже построено несколько шестиногих машин, отличающихся габаритами и конструкцией. Все они управляются ЭВМ.

Управляющая программа выполняет пять задач. Во-первых, она регулирует походку машины, т.е. задает последовательность и характер движения ног, при которых обеспечивается перемещение машины. Шестиногие машины могут передвигаться посредством поочередного поднимания одной ноги, либо двух, либо трех ног одновременно.

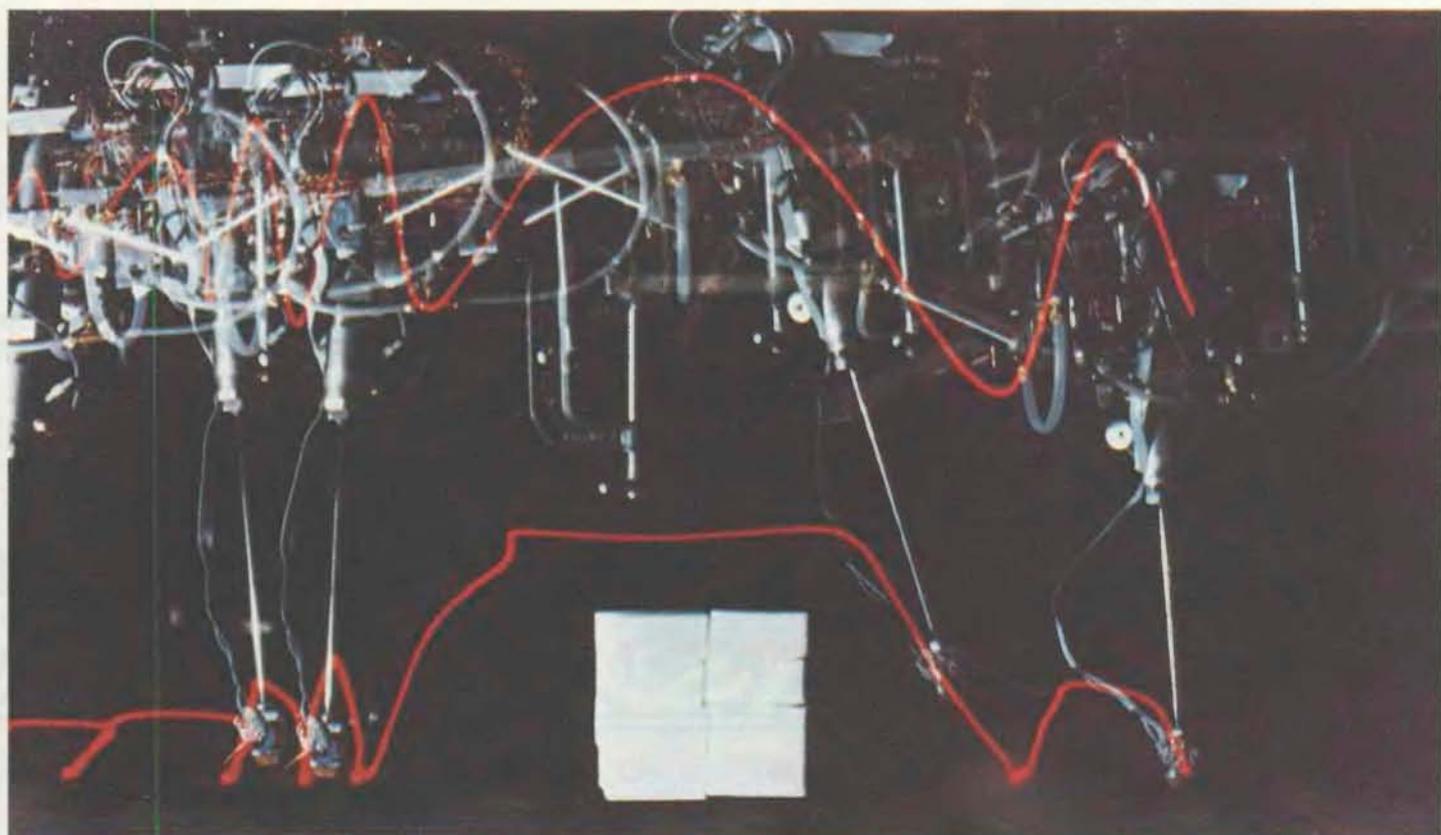
Наиболее простой является регулярная повторяющаяся последовательность движения ног. Указанием такой последовательности описывается походка машины. Например, походку с одновременной опорой на три ноги можно записать как 1-5-3; 6-4-2, где через дефис указаны номера ног, одновременно находящихся в одном положении, а точкой с запятой отделена последовательность. Аналогично можно описать походку с поочередным подниманием по одной ноге: 3-2-1-4-5-6 и 3-4-2-5-1-6. Походка, при которой поднимаются несколько ног одновременно, безусловно, позволяет ускорить движение машины, но при этом будет меньшая устойчивость по сравнению с походкой, при которой машина одновременно опирается на большее число ног.

Вторая задача управляющей машинной программы заключается в том, чтобы не допускать опрокидывания машины. Она опрокинется в том случае, если проекция ее центра тяжести сместится за пределы создаваемой ногами опорной базы. ЭВМ должна по-



ПРЫГАЮЩАЯ МАШИНА, построенная Рейбертом, одним из авторов статьи, для изучения проблем управления машинами в процессе движения. Нога машины приводится в действие сжатым воздухом, а ее движением управляет компью-

тер с обратной связью. В компьютер поступают сигналы от датчиков положения, установленных на машине. В данной конструкции имеется ограничительный рычаг, который удерживает машину в равновесии в одной плоскости.



ПРЫЖКОВОЕ ДВИЖЕНИЕ прыгающей машины, совершаемое ею, когда она перескакивает через препятствие. Перед препятствием машина производит корректировку шага, чтобы правильно установить стопу для прыжка. За один шаг до препятствия в исполнительном механизме создается мак-

симальное напряжение, чтобы увеличить высоту последующего прыжка. В полете нога укорачивается, чтобы не задеть препятствие. Сервомеханизм машины направляет ногу под требуемым углом для приземления, и перед приземлением нога удлиняется. Высота препятствия 15 см.

стоянно контролировать положение центра тяжести машины с учетом размещения точек опоры и обеспечивать по возможности наибольшую опорную базу. При простых походках необходимую опорную базу можно обеспечить с помощью выбора геометрии ног, а при более сложных потребуются тщательный расчет на статическую устойчивость.

Поскольку опору машине обеспечи-

вают сразу несколько ног, управляющая ЭВМ должна решать и третью задачу — распределять между ногами опорное усилие и поперечные (боковые) нагрузки. При походке с опорой на треножник распределение опорного усилия, очевидно, задается геометрией трех ног, обеспечивающих опору. Если для опоры используется большее число ног, то управляющая ЭВМ должна решить задачу более высокого по-

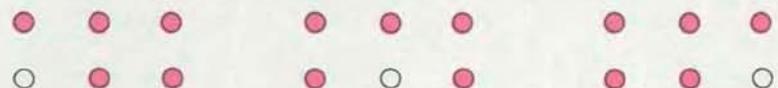
рядка и рассчитать оптимальное распределение нагрузки, обеспечив плавность движения и минимальное давление на грунт.

Задачу распределения боковой нагрузки на стопы ног управляющая программа решает даже в том случае, когда машина опирается всего на три ноги. Решение этой задачи можно свести к исключению маневрирования стоп при выборе точек опоры на грунте.

ОПОРА НА ТРЕНОЖНИК



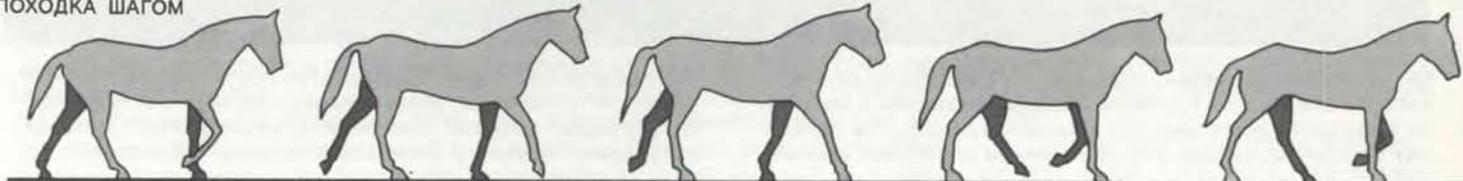
ПООЧЕРЕДНАЯ СМЕНА СВОБОДНОЙ НОГИ



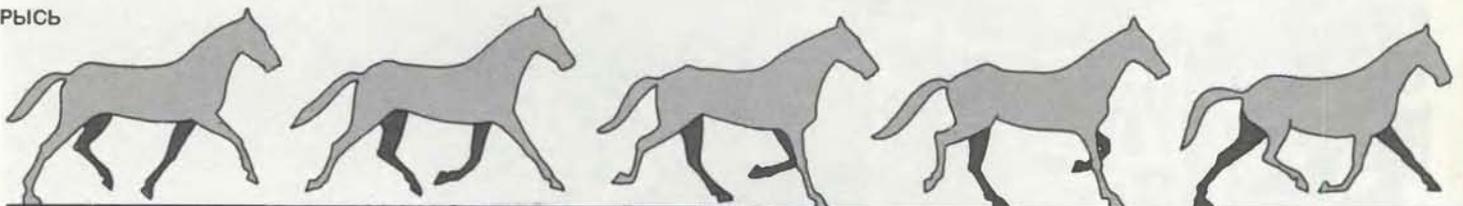
СПОСОБЫ ПЕРЕДВИЖЕНИЯ НАСЕКОМЫХ легли в основу разработки методики движения ползающей на шести ногах машины, изображенной на обложке журнала. Под каждым

рисунком кружками показано, где находится нога — на земле или в воздухе. Закрашенный кружок означает, что нога находится на земле, а незакрашенный — в воздухе. Опора

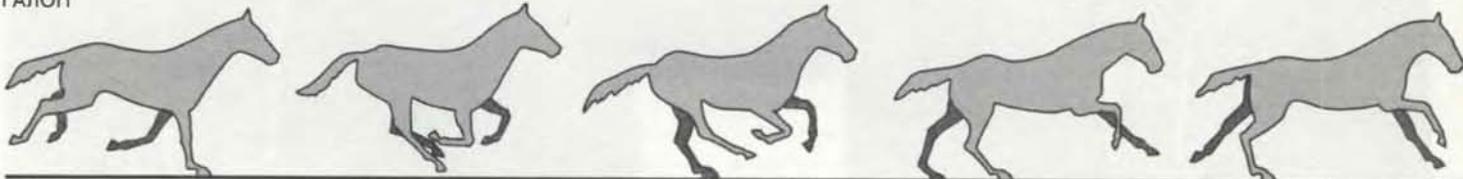
ПОХОДКА ШАГОМ



РЫСЬ



ГАЛОП



АЛЛЮР ЛОШАДИ представляет собой такое движение, при котором существенную роль играет равновесие. При движении шагом не менее двух ног лошади всегда касаются земли,

а при движении рысью или галопом животное периодически отрывается от земли. Эти рисунки сделаны с фотографий, полученных Э. Мэйбриджем 100 лет назад методом

Расчет распределения боковых усилий в случае большого количества ног, участвующих в опоре, сопряжен с выполнением огромного объема вычислений. Чтобы избавиться от этого отягчающего обстоятельства, мы в своей разработке ползающей машины предусмотрели пассивную гидравлическую систему, автоматически распределяющую боковые нагрузки.

Контроль за соблюдением допусти-

мых пределов размещения ног с целью сохранения заданного направления движения машины — четвертая задача, решаемая управляющей ЭВМ. Геометрия ног может быть такой, что при движении они будут наталкиваться друг на друга. Во избежание поломок ЭВМ должна ограничить их возможное перемещение. Для повышения эффективности действия каждой ноги ее установка на поверхности земли до-

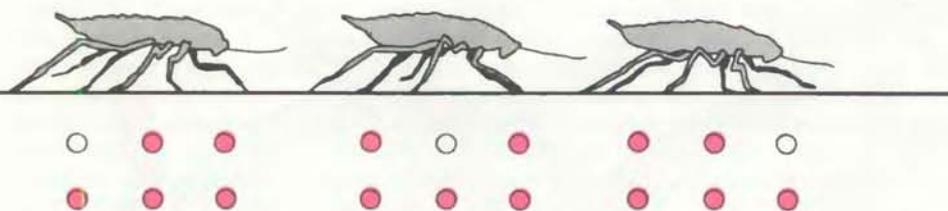
лжна рассчитываться с учетом заданных ограничений возможного ее положения, а также ожидаемого поведения машины, когда она займет положение стойки. Например, при выполнении правого поворота передние ноги машины должны выноситься далеко вправо, с тем чтобы она смогла совершить боковое перемещение. В машинах с автономным управлением положение ног может задаваться на основе расчета положения машины с упреждением. При управлении человеком правильный выбор местоположения каждой ноги связан с прогнозированием команд водителя на каждое следующее положение стойки.

Пятая задача управления машиной заключается в выборе точек опоры, чтобы обеспечить машине устойчивость. Для ровной поверхности эту задачу решить легко, но в условиях пересеченной местности она может оказаться чрезвычайно трудной. Пока еще нет систем, которые могут выполнять такую задачу. Можно представить себе сканирующую систему, которая обследовала бы поверхность земли впереди следования машины и выбирала бы подходящие точки опоры. Для использования такого устройства управляющая ЭВМ должна строить математическую модель местности, в которой были бы учтены неровности, равные или превосходящие размер стопы машины. В оценке потенциальных опорных точек полезными могут оказаться и данные, вносимые в модель человеком, управляющим машиной.

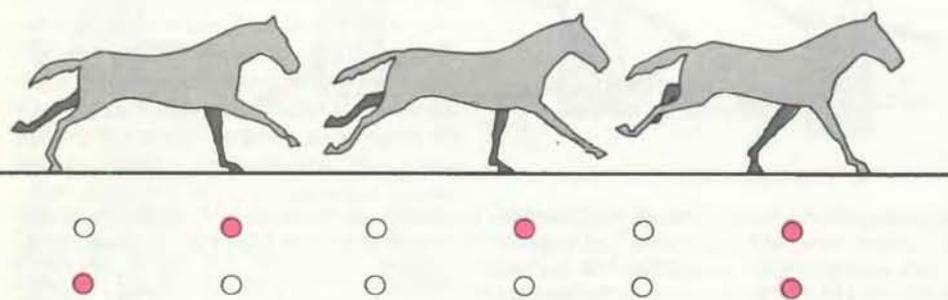
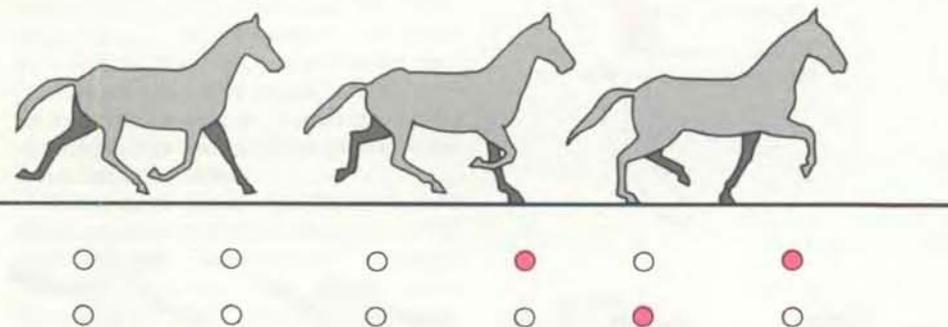
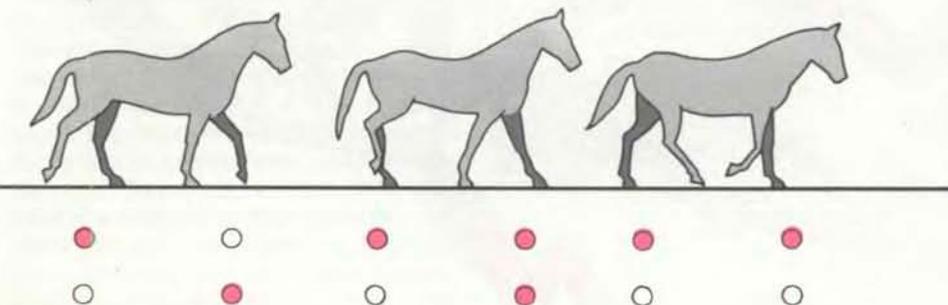
В НАСТОЯЩЕЕ время Сазерленд, один из авторов этой статьи, занимается созданием ползающей машины на шести ногах с гидравлическим приводом. Она работает на бензиновом двигателе, а ее ноги приводятся в действие с помощью гидравлики. Поскольку у машины шесть ног, она не нуждается в динамической балансировке.

Встроенный микропроцессор управляет движением ног машины, открывая или закрывая клапаны, регулирующие подачу масла в гидроприводы. Размещенные в каждой ноге датчики передают в микропроцессор информацию о положении ног и действующих силах. Машина достаточно просторна, и в ней размещается человек, который задает скорость и направление движения, а также устанавливает наклон корпуса машины и ее клиренс (или дорожный просвет — расстояние от опорной плоскости до наиболее низко расположенного элемента машины). Расчетная скорость машины — около 4 км/ч.

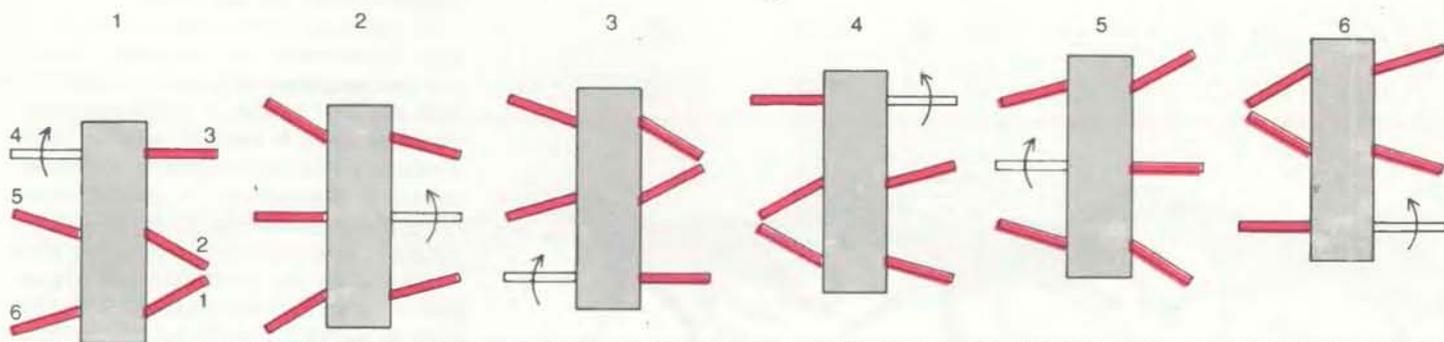
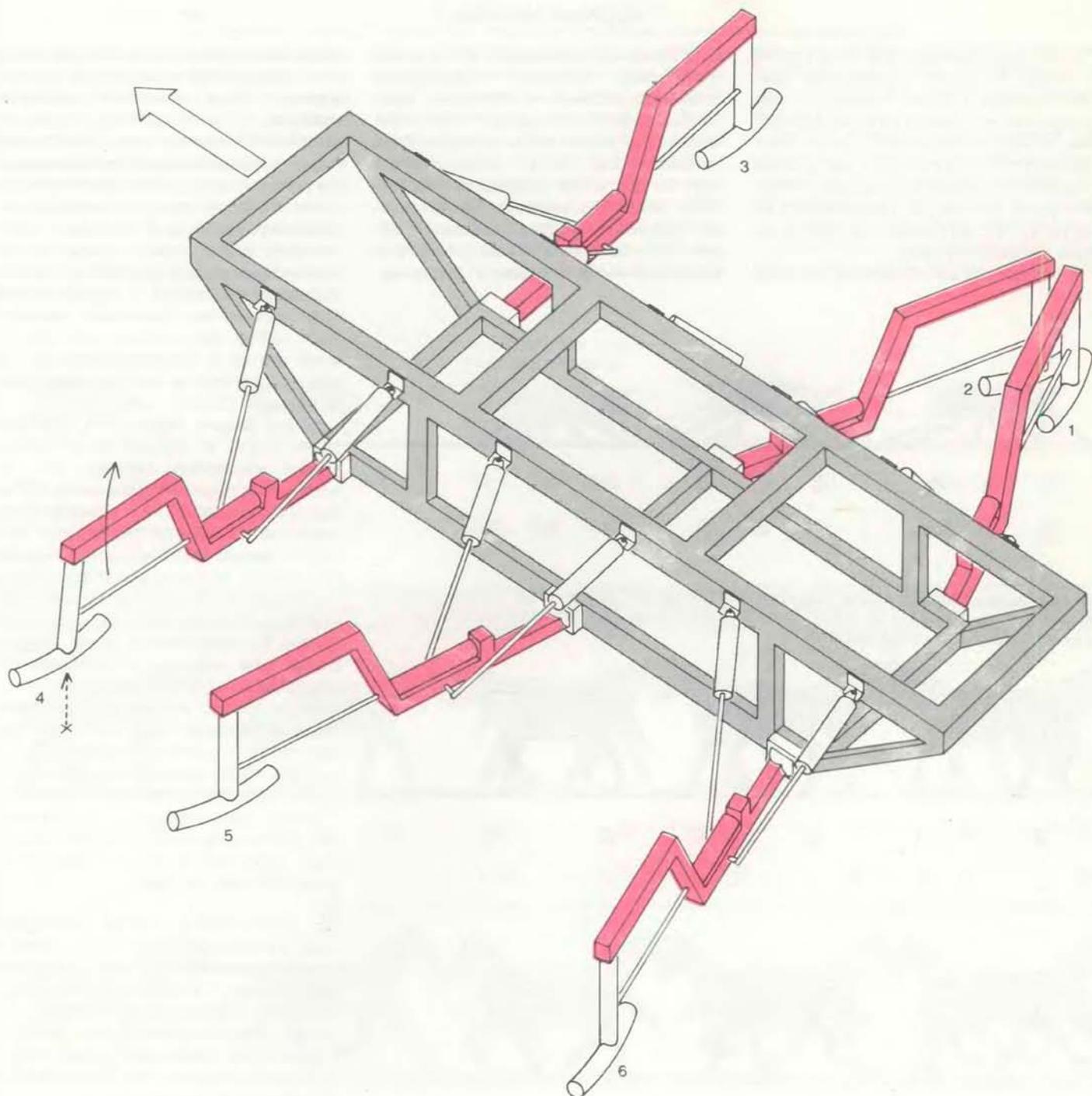
При проектировании этой машины разработчики стремились свести к минимуму объем расчетов, необходимых для технической реализации ползающего движения. Гидравлическая система будет задавать движение ногам без



на поочередно меняющиеся три ноги обеспечивает устойчивое передвижение. Насекомое перемещается за счет того, что его соседние ножки поочередно совершают колебательные движения.



прерывистой съемки. Они положили конец давнему спору о том, отрывается ли от земли лошадь, идущая рысью. Многие другие животные также отрываются от земли во время бега.



ШЕСТИНОГАЯ МАШИНА, построенная Сазерлендом, одним из авторов статьи, передвигается ползком. Она не нуждается в сохранении равновесия. Ее шесть ног управляются встроенным микрокомпьютером. Она работает на бензиновом двигателе мощностью 18 л.с., который приводит в действие отдельные гидравлические насосы для левых и правых ног. Рулевое управление машиной осуществляет человек. Информация о командах водителя, о положении каждой ноги и действующих на них силах с помощью датчиков передается в микрокомпьютер. Шесть ног обеспечивают ма-

шине устойчивость, поскольку по меньшей мере три из них всегда находятся на земле. Наличие пассивной гидравлики упрощает вычислительные операции. На серии рисунков внизу показано положение ног на разных стадиях движения. Последовательную смену положения ног условно можно обозначить так: 4-2-6-3-5-1. Цветными прямоугольниками обозначены ноги, касающиеся земли, а бесцветными — поднятые над землей и совершающие перенос в направлении, указанном стрелкой.

участия микропроцессора, в задачу которого входит выбор одного из возможных направлений перемещения каждой ноги. Таким образом, микропроцессор не загружается и может произвести расчет выбора ног и места для опоры; ему не надо тратить время на детальные расчеты движения ног.

Каждая нога машины может перемещаться вперед и назад, вверх и вниз благодаря универсальным механическим суставам, с помощью которых они крепятся к раме машины. Эти движения выполняются за счет удлинения или укорачивания двух гидравлических приводов, размещенных над каждой ногой в виде буквы V. Приводы управляются системой взаимосвязанных клапанов, устроенной так, что объем масла, перекачиваемого из одного привода в другой, остается постоянным и поэтому если один привод укорачивается, то другой удлиняется на ту же величину. Особая геометрия шарниров при такой схеме соединения обеспечивает маневрирование ног в горизонтальной плоскости.

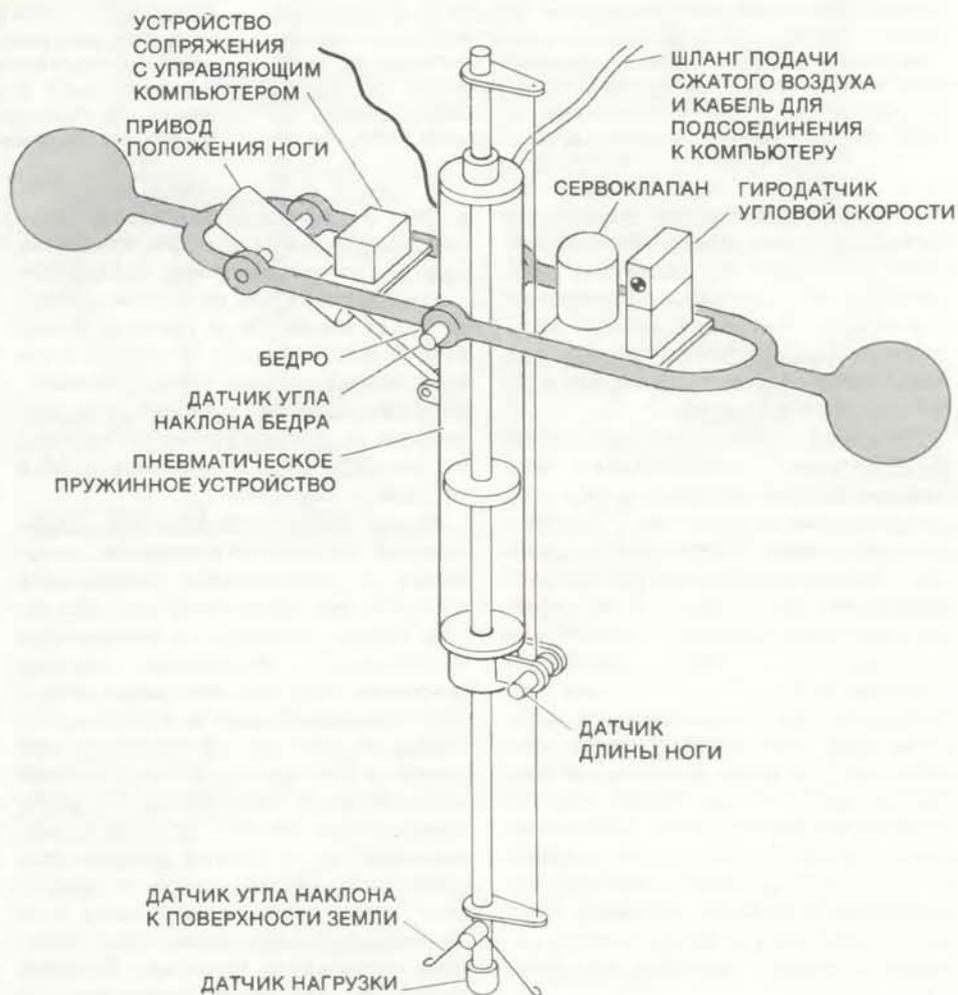
В зависимости от положения клапанов механизм, обеспечивающий горизонтальное маневрирование ног машины, может работать или отключаться, и тогда часть из них будет осуществлять перемещение машины, а другая часть в это время будет плавно опускаться. Как только ноги коснутся грунта и примут на себя нагрузку, они приобретают способность переступать, опускаясь или поднимаясь в зависимости от фазы движения тех ног, которые ранее находились на поверхности грунта и перемещали машину. Следовательно, управляющей вычислительной системе не нужно точно рассчитывать момент касания ногой грунта или требуемых в момент контакта движений для обеспечения плавного перемещения машины.

Коленчатое сочленение каждой ноги приводится в действие отдельным гидравлическим механизмом, установленным горизонтально вдоль ноги. Этот приводной механизм можно включить, когда нога поднята для установки стопы в боковую позицию перед следующим шагом. Когда стопа опустится на грунт, коленчатое сочленение должно слегка сдвинуться, чтобы перемещение сочленения по дуге согласовать с прямолинейным движением стопы. Это сложное движение, но оно не требует привлечения ЭВМ; простое параллельное соединение приводов коленчатых сочленений позволяет всем коленным механизмам работать в такт со средним движением машины. Имеющийся в машине дополнительный гидравлический насос может задать боковое движение всем коленчатым сочленениям одновременно, и тогда машина будет совершать боковое перемещение подобно крабу.

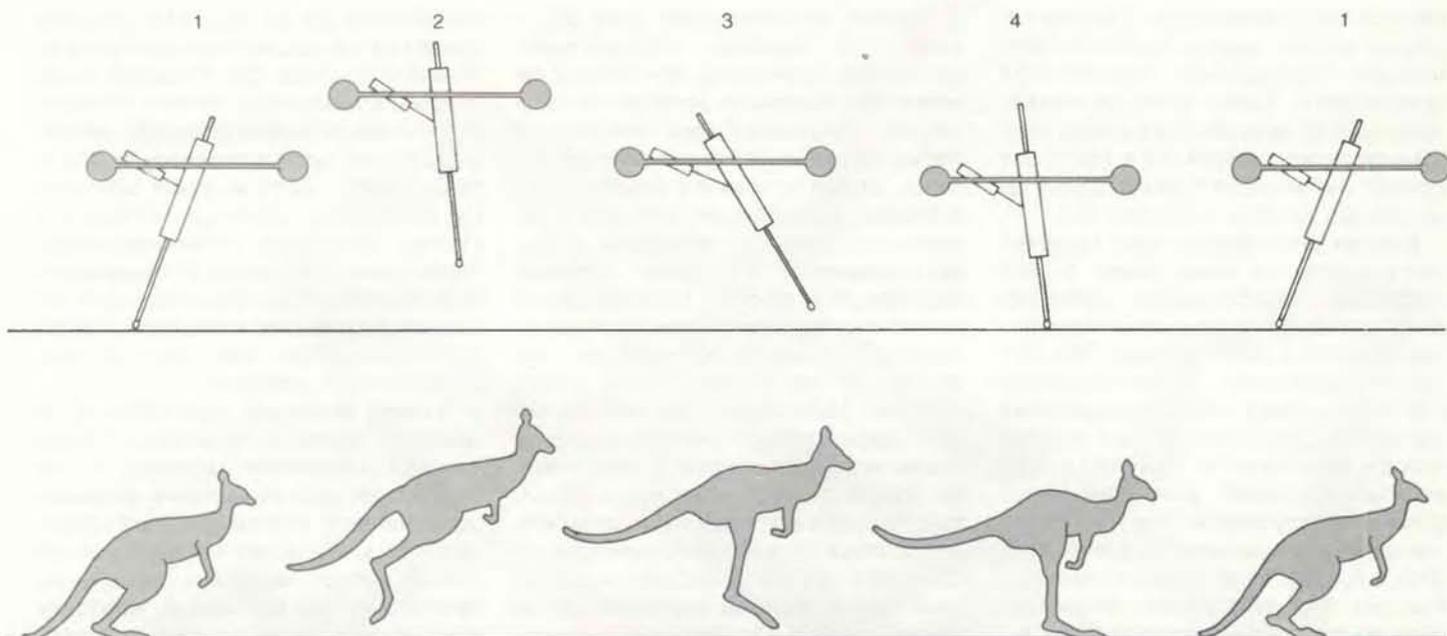
Человек, выполняющий роль водителя этой машины, осуществляет управление трех видов. Во-первых, он может регулировать уровень масла в системе, поскольку ему приходится управлять работой гидравлических насосов. Для ног с правой и левой сторон в машине установлены отдельные насосы, что позволяет водителю заставить машину ползти одной стороной быстрее, чем другой. Информация о положении органов рулевого управления передается в микропроцессор, чтобы он мог правильно ставить стопы машины. Например, если машина делает правый поворот, ее передние ноги нужно перевести вправо, а задние влево, чтобы поворот стал возможным. Если машина идет задним ходом, что достигается путем реверсирования направления потока масла, ноги ее с каждым шагом должны переноситься не вперед, а назад. По мере того как каждая стопа поднимается, управляющая система выбирает для нее целевое по-

ложение исходя из скорости и направления потока масла, заданного водителем. Когда стопа при движении приближается к конечной точке в опорном положении, компьютер выдает команду для ее подъема и переноса на новую точку опоры. Если же какая-либо стопа, будучи в опорном положении, достигает предельной точки своей траектории, микропроцессор останавливает машину до тех пор, пока стопа не будет поднята над землей и перенесена на новую точку опоры, где у нее есть пространство для движения.

Второй функцией, выполняемой человеком, является управление положением и кренением машины. С помощью органов управления, изменяющих опорное положение в вертикальной плоскости левых и правых ног, водитель может заставить машину наклониться влево или вправо. Аналогичным образом он может задать различные опорные положения в вертикальной плоскости передних и задних ног,



ПРЫГАЮЩАЯ МАШИНА, используемая для изучения проблем управления движением с балансировкой в двух плоскостях. Машина действует, как правило, в наклонном положении параллельно наклонной стенке, отделенной от нее воздушной подушкой: машина может заваливаться только в плоскости этой стенки. Управляющий компьютер принимает сигналы от датчиков угла наклона и давления и от переключателя на стопе машины. В процессе управления компьютер регулирует давление в пневматической камере, которая действует как пружина. Кроме того, он сообщает машине вращающий момент между ногой и корпусом для регулирования наклона бедра. Угол этого наклона определяет смещение стопы в горизонтальной плоскости и таким образом регулирует равновесие.



ПРЫГАЮЩАЯ МАШИНА В ДЕЙСТВИИ, как и все животные, передвигающиеся на конечностях, движется циклично. Нога попеременно служит опорой или находится в состоянии полета. На левом рисунке машина приготовилась к прыжку. Находясь в воздухе, машина переносит ногу вперед, готовясь к приземлению. В момент касания земли пружинное устройство ноги укорачивает ее до минимума, готовя к новому прыжку. Датчик контакта ноги с землей работает по

принципу триггерного устройства, приводящего в действие механизм управления вертикальным положением машины. Синхронно с этим механизмом работают механизмы контроля пространственного положения и балансировки машины, имеющие обратную связь. Как и упругий стержень (перш), машина может сохранять равновесие только в процессе прыгания. Прыжки машины сходны с движением кенгуру, которое Мэйбридж назвал рикошетом.

чтобы заставить машину наклониться вперед или назад. Другой орган управления позволяет ему сообщить компьютеру, что, находясь в опорном положении, все шесть ног должны обеспечивать машине более высокую или более низкую посадку над землей, чтобы изменить ее клиренс.

Третий вид управления, осуществляемый человеком, заключается в тщательном выборе местоположения стоп на грунте при эксплуатации машины в условиях сильно пересеченной местности. Пока еще не ясно, как реализовать управление такого вида. В построенном несколько лет назад Р. Мошером в компании General Electric шагающем грузовике выбор точек опоры для стоп деликом осуществлялся вручную, и поэтому управлять им было крайне утомительно. Не менее важным, на наш взгляд, является также выбор походки машины, но пока у нас нет достаточно опыта, чтобы судить о том, можно ли это делать автоматически или понадобится привлекать человека. Чтобы ответить на эти вопросы, мы и построили машину, о которой шла речь.

ДРУГАЯ ЦЕЛЬ наших исследований сводилась к изучению ходьбы и бега, сопряженных с постоянным сохранением равновесия. Вплоть до конца прошлого столетия люди продолжали спорить о том, отрывает ли идущая рысью лошадь одновременно все ноги от земли или нет. Спор этот разрешился только тогда, когда с помощью пре-

рывистой съемки Э. Мэйбриджу удалось получить фотографии, показывающие, что при движении рысью лошадь действительно полностью отрывается от земли. То же самое во время бега делает и человек, и собака, и гепард, и тем более кенгуру. Они не только ходят, сохраняя динамическое равновесие, но и бегают, совершая элементы баллистического движения, чтобы увеличить скорость.

Между ползающей машиной, сохраняющей статическое равновесие, и машиной с динамическим равновесием имеются два принципиальных различия. Первое вытекает из определения устойчивости. Ползающая машина устойчива, если она постоянно опирается по меньшей мере на три ноги, которые не дают ей опрокинуться; при ходьбе и беге машин с динамической балансировкой допускается их кратковременный наклон. В этом случае движения ног и корпуса машины должны быть такими, чтобы ее наклон был очень непродолжительным и в среднем постоянно сохранялась требуемая опорная база. Например, бегущий человек касается земли попеременно то одной ногой, то другой, обеспечивая своему телу опорную базу только на короткие промежутки времени.

Второе различие между статическим и динамическим равновесием вытекает из анализа скорости и инерции. Считается, что при статическом равновесии устойчивость можно обеспечить с помощью определенной конфигурации

ног во время опоры и положением центра тяжести; движение машины в этом случае не учитывается. Однако при таком подходе расчеты статического равновесия не всегда обеспечивают требуемую устойчивость. Например, идущая на большой скорости машина может завалиться вперед по ходу движения при внезапной ее остановке, когда ее центр тяжести сместился слишком близко к передним ногам. Поэтому, чтобы понять, как повысить мобильность ходящих и бегающих систем, нужно, с одной стороны, придать определению устойчивости более гибкий характер, а с другой — при расчете равновесия учитывать скорость движения.

С целью изучения проблемы равновесия в ее простейшей форме Рейберт (один из авторов статьи) и его коллеги из Университета Карнеги — Меллона построили и продемонстрировали в работе машину, которая прыгает на одной ноге и передвигается скачками подобно кенгуру. Она действует по принципу шеста с пружиной (используемого в играх) и управляется компьютером. Нас обнадеживает удивительная простота алгоритма балансировки. Конструкция машины позволяет ей передвигаться только в одной плоскости, и поэтому она может опрокинуться только в одном направлении.

Основные части машины — корпус и нога. Корпус — это главный узел, в нем установлены клапаны, датчики и электронные устройства. Нога имеет

простую конструкцию и может не только изменять свою длину вдоль собственной оси, но и поворачиваться относительно корпуса с помощью рычага с шарниром, который называется бедром. Нога прыгает на пружине с регулируемым натяжением, почти как нога человека с ее упругими мышцами и сухожилиями. Пружинное устройство представляет собой пневматический цилиндр, давление воздуха в котором контролируется датчиками и регулируется клапанами. В нижней части ноги находится небольшая стопа.

Вращательное движение ноге сообщается вторым пневматическим приводом, который создает вращающий момент в шарнире бедра. Пружинным устройством ноги управляет простой двухпозиционный клапан, а угол вращения задается дозиметрическим сервоклапаном, который представляет собой устройство с обратной связью и реагирует пропорционально величине получаемого им сигнала. Поскольку момент инерции ноги почти в 10 раз меньше момента инерции корпуса, то нога может поворачиваться во время полета, не влияя существенно на движение корпуса. Наклон корпуса замеряется гироскопом, что позволяет управляющему компьютеру удерживать корпус в горизонтальном положении. С помощью других датчиков замеряются угол наклона бедра, длина ноги, давление воздуха в пружинном устройстве, угол наклона ноги относительно поверхности земли и давление ноги на грунт.

Движением машины управляют три контура сервоуправления. Один контур управляет движением в вертикальной плоскости, другой контролирует равновесие, а третий — положение корпуса машины. Каждый контур синхронизирован с основными прыжковыми движениями.

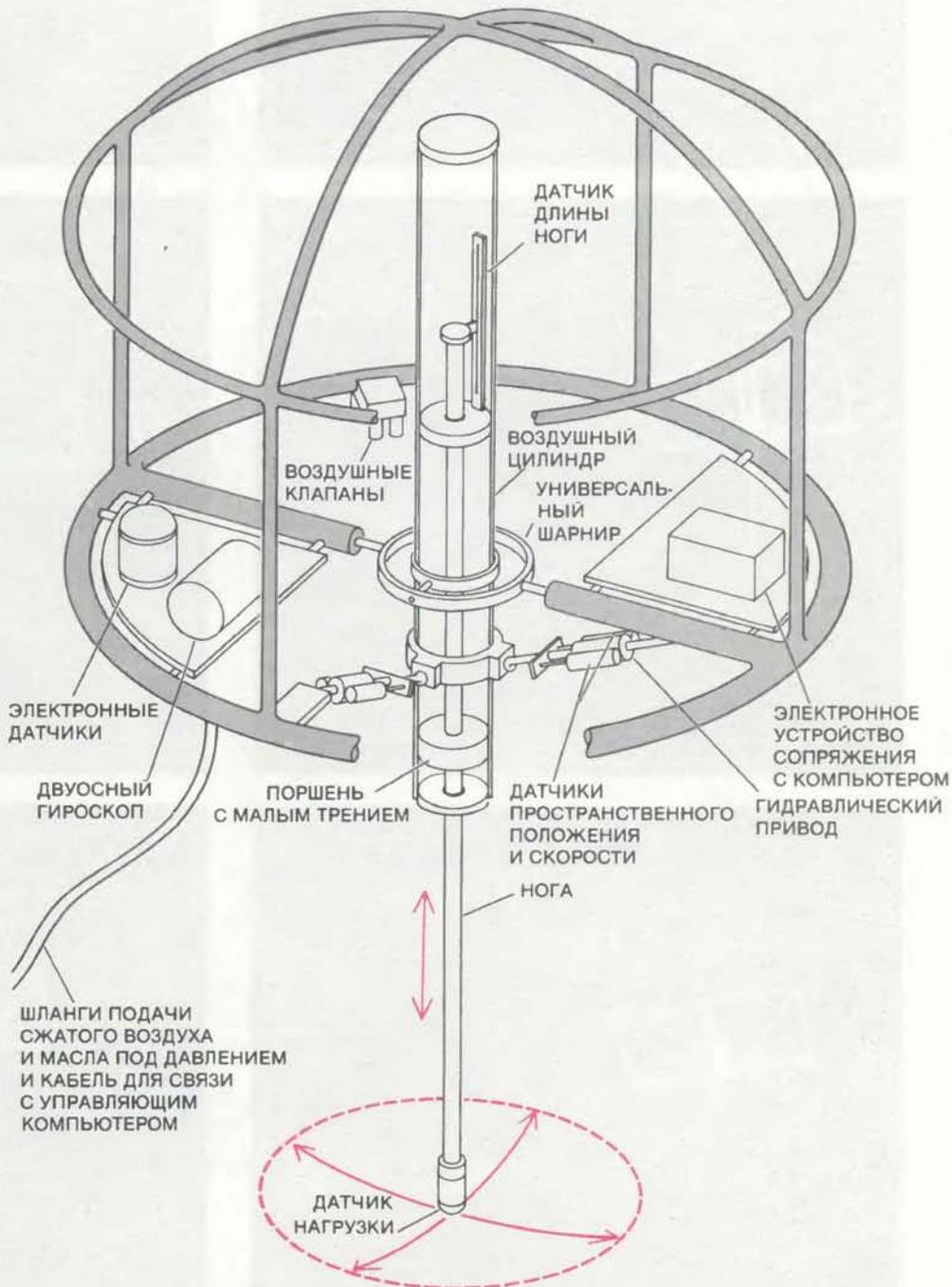
Первый контур контролирует высоту прыжков. Он увеличивает или уменьшает энергию движения машины, чтобы обеспечить нужную высоту прыжка, а также чтобы восстановить энергию, израсходованную в процессе каждого прыжка. Обе эти задачи контур, контролирующей высоту прыжков, выполняет путем периодической подачи воздуха в главный приводной цилиндр или выпуска воздуха из него в целях регулирования эффективного натяжения пневматической пружины. Другими словами, управление высотой прыжка осуществляется регулированием энергии в приводном механизме по времени и объему, и таким образом обеспечивается желательная высота прыжка. Когда она достигнута, требуемая для следующего прыжка энергия почти в полном объеме извлекается из пружинного устройства, где она хранилась во время предыдущего приземления. Задача управления энергией, рас-

ходусмой машиной на прыжки, не сопряжена с особыми трудностями, пока прыжковые движения выполняются с относительной стабильностью.

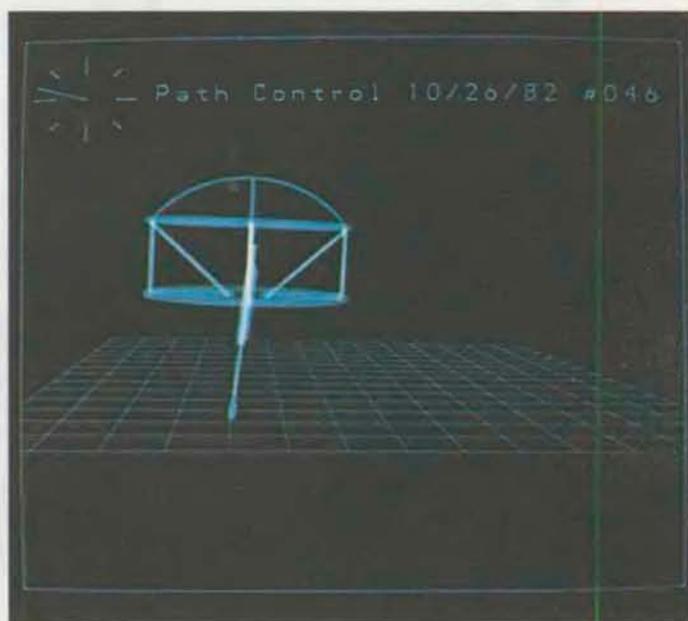
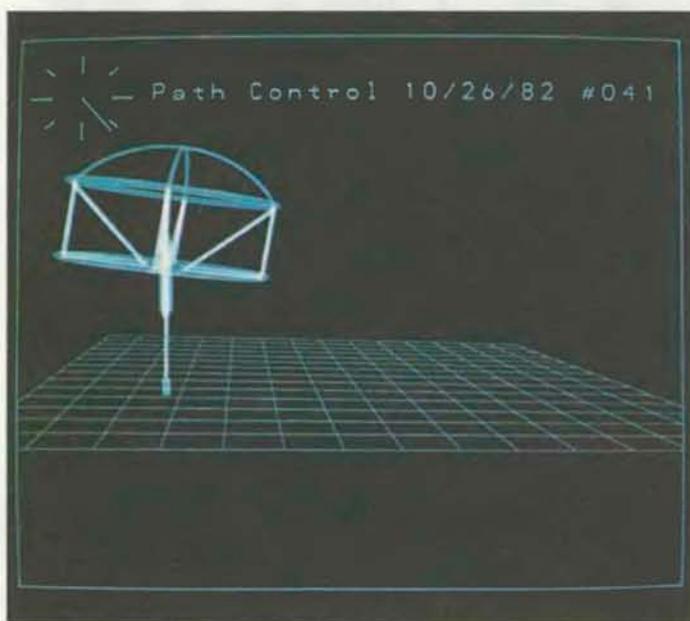
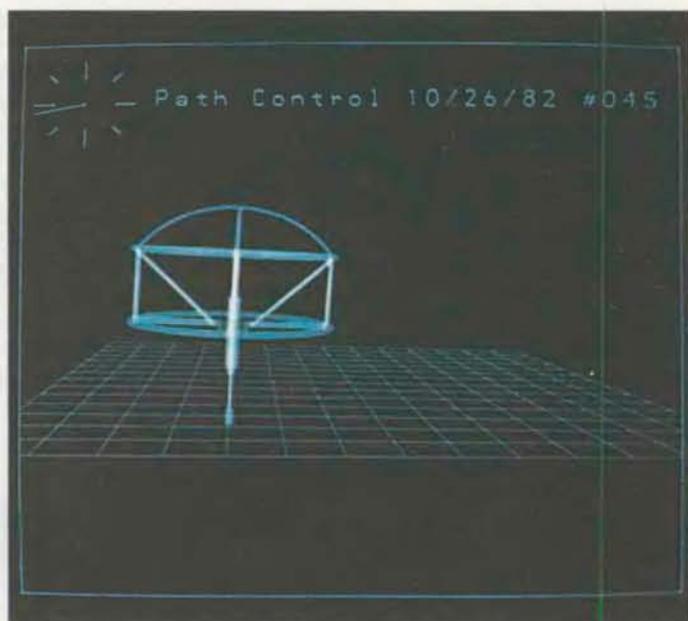
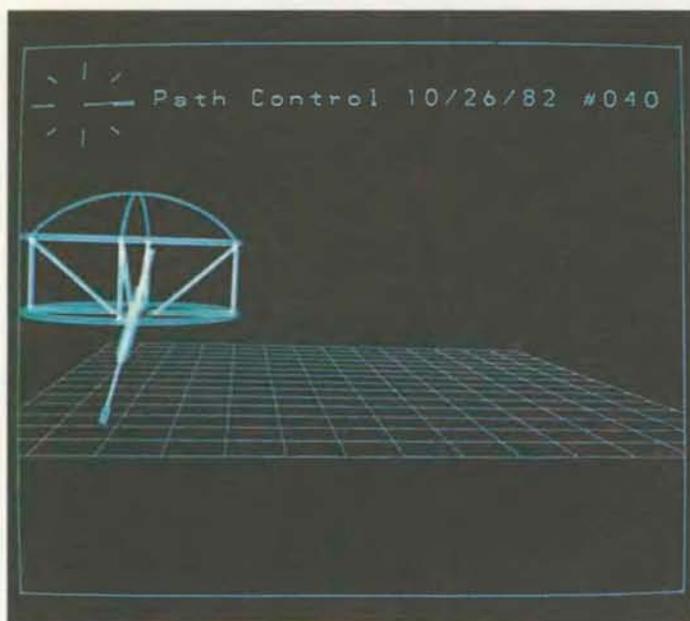
Второй контур сервоуправления обеспечивает машине равновесие путем ориентации стопы во время полета машины в такое положение, при котором ее приземление будет сбалансированным. При расчете правильного положения стопы учитываются как скорость перемещения машины, так и

угол наклона ее корпуса. В компьютере используется один и тот же алгоритм для расчета равновесия машины, когда она выполняет прыжки на месте, выбирает скорость при переходе на бег, бежит с постоянной скоростью, перепрыгивает через препятствие и замедляет движение при переходе к прыжкам на месте.

Во время прыжков на месте нога и стопа машины несколько сдвигаются с места, чтобы компенсировать внешние



УСОВЕРШЕНСТВОВАННАЯ МОДЕЛЬ ПРЫГАЮЩЕЙ МАШИНЫ, находящаяся в стадии разработки. Она может перемещаться в трех плоскостях. Ее высота около 1 м, вес 20 кг. Машина соединена с расположенным рядом компьютером. Машина приводится в действие сжатым воздухом, который также используется для регулировки высоты прыжков. Положением стопы управляют гидравлические приводы. Во время полета они ставят стопу в положение, обеспечивающее равновесие машины. Когда стопа находится на земле, они удерживают машину в вертикальной стойке.



СМОДЕЛИРОВАННОЕ ДВИЖЕНИЕ прыгающей машины, совершающей перемещение в трех плоскостях. Фотографии получены с дисплея ЭВМ, на которой строилась модель

движения. Здесь показана самобалансировка машины при приземлении и повторном взлете.

возмущения и погрешности предыдущих прыжков. Когда машина переходит к бегу, скажем в правую сторону, стопа ее вначале смещается влево, чтобы разбалансировать машину и наклонить ее в желательном направлении. Устойчивый бег очень схож с прыжками на месте с той лишь разницей, что регулировка равновесия дополняется широкими движениями ноги, характер которых определяется скоростью перемещения машины. Остановка машины во многом похожа на начало движения, если не считать, что машину при этом заставляют наклониться в сторону, противоположную направлению движения.

ТРЕТИЙ контур сервоуправления обеспечивает стабилизацию корпуса машины и удерживает ее в вертикальном положении. Когда машина касается земли, он сообщает ей вращающий момент между ногой и корпусом, чтобы обеспечить желательное положение машины на следующем этапе полета. Эффективность работы этого сервомеханизма зависит от реакции грунта при опоре стопы. Сервомеханизм, управляющий положением машины, когда ее стопа находится на земле, соединен с приводным механизмом бедра, который включается сервомеханизмом балансировки машины во время ее полета. Некоторые особенности перехода с одного режима управления на другой связаны с фиксированием моментов начала и конца каждого полета. В эти моменты механизм, ответственный за создание вращающего момента, должен бездействовать, чтобы стопа не скользила по поверхности земли.

Во время бега ноги животного совершают ритмичные качательные движения под большим углом, с тем чтобы сохранять равновесие и совершать движение вперед. Как мы установили, для машины не нужно составлять особую программу таких качательных движений ноги, ибо они являются естественным результатом взаимодействия механизмов управления балансировкой и пространственным положением машины. Допустим, машина движется с постоянной горизонтальной составляющей скорости и во время приземления ее корпус находится в вертикальном положении. Что должен сделать механизм управления пространственным положением, когда машина находится в стойке, для удержания ее в вертикальном положении? Он должен не допускать возникновения вращающих моментов в бедре машины. Поскольку во время стойки стопа зафиксирована на поверхности земли, нога машины должна отклониться под некоторым углом назад, чтобы исключить воздействие вращающего момента на бедро при движении корпуса вперед.

А что должен делать механизм

управления балансировкой во время полета для сохранения равновесия машины? Поскольку стопа должна находиться впереди центра тяжести примерно столько же времени, сколько она находится позади него, скорость движения и длительность стойки обуславливают необходимость выноса стопы вперед во время приземления; при этом стопа займет удобное положение для следующей стойки. Таким образом, во время каждого этапа полета нога под

управляющим воздействием сервомеханизма балансировки должна совершать качательные движения вперед, а во время каждого этапа стойки сервомеханизм управления пространственным положением должен заставить ее отклониться назад; необходимые для бега качательные движения получаются автоматически в силу взаимной связи контуров сервоуправления балансировкой и положением машины.

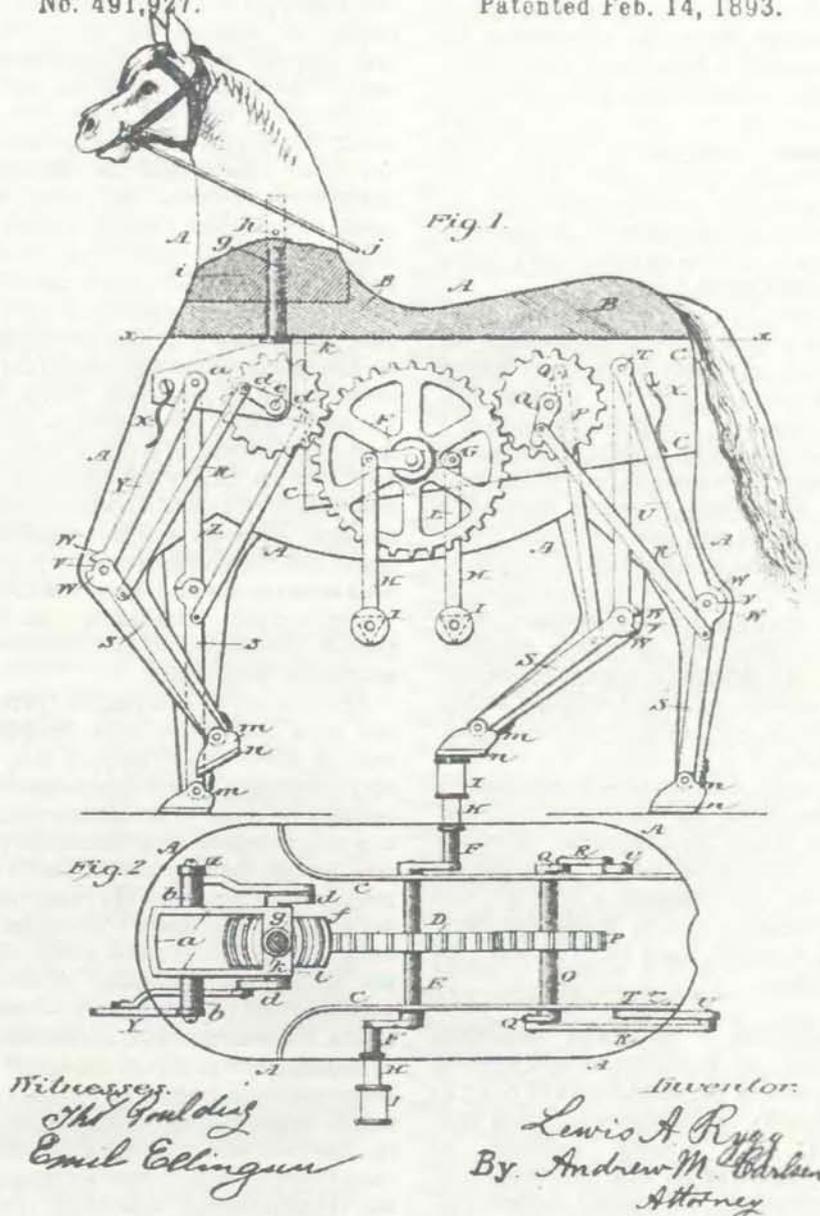
Сейчас мы занимаемся созданием

(no Model.)

L. A. RYGG.
MECHANICAL HORSE.

No. 491,927.

Patented Feb. 14, 1893.



МЕХАНИЧЕСКАЯ ЛОШАДЬ, патент на изобретение которой в 1893 г. получил Льюис А. Ригг. Внизу показан ее вид сверху по оси $x-x$. Сдвоенные стремени, выполненные в виде педалей, должны были позволить наезднику заставить лошадь двигаться шагом. Лошадь управлялась поводьями. С их помощью можно было поворачивать голову и передние ноги из стороны в сторону. Машину, очевидно, так и не построили. Если бы ее создали, она бы действовала по принципу многих современных механических игрушек. Поскольку в них нет сенсорных или вычислительных устройств, они не могут приспособляться к условиям местности и рассчитаны на передвижение лишь по ровной поверхности.

машины, которая будет сохранять равновесие в трех плоскостях; это позволит ей совершать круговые движения на ровной площадке. Уже разработана и испытана математическая модель движения такой машины и установлено, что управление движением в трех плоскостях можно разбить на такие же три контура, о которых только что говорилось.

По мере того как при создании бегущей на одной ноге машины мы продвигались вперед, у нас родилась идея, которая оказала нам существенную помощь в работе. Идея заключалась в том, что управление процессом бега можно понять наиболее полно, если разбить его на три составные части: управление высотой, управление балансировкой и управление пространственным положением. Разделение управления на три такие части намного облегчает понимание сложного поведения ног при ходьбе и беге. Такой подход позволил создать довольно простую систему управления, которая заставляет машину на одной ноге сохранять равновесие и бегать.

Положительные результаты, полученные в этой работе, побуждают нас думать о создании подвижных машин на нескольких ножных опорах. Мы убеждены, что правильный подход к разработке таких машин заключается прежде всего в концентрации внимания на их поведении во время подъема и опускания и при балансировке; сложные вопросы передвижения машины по заданной траектории на этом этапе пока не должны рассматриваться. Мнение о том, что движение прыжками — это основная форма перемещения машины на одной ножной опоре, позволило составить правильное представление о ее поведении. Что же касается машин с несколькими опорами, то для них такой вид движения представляется менее естественным. Возможно, не столь естественным такое движение нам представляется потому, что мы привыкли видеть животных бегущими и хотим сразу разобраться в их поведении.

МАШИНЫ с четырьмя ножными опорами при выполнении прыжков на месте могли бы использовать одну из нескольких последовательностей движения ног. Самая простая из них — прыжки на всех четырех ногах одновременно. Не трудно сообразить, что в этом режиме управлять машиной могли бы те же три сервомеханизма, которые используются в управлении прыгающей машиной на одной ножной опоре. В данном случае благодаря наличию более широкой опорной базы контур управления положением машины, который удерживает ее корпус в вертикальной стойке, можно было бы существенно упростить. При переме-

щении вперед ее ноги совершали бы качательные движения в том порядке, который легко можно было бы задать таким же механизмом управления, который используется в управлении машиной на одной ноге.

Другим видом движения машины на четырех ногах при выполнении ею прыжков на месте может стать подпрыгивание на парах ног, противоположных по диагонали. И в этом случае не нужно слишком напрягать воображение, чтобы понять, каким образом можно дифференцировать управление высотой прыжка, балансировкой и положением корпуса. Для поддержания желательной высоты прыжков соответствующий механизм управления сообщал бы каждый раз дополнительную энергию машине. Управление балансировкой осуществлялось бы воздействием на пару ног, когда они подняты, задавая им такое положение, при котором обеспечивается наилучшее равновесие машины. Механизм управления положением корпуса в свою очередь сообщал бы требуемый вращающий момент паре ног, касающихся земли. И так же, как в машине с одной опорой, механизмы управления положением и балансировкой чередовали бы действие таких же приводов. Более того, как нам удалось установить на той машине, перемещение корпуса легко осуществлялось бы путем переноса каждой поднятой стопы вперед так, чтобы среднее значение уравнивающей силы, действующей на эту ногу, равнялось нулю во время следующей стойки. В результате получается движение рысью, которое часто используют четвероногие животные.

Аналогично можно рассмотреть еще два вида движения, если управление каждой ногой представить в виде трех составляющих — вертикальным положением корпуса, равновесием машины и ее положением. При движении галопом задние ноги касаются земли чуть раньше, чем передние. На этапе полета допускается изменение положения корпуса, чтобы при касании земли задними ногами он принимал положение «носом вверх», а передними — «носом вниз». Разновидностью галопа является карьер, при котором передние ноги перемещаются почти синхронно, и такое же движение совершают задние ноги, причем смена этих движений происходит через равные промежутки времени. Именно карьер позволяет гепарду развить скорость до 100 км/ч.

ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО перемещения по поверхности земли необходимо, чтобы при каждом движении машины расход энергии был минимальным. Мы уже говорили о том, как при выполнении вертикальных движений ног можно добиться незначительных энергетических потерь за счет аккумуляиро-

вания энергии в эластичных элементах. А что происходит в случае, когда ноги совершают колебательные движения?

При движении по поверхности земли с большой скоростью машина должна быстро выбрасывать ноги вперед и назад. Именно на эти движения ног бегущее животное и тратит большую часть своей энергии. В нашей машине с одной ногой такие движения выполняются с помощью обычного дозиметрического сервомеханизма. К тому моменту, когда нога достигает предельного положения при выбросе и на мгновение переходит в состояние покоя, ее кинетическая энергия оказывается израсходованной полностью. В то же время подпрыгивание генерируется саморезонансной системой, которую образуют ножная пружина и масса машины, и сервомеханизму управления высотой остается лишь добавлять или вычитать небольшие порции энергии, чтобы сохранялась заданная высота прыжков. Поэтому, очевидно, чтобы создать эффективно действующую машину на нескольких ножных опорах, в ней тоже необходимо предусмотреть какую-либо авторезонансную систему, которая обеспечивала бы колебательные движения ног. В таком механизме можно было бы ноги соединить пружинами, чтобы они совершали колебания подобно камертону с частотой, соответствующей скорости выполнения вертикальных прыжков.

Хотя, как нам представляется, мы знаем, как построить машину на четырех ногах, которая умела бы бегать любым из уже описанных способов, многие вопросы все же остаются нерешенными. Пока еще не ясно, как такую машину следует запускать и останавливать и как задавать ей способ движения. Если машина уже совершает прыжки на месте, мы знаем, как сообщить ей движение вперед. Гораздо более трудным является вопрос о том, как осуществить переход от состояния неподвижности к движению на полной скорости. Таким же сложным является вопрос: как и когда такая машина должна менять вид движения? Бегущая лошадь при повороте меняет переднюю ведущую ногу, т.е. ту, которая слегка опережает другую. Какие же нужно произвести расчеты, чтобы столь незначительно изменить порядок движения ног у машины? Мы считаем эти проблемы весьма интересными как с инженерной точки зрения, когда они выражают смысл вопроса «что нам нужно строить?», так и с научной, когда их решение равносильно ответу на вопрос «как действуют биосистемы?».

Не менее сложной представляется проблема выбора точек опоры для машины. Функция зрения человека и животного в процессе движения и особенно их умение зрительно выбирать наи-

более подходящие точки опоры для ног пока еще мало изучены. Устранить эту трудность, по-видимому, можно, заставляя машину двигаться на большой скорости только по ровной местности и привлекая на помощь человека в том или ином качестве для выбора безопасного пути движения. Для этих целей, вероятно, можно использовать сканирующие устройства для обследования поверхности земли впереди идущей машины на предмет обнаружения впадин. Тем не менее риска избежать невозможно — как лошадь на скаку может попасть копытом в нору суслика, так и бегущая машина может оступиться.

НА ПРОХОДИМОСТЬ вездеходов влияют два ограничивающих фактора. Первый — это затвердевшие следы колес и гусениц, которые мешают машинам при движении сохранять непрерывную линию опорных точек. На движении с ножными опорами это обстоятельство не сказывается. Современные достижения в развитии электронно-вычислительной техники позволяют надеяться, что на их основе можно будет создавать необходимые системы управления для ходящих машин, и тогда они станут альтернативой транспортных средств повышенной проходимости. Сейчас имеются все предпосылки для серьезного рассмотрения такой перспективы. Уже сейчас Военное управление перспективного планирования исследований финансирует разработки таких машин и частично оказывает материальную помощь нашим проектам.

Второй фактор, влияющий на проходимость, — это ширина транспортного средства: мотоцикл может пройти там, куда джипу не добраться. Машины на ножных опорах можно построить малой ширины, но их придется балансировать, хотя бы в поперечном движении. Накопленный нами опыт в разработке ползающей шестиногой машины, для которой равновесие не играет существенной роли, а также в исследовании процессов ходьбы и бега с сохранением равновесия позволяет сказать, что понимание принципов балансировки и их техническая реализация являются одной из самых существенных проблем. По нашему мнению, ведущиеся сейчас у нас и в других лабораториях эксперименты с шестиногими ползающими машинами направлены в основном на отработку процесса управления движением нескольких ног и сами по себе не имеют большого практического значения; в конечном итоге эти ползающие машины уступят место тем, у которых будет меньше ног, но они будут способны поддерживать равновесие. Решение проблемы равновесия открывает путь к созданию машин повышенной мобильности, умеющих ходить и бегать.

SCIENTIFIC AMERICAN

ЯНВАРЬ 1933 г.: «Результаты последних исследований в области атомной физики убедительно подтверждают единство волновой и корпускулярной теорий строения материи. Фактически невозможно доказать экспериментально, что материя обладает либо *только* волновыми свойствами, либо *только* свойствами микрочастиц. Как полагает Вернер Гейзенберг, обе картины, которые опыт вызывает в нашем воображении — одна корпускулярная, другая волновая, — следует рассматривать просто как неполные аналогии, поскольку мы пока не способны описать материю нашим повседневным языком. Хотя мы не в состоянии удовлетворительно изобразить атом, как его представляет волновая механика, математический аппарат этой теории все же позволяет полно описать модель атома Бора. При этом все прежние несоответствия устраняются, фундаментальные положения обновляются и уточняются, а число необходимых допущений уменьшается до минимума. С этой точки зрения волновая механика не изменяет радикально наших представлений об атомном строении вещества, а скорее подтверждает их правомерность».

«К представительницам новой профессии, стюардессам, предъявляются довольно жесткие требования. Молодая леди должна быть незамужней, не старше 25 лет, закончить колледж и весить не более 125 фунтов. Стюардесса, безусловно, должна быть подвижной и достаточно легкой, чтобы не нарушать равновесие самолета. Она к тому же должна в трехчасовом полете выдержать испытание на воздушную качку и получить согласие пилотов после двухнедельного наблюдения. В ее обязанности входит забавлять пассажиров и отвлекать их от мыслей об опасности полета».

SCIENTIFIC AMERICAN

ЯНВАРЬ 1883 г.: «Одна из фирм в Ганновере построила бензиновый мотор, а точнее двигатель, для получения энергии от взрывной смеси паров бензина и воздуха. Диаметр рабочего цилиндра 8 дюймов, длина рабочего хода $14 \frac{3}{16}$ дюйма. Конструкция мотора имеет много общего с устройством газового двигателя, созданного Виттигом и Хизом. Бензин через патрубков всасывается в цилиндр, где он смешивается с ат-

мосферным воздухом в определенной пропорции. Смесь затем сжимается, под давлением подается в рабочую камеру цилиндра и в ней воспламеняется лампой, к которой по специальной трубке подводится масло. В четырех испытаниях одного двигателя указанного типа была получена мощность 4,5 л.с., а скорость вращения достигала 130 об/мин. Потребление бензина с удельным весом 0,675 составляло от $1 \frac{1}{2}$ до $2 \frac{1}{2}$ пинт на 1 л.с. в час. Как указывается, двигатель требует мало внимания и экономичен, как и газовый».

«Многое подтверждает практическую полезность и экономичность динамомашин, вырабатывающих электричество для общественных нужд. Особенно показательны случаи, когда с их помощью освещаются большие объекты, как, например, вокзалы и другие общественные здания, не говоря уже о маяках, где электрический свет давно успешно используется. В производстве электричества динамомашин можно применять и для другой весьма полезной цели — передачи энергии, и это, пожалуй, их самое важное назначение. Свойство динамомашин передавать электроэнергию определяется известным принципом *обратимости*, на котором основана их работа, или, другими словами, их способностью превращать электрическую энергию в механическую работу, что обратно преобразованию механической энергии в электрическую. При передаче энергии посредством электричества ток создается в одной машине, от нее он передается к другой, которая может быть удалена на любое расстояние, и сообщать вращательное движение любому виду технического оборудования. Пока еще спорят, на какое расстояние электрическая энергия может передаваться без существенных потерь, и достаточно серьезно это пока не исследовалось. Мы, однако, полагаемся на авторитет д-ра Уильяма Сименса. В результате множества опытов, проведенных этим выдающимся специалистом в области электротехники, было установлено, что суммарные энергетические потери при двойном преобразовании (т.е. при превращении механической энергии в электрическую и обратно) составляют около 20%. К этому следует добавить потери, обусловленные сопротивлением проводов, которое зависит от их длины и площади поперечного сечения, так что для реальных условий можно смело допустить, что потери в линии большой протяженности не превышают 50%; по сравнению с потерями при передаче энергии с помощью сжатого воздуха, воды или другими способами они вовсе не так велики».

Волосковые клетки внутреннего уха

От этих сверхчувствительных передатчиков
зависят наш слух и чувство равновесия.

В ответ на малейшее давление
на верхнюю часть клетки у ее основания
возникает биоэлектрический сигнал

А. ДЖ. ХАДСПЕТ

КАЗАЛОСЬ бы, что общего между слухом, чувством равновесия, способностью некоторых животных ощущать колебания почвы, чувствительностью рыб к перемещениям слоев воды? На самом деле эти биологические феномены очень близки друг другу. Все они реализуются благодаря одним и тем же рецепторам, которые называются *волосковыми клетками*. Своим названием эти клетки обязаны особым волоскам — тончайшим отросткам, пучком отходящим от поверхности клетки. Волосковая клетка — это сверхчувствительный механоэлектрический передатчик, преобразующий механическое раздражение волосков в электрические сигналы, идущие в мозг.

Каждая волосковая клетка чувствительна к раздражению лишь в определенных пределах. Поэтому для получения информации о всем разнообразии внешней среды и собственных сложных перемещениях в пространстве организму необходимы тысячи рецепторов с различными диапазонами чувствительности. Такой комплект волосковых клеток размещен в нескольких миниатюрных образованиях, из которых состоит внутреннее ухо. У человека во внутреннем уже шесть таких образований, в каждом несколько тысяч волосковых клеток с несколько различающейся чувствительностью. Совместная деятельность рецепторов внутреннего уха дает исчерпывающую информацию о линейном ускорении в любом направлении, об угловом ускорении вокруг трех взаимно перпендикулярных осей, а также о звуках в широком диапазоне частот.

Структура волосковых клеток и их роль как рецепторов известны давно, однако только теперь становится понятным, как работает отдельная волосковая клетка. Чтобы изучить функции внутреннего уха на клеточном уровне, я исследовал изолированные волосковые клетки внутреннего уха американской лягушки-быка (*Rana catesbiana*). Для перемещения пучка волосков в том

или ином направлении я пользовался стеклянным микрозондом, а электрический сигнал регистрировал специальным микроэлектродом. Этим методом я впервые получил запись электрической активности отдельной волосковой клетки при дозированном механическом воздействии на пучок волосков.

Волосковые клетки чувствительны к очень слабым раздражителям. Например, волосковые клетки млекопитающих начинают реагировать, когда кончик пучка волосков сдвигается всего лишь на 100 пкм — это расстояние сравнимо с диаметром ряда атомов. Запись активности изолированных волосковых клеток показала, что для каждой есть какое-то одно направление пучка волосков, когда рецептор максимально чувствителен. Если пучок волосков перемещают в различных направлениях, клетка реагирует только на ту составляющую движения, направление которой совпадает с направлением максимальной чувствительности. Цитофизиологические данные вместе с результатами световой и электронной микроскопии подводят нас все ближе к пониманию механизма рецепции во внутреннем ухе. Тем не менее остается много неясных вопросов; один из наиболее интригующих: каков конкретный молекулярный механизм, с помощью которого в результате смещения пучка волосков изменяются электрические свойства клетки и возникает идущий в мозг информационный сигнал?

ВОЛОСКОВЫЕ клетки обычно имеют цилиндрическую или колбовидную форму, они всегда располагаются в эпителии, состоящем из нескольких слоев клеток. Они очень близки нервным клеткам-нейронам, хотя не имеют аксонов или дендритов (т.е. волокон, отходящих от нейронов и передающих электрические сигналы по нервной системе). Поэтому волосковые клетки часто называют паранейронами. В эпителии апикальные, или на-

ружные, части волосковых клеток лежат вровень с апикальными частями окружающих опорных клеток. Апикальные концы волосковых и опорных клеток образуют ровную поверхность, над которой выступают пучки волосков. В различных клетках длина пучков колеблется от 3 до более чем 100 мкм.

Пучки волосков существенно различны по тонкой структуре не только у животных разных видов, но даже и в различных частях внутреннего уха у одного и того же индивидуума. Тем не менее у всех позвоночных животных форма пучка волосков в основном одинакова. Каждый пучок состоит из 30 — 150 тонких стержнеобразных отростков. Отростки бывают двух типов. Хотя и тот и другой носят общее название — реснички (цилии), внутреннее строение пучков разных типов различается. Все отростки, за исключением одного, называются стереоцилиями. Стереоцилии представляют собой цилиндрические или булавовидные органеллы, внутренний слой которых состоит из плотно упакованных волокон. Волокнистую сердцевину, как перчатка пальца, покрывает клеточная мембрана — плазмалемма. В различных клетках диаметр стереоцилий варьирует от 0,2 до 1 мкм.

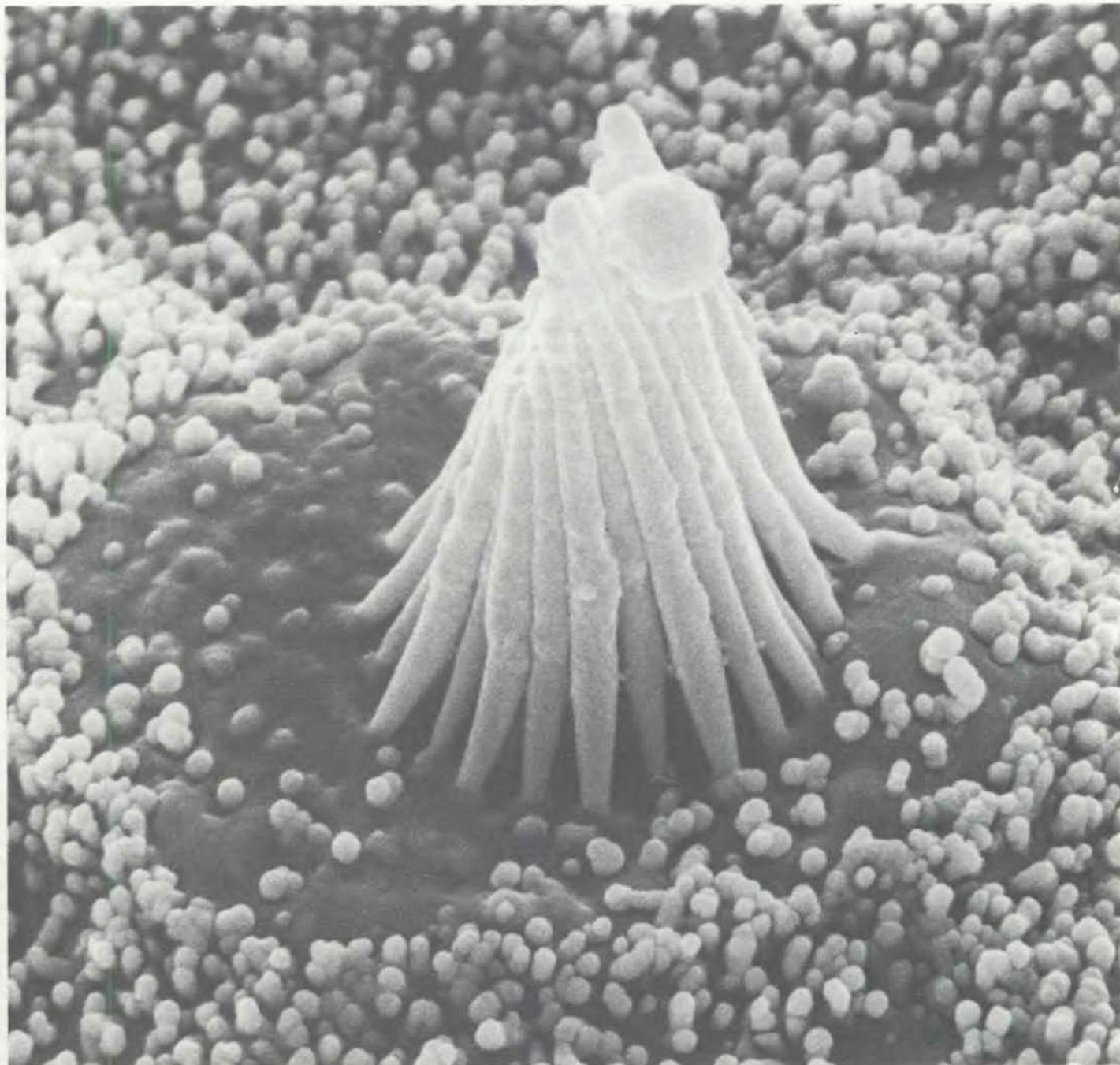
Несмотря на свое название, стереоцилии не настоящие «цилии», т.е. реснички. Для настоящих ресничек, например для хвостовой нити сперматозоида, характерна сложная, высоко дифференцированная структура осевой нити — аксономы. Большинство истинных ресничек способно двигаться независимо друг от друга, как весла при гребле; при этом двигательный импульс возникает в аксономе. Все же в пучке волосков есть одна истинная ресничка, так называемая киноцилия. Ее диаметр 0,25 мкм. Как и аксономы других истинных ресничек, аксонома киноцилии состоит из отдельных трубочек: двух центральных одиночных и девяти «дублетов» (в дублетах пара трубочек

имеет одну общую стенку). Киноцилия лишена, однако, способности к автономному движению в составе пучка. Ее дистальный конец обычно срастается с окружающими стереоцилиями.

Реснички в пучке расположены упорядоченно. Стереоцилии группируются в гексагональные структуры: каждая из них окружена шестью другими, от-

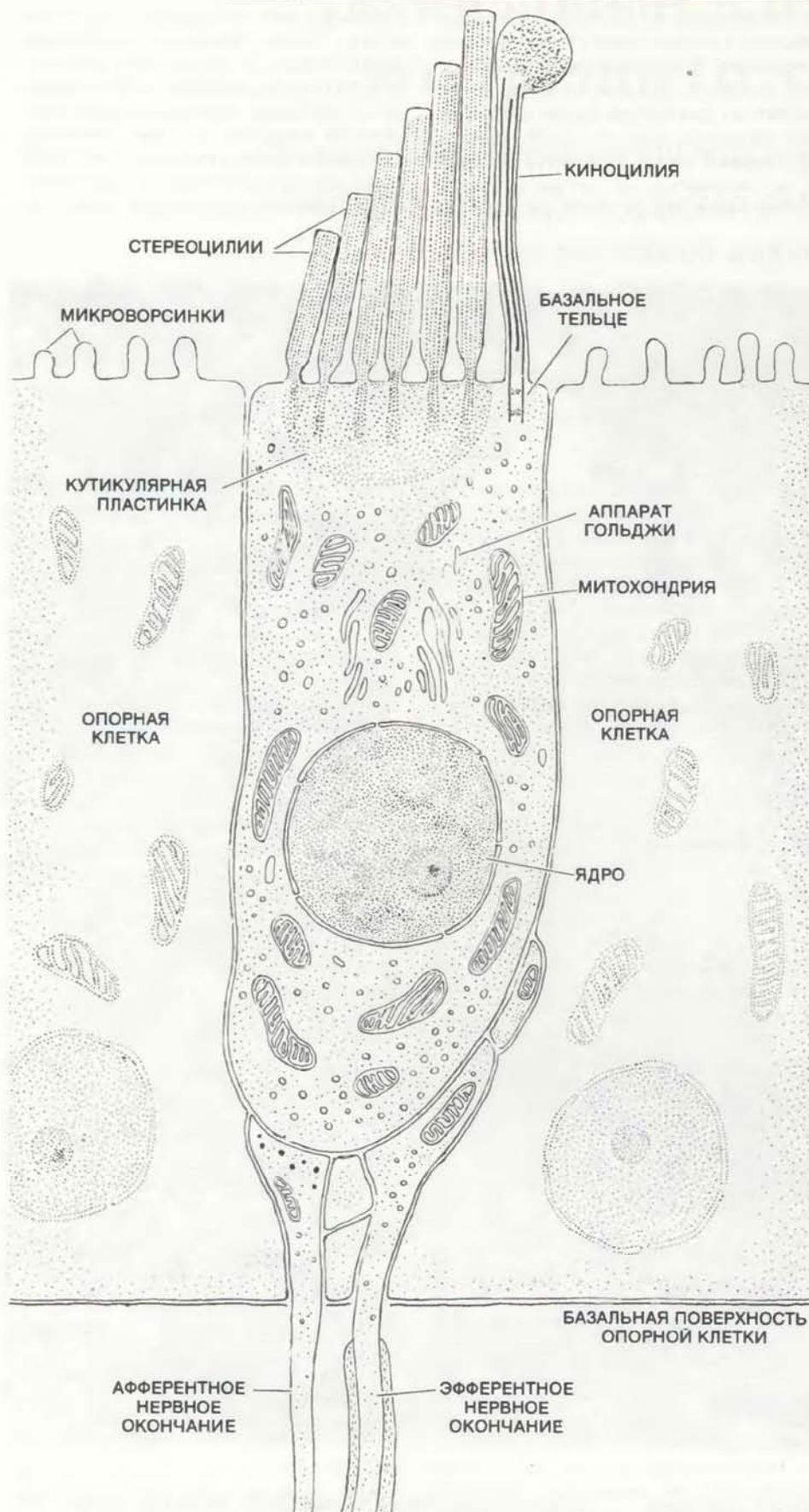
стоящими друг от друга на равное расстояние. Однако длина стереоцилий неодинакова. В поперечном сечении пучок волосков круглый, причем вдоль одного из диаметров длина стереоцилий нарастает, а вдоль линий, перпендикулярных этому диаметру, не меняется. Получается, что пучок волосков состоит из рядов ресничек, распределя-

ющихся в нем «по росту». Структура пучка, таким образом, двусторонне симметрична. В покоящейся волосковой клетке стереоцилии не обязательно ориентированы перпендикулярно апикальной поверхности. Они, напротив, наклонены и образуют косо срезанный конус, вдоль края которого, деля конус на две симметричные части, лежит ки-



ПУЧОК ВОЛОСКОВ клетки внутреннего уха лягушки-быка. Пучок обеспечивает чувствительность клетки к механическому раздражению. Волосковые клетки входят в состав эпителия — слоя ткани толщиной в несколько клеток, — где они окружены опорными клетками. Показанный на снимке пучок состоит примерно из 50 тонких волокнистых выростов. Все они, за исключением одного, называются стереоцилиями и не являются истинными ресничками. В пучке есть одна истинная ресничка — киноцилия (на снимке ее кончик находится в покоем на луковицу утолщении в

правой верхней части пучка). Пучок волосков находится в состоянии покоя: он имеет вид прямо стоящего конуса с косо срезанной верхушкой. Отклонение пучка от такого прямого положения заставляет волосковую клетку послать электрический сигнал в мозг. Множество светлых выступов, окружающих волосковый пучок, — микроворсинки апикальных поверхностей опорных клеток, окружающих волосковую. (Микрофотография получена с помощью сканирующего электронного микроскопа Р. Джекобсом в Калифорнийском технологическом институте; увеличение $\times 14\,000$.)



ВОЛОСКОВАЯ КЛЕТКА в продольном разрезе. Она может иметь цилиндрическую или колбовидную форму. Организация пучка волосков несколько различается у животных разных видов, но общий план его структуры у всех позвоночных один и тот же. Вдоль одного из диаметров длина стереоцилий постепенно нарастает, а вдоль линий, перпендикулярных ему, длина ресничек одинакова, так что пучок обладает двусторонней симметрией. Киноцилия лежит в плоскости симметрии с более высокой стороны конуса. Афферентное нервное волокно, оканчивающееся у базальной поверхности волосковой клетки, передает сигналы от нее в мозг.

ноцилия. Кончики ресничек сближены или смыкаются.

Во время развития человеческого зародыша клетки, из которых в дальнейшем сформируется внутреннее ухо, вначале закладываются в виде двух утолщенных пластинок — плакод. Эти плакоды располагаются на наружной поверхности эмбриона по бокам от развивающегося нервного ствола. По мере увеличения в размерах они врастают внутрь эмбриона и, наконец, утрачивают контакт с поверхностью. Начиная с этого момента их называют ушными пузырьками. Ушной пузырек представляет собой маленький мешочек эпителиальной ткани, наполненный жидкостью.

УШНОЙ пузырек развивается довольно сложно: он растет, образуются изгибы, отдельные части сливаются. В результате получают шесть рецепторных образований, населенных волосковыми клетками. Три так называемых полукружных канала — они воспринимают угловое ускорение — имеют вид трубок тороидальной формы (похожи на баранки). Каналы соединены друг с другом таким образом, что, когда голова человека находится в обычном положении, они лежат в трех взаимно перпендикулярных плоскостях. Линейное ускорение воспринимается двумя другими образованиями: эллиптическим (маточкой) и сферическим (мешочком). Собственно орган слуха — улитка — имеет спиральную форму, что и отражено в его названии.

Полностью сформировавшееся внутреннее ухо с геометрической точки зрения очень сложная структура, недаром его называют лабиринт. Но, несмотря на эту сложность, все шесть его частей построено по сравнительно простому общему плану, в котором угадываются черты исходного ушного пузырька зародыша. Все они состоят из непрерывающегося слоя эпителиальной выстилки и подлежащей соединительной ткани. Эпителий окружает замкнутую полость, наполненную жидкостью — эндолимфой. Пространство снаружи перепончатого лабиринта также заполнено жидкостью, но другой, отличной по составу от эндолимфы; там, где она скапливается, ее называют перилимфой. Вся конструкция поконится в хрящевом футляре, а поверх него еще и в костном.

Итак, слой эпителия разделяет две различные тканевые жидкости. Волосковые клетки эпителия контактируют как с эндолимфой, так и с перилимфой. Апикальная поверхность клетки соприкасается с эндолимфой внутри органа, а ее базальная часть, основание, омывается перилимфой. Как мы увидим, эти две жидкости очень важны для функций волосковых клеток.

Чтобы постигнуть сущность функ-

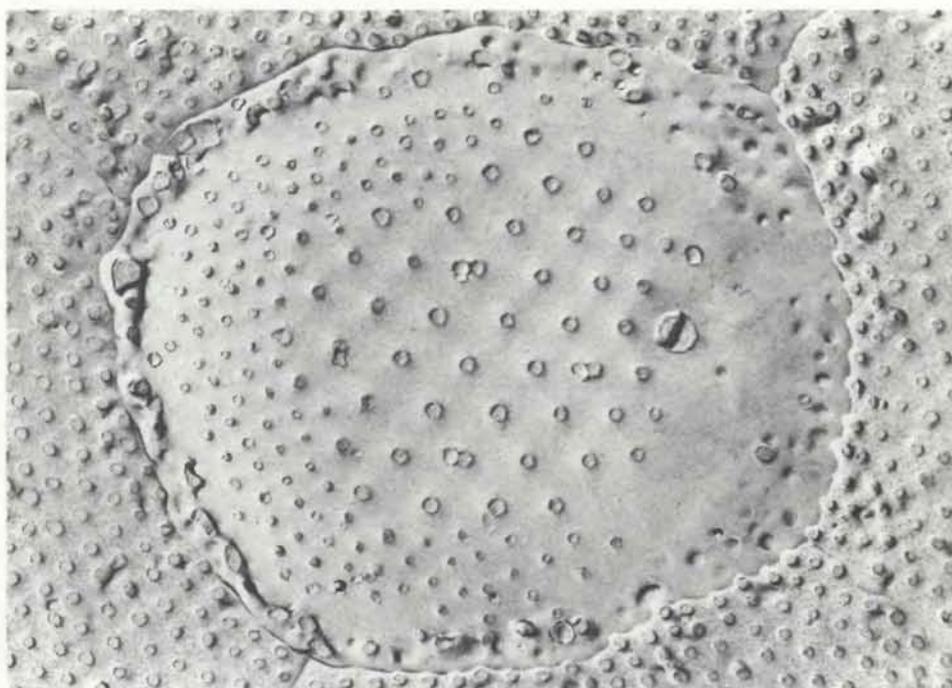
ционирования волосковой клетки, необходимо представлять механизм работы всех частей лабиринта. Маточка и мешочек расположены так, что сочетание положения пар этих органов в двух ушах обеспечивает чувствительность к линейному ускорению в любом направлении. Еще важнее, что парные слуховые пузырьки постоянно следят за ускорениями, обусловленными силой тяжести. Благодаря этому они играют ключевую роль в контроле осанки, походки и равновесия. Ощущение направления этими двумя органами весьма сложно, но для простоты можно считать, что маточка воспринимает горизонтальное ускорение, а мешочек — вертикальное.

ВОЛОСКОВЫЕ клетки маточки и мешочка в каждом из этих органов расположены в так называемых слуховых пятнах — эпителиальных образованиях серповидной формы, имеющих примерно 1 мм в поперечнике. Такое пятно более или менее плоское, оно включает несколько тысяч волосковых клеток. В мешочке слой эпителия расположен в основном вертикально, а в маточке — горизонтально. Параллельно эпителию в непосредственной близости от него лежит отолитовая мембрана; она представляет собой густую сеть белковых молекул. В углубления отолитовой мембраны входят киноцилии волосковых клеток. В отолитовую мембрану погружено множество мельчайших известковых кристаллов — отолитов. Отолиты состоят из карбоната кальция, обычно в форме кальцита, обильно содержащего органический остов образования.

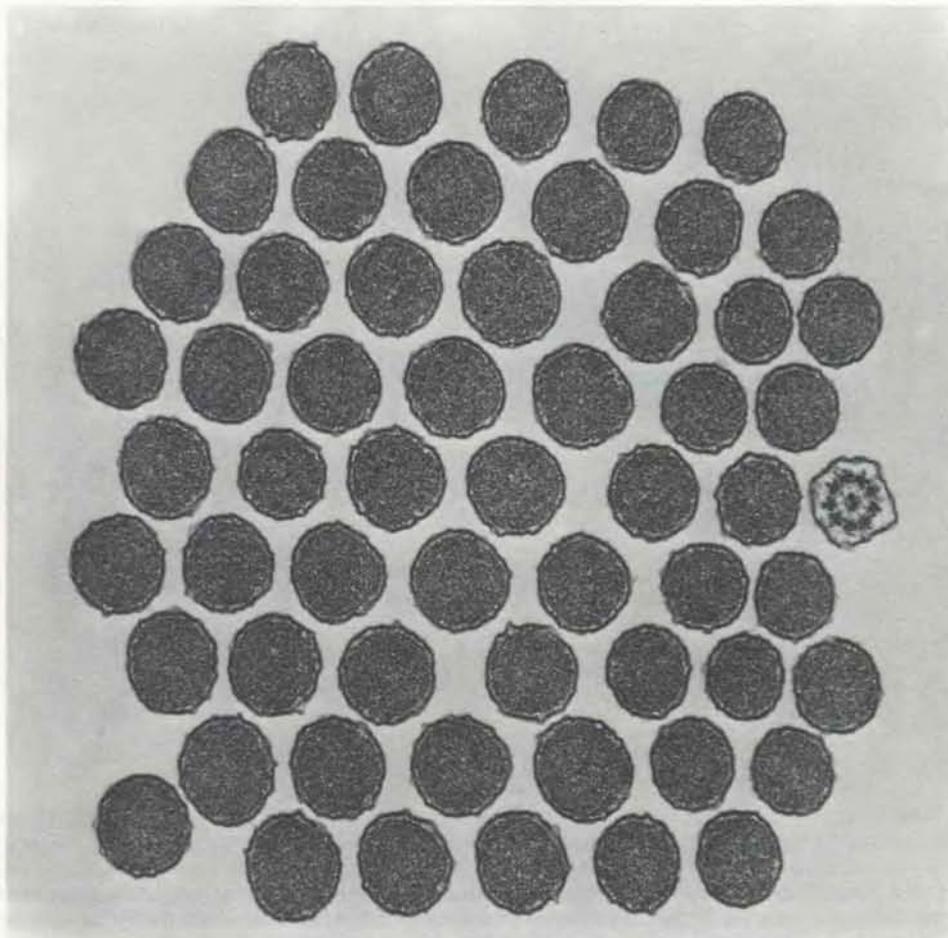
Плотность отолитов во много раз больше, чем плотность эндолимфы в маточке и мешочке. Поэтому при ускорении отолиты вследствие инерции отстают от движения эндолимфы. Их давление на отолитовую мембрану передается пучкам волосков. Волосковая клетка при этом механически раздражается: верхушка пучка волосков смещается в направлении, противоположном направлению ускорения.

В полукружных каналах механическое раздражение передается на верхушку пучка волосков иным способом. Каждый полукружный канал представляет собой округло изогнутую трубку диаметром примерно 6 мм. В одном месте сечение канала несколько больше, чем в остальной его части; расширение называется ампулой. В ампуле поперек канала располагается слой ткани — гребешок, покрытый студенистым внеклеточным веществом — купулой. Волосковые клетки размещаются в гребешке, а пучки волосков торчат наружу, окутанные студенистым веществом купулы.

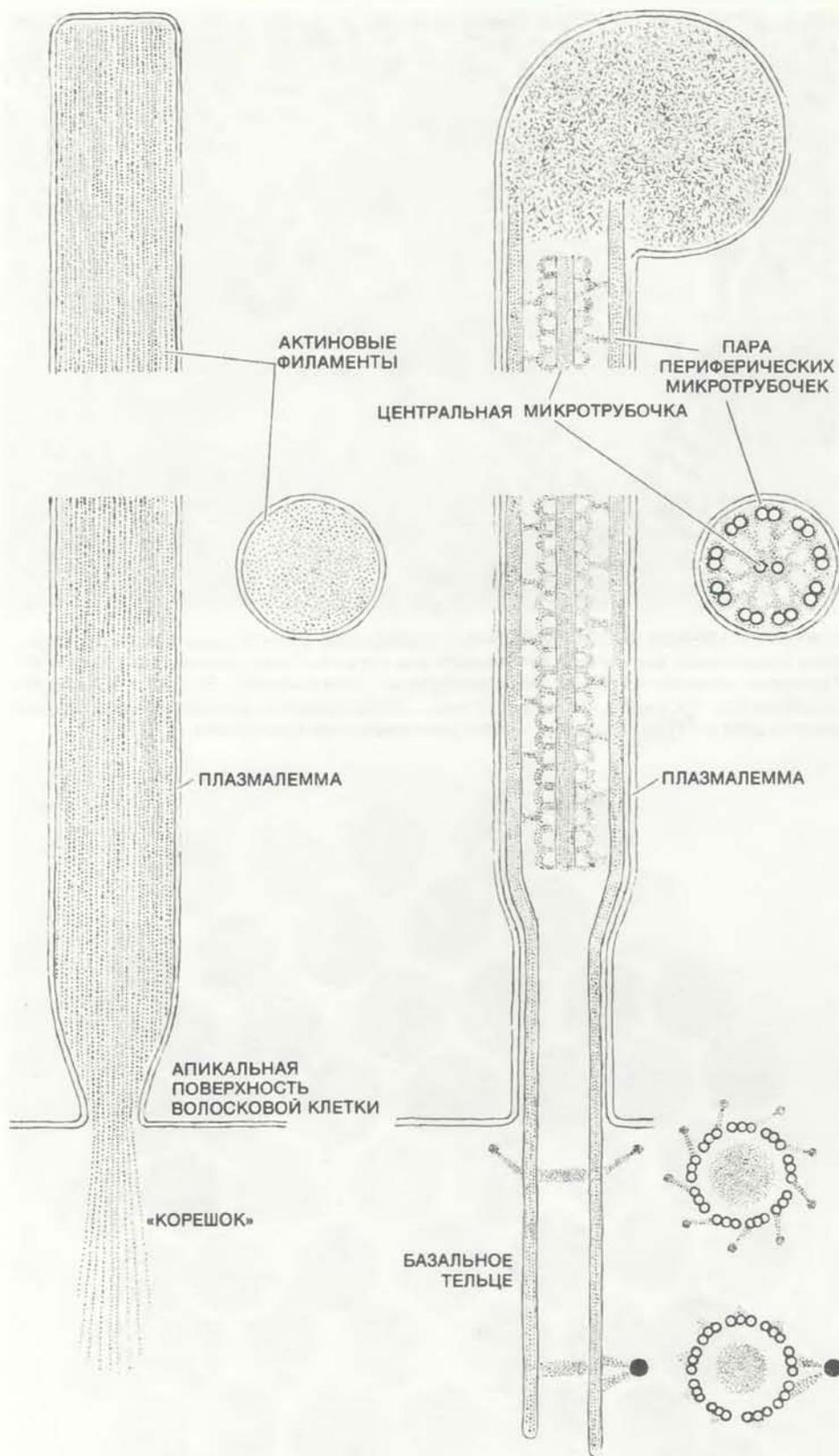
При угловом ускорении, например, если быстро повернуть голову, эндо-



ГЕКСАГОНАЛЬНОЕ РАСПОЛОЖЕНИЕ стереоцилий. Электронная микрофотография волосковой клетки из внутреннего уха лягушки-быка (увеличение $\times 16\,000$). Препарат получен методом замораживания — скальвания. Видно, что каждая стереоцилия окружена шестью другими, находящимися на равном расстоянии друг от друга. "Пенек" справа — остаток основания киноцилии.



ВНУТРЕННЯЯ СТРУКТУРА киноцилии и стереоцилий. Показаны сердцевинные части ресничек обоих типов (увеличение $\times 40\,000$). Сердцевину стереоцилии составляет пучок нитевидных волокон, а в киноцилии (справа) имеется аксонема. Микрофотографии сделаны в просвечивающем электронном микроскопе; предварительно реснички обработали веществами-стабилизаторами, которые имеют сродство к филаментам и микротрубочкам.



СТЕРЕОЦИЛИЯ И КИНОЦИЛИЯ в продольном и поперечном разрезах. Каждая стереоцилия (слева) по форме напоминает карандаш или бейсбольную битку. Диаметр ее в различных клетках варьирует от 0,2 до 1 мкм. «Корешок» стереоцилии проходит сквозь апикальную поверхность волосковой клетки. Параллельно уложенные волокна (филаменты) сердцевинки стереоцилии состоят из белка актина, между отдельными филаментами имеется множество связей, что придает всей структуре жесткость. В аксонеме киноцилии, как и в аксонемах других истинных ресничек, две центральные микротрубочки окружены девятью дублетами микротрубочек. Аксонему лучше всего видно на горизонтальном срезе справа вверху. Снаружи и киноцилия и стереоцилии покрыты мембраной клетки, как перчаткой.

лимфа в полукружном канале вследствие инерции отстает от движения стенок канала, которые перемещаются вместе со всей головой. Жидкость давит на мягкую, легко перемещающуюся купулу, что заставляет наклоняться погруженные в нее пучки волосковых клеток.

Шестой орган внутреннего уха, улитка, имеет форму закрученной спиральной трубки. Примерно 15 000 волосковых клеток улитки человеческого уха воспринимает звуки в диапазоне частот от нескольких десятых долей герца до 20 000 Гц. Волосковые клетки расположены упорядоченно на основной, или тимпанальной мембране, которая как бы плавает внутри улитки, повторяя ее изгибы. Естественные звуки, попадая в улитку, членятся на составляющие частоты, каждая из которых возбуждает только небольшую часть из 15 000 волосковых клеток на тимпанальной мембране.

Работа улитки настолько сложна, что вряд ли целесообразно описывать ее здесь подробно. Кроме того, механизм ее функционирования во многом непонятен, а экспериментальные данные часто противоречивы. Считается, однако, что в улитке, как и в других частях внутреннего уха, стимулом, раздражающим волосковые клетки, является скорее всего смещение волосков. Здесь мы ограничимся вопросом о том, каким образом изменения давления звуковых колебаний, действующих на ухо извне, преобразуются в механическое давление на пучки волосковых клеток.

Звуковые волны, поступающие в наружное ухо, ударяются о барабанную перепонку. Ее движение передается расположенным в среднем ухе тремя небольшим косточкам — молоточку, наковальне и стремечку. Стремечко, лежащее ближе всего к внутреннему уху, играет роль своеобразного пистона: оно заставляет вибрировать тимпанальную мембрану. На ней и расположен собственно орган слуха (кортиева орган), несущий волосковые клетки. Их пучки врастают в так называемую текториальную мембрану, тянущуюся по всей улитке параллельно тимпанальной мембране и в непосредственной близости от нее. Оси спиралей этих двух мембран не совпадают, поэтому, когда стремечко смещает тимпанальную мембрану, они сдвигаются относительно друг друга. В результате возникает движение эндолимфы, которое смещает пучки волосковых клеток.

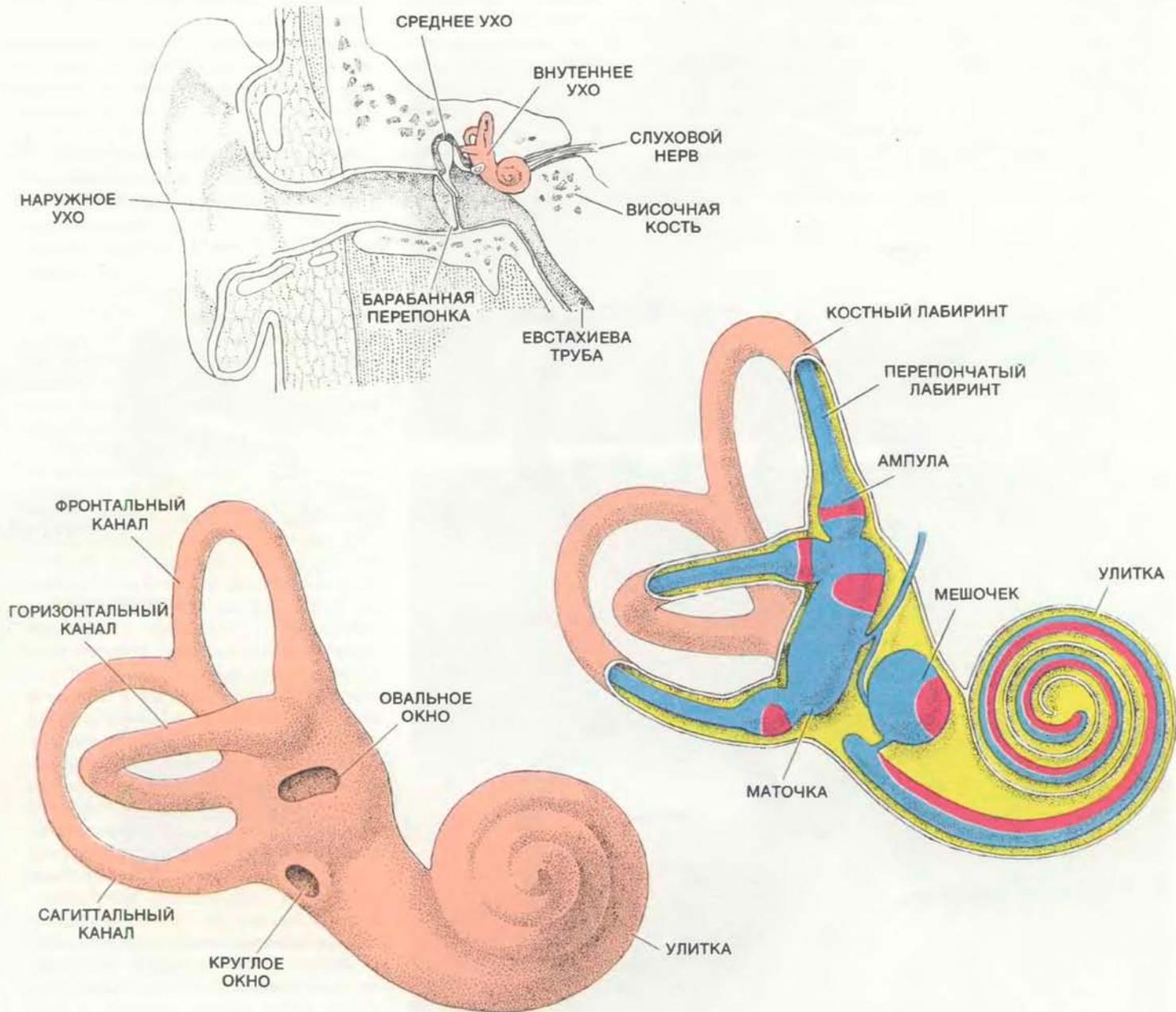
СОГЛАСНО описанной выше схеме (конечно, несколько упрощенной), при функционировании любой части внутреннего уха внешний стимул (ускорение или звук) преобразуется в давление на пучок волосковой клетки. Ключевым моментом для понимания функ-

ции отдельной волосковой клетки должно быть объяснение механизма, с помощью которого механическое воздействие трансформируется в электрический сигнал, идущий затем по нервным путям в мозг. Для полноты картины необходимо также исследование интактного внутреннего уха млекопитающих. Однако на этом пути лежат

серьезные трудности. Височная кость, в которой заключен лабиринт, необычайно твердая; волосковые клетки у млекопитающих очень чувствительны к нарушениям кровоснабжения; кроме того, они довольно мелкие, и к ним трудно подвести микроэлектроды. Сложно также точно определить силу воздействия на пучок волосковой клет-

ки при наличии естественных раздражителей внутреннего уха.

По этим причинам внутреннее ухо чаще всего изучали у низших позвоночных: рыб, лягушек, ящериц, черепах. Более стойкие и относительно крупные волосковые клетки амфибий позволяют проводить такие опыты, которые пока, к сожалению, нельзя осуществ-



ВНУТРЕННЕЕ УХО ЧЕЛОВЕКА состоит из шести сенсорных образований, в которых находятся волосковые клетки. Полукружные каналы воспринимают угловое ускорение, маточка и мешочек — линейное ускорение, улитка — звук. *Вверху:* срез через височную кость, в которой заключено внутреннее ухо. За сложную форму внутреннее ухо часто называют лабиринтом. Звуковые колебания, попавшие на барабанную перепонку, передаются улитке с помощью трех маленьких косточек среднего уха: молоточка, наковальни и стремечка. *Слева внизу:* так выглядел бы лабиринт, если его извлечь из височной кости вместе с тонким слоем окружающей костной ткани (это образование условно называют костным лабиринтом). Три похожие на баранки трубочки

слева — полукружные каналы. Спиральная структура справа — улитка. *Справа внизу:* вскрытый костный лабиринт, в котором заключен перепончатый лабиринт, состоящий из сенсорных образований. Каждое такое образование представляет собой эпителиальный мешок, заполненный эндолимфой (эндолимфа показана голубым цветом). Вне эпителиального мешка, между перепончатым лабиринтом и костным, находится перилимфа (показана желтым цветом). Волосковые клетки размещаются небольшими группами — пятнами (изображены красным цветом). В полукружных каналах эти пятна находятся в расширениях — ампулах, а в улитке — на перепонке, изгибы которой повторяют изгибы спирали.

вить на волосковых клетках млекопитающих. Я в своей работе использовал, главным образом, волосковые клетки внутреннего уха американской лягушки-быка.

Вначале у лягушки извлекают орган равновесия — мешочек, затем удаляют его отолитовую мембрану, и обнажается эпителиальный слой с находящимися в нем волосковыми клетками.

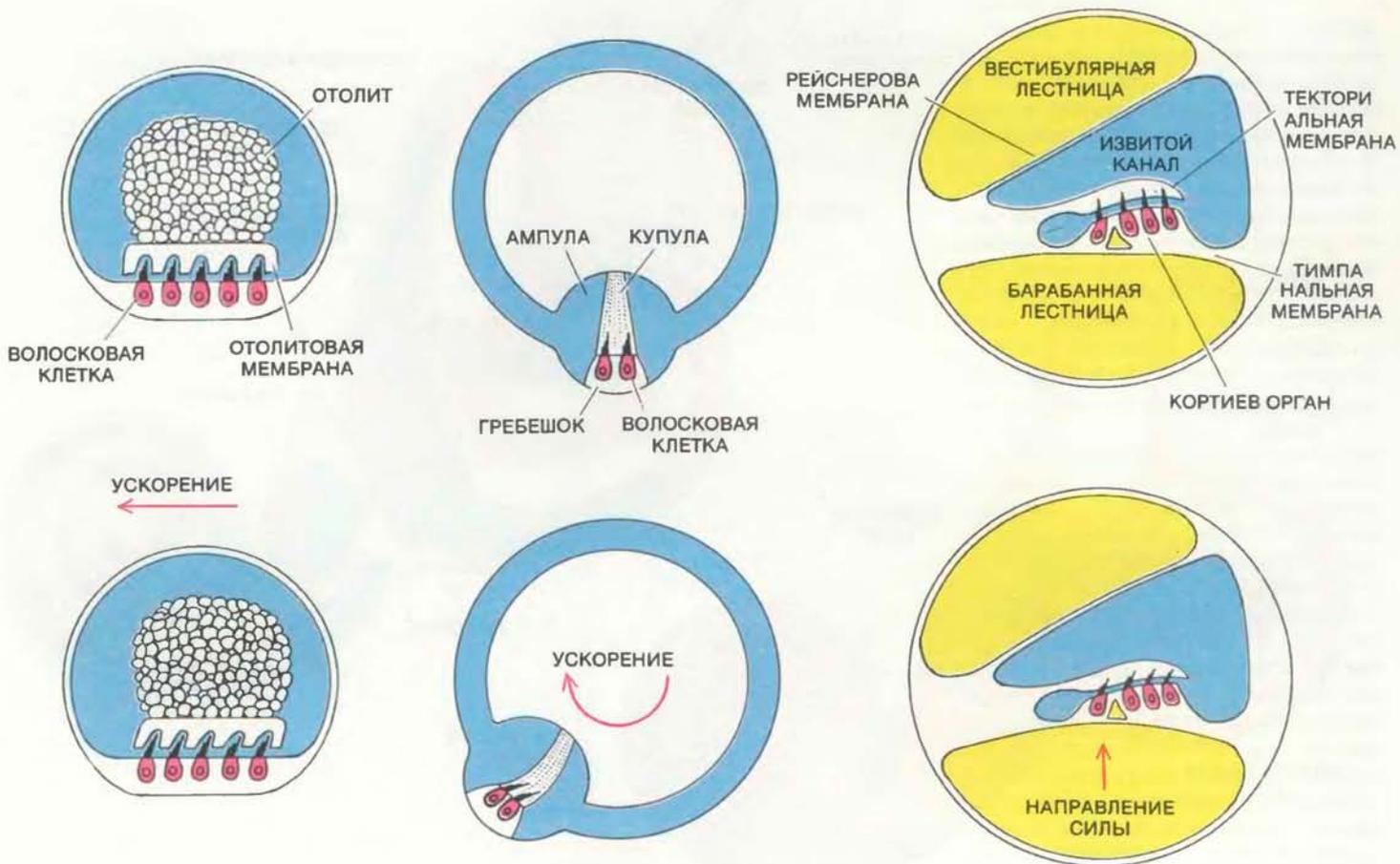
Эпителий, погруженный в физиологический раствор (эта жидкость по многим свойствам похожа на естественные жидкости организма), помещают под микроскоп, через апикальную поверхность в отдельную волосковую клетку втыкается микроэлектрод. Между киноцилией и окружающими ее стереоцилиями вводят стеклянный микрозонд, с помощью которого можно отклонять пучок волосковой клетки

в том или ином направлении. Движения зонда контролируются аппаратом типа «ручка пилота» или компьютером: и тот и другой способ позволяют смещать пучок с большой точностью. Отклонение пучка можно также наблюдать в микроскоп. Микроэлектрод регистрирует электрический потенциал внутри волосковой клетки и его изменения при движении пучка.

Чтобы понять, как изменяются электрические свойства волосковой клетки при движениях пучка волосков, надо иметь хотя бы некоторое представление об электрических свойствах клетки в нормальном, невозбужденном состоянии. Подобно наружным мембранам других клеток, плазмалемма волосковой клетки избирательно проницаема: одни молекулы могут проникать внутрь нее, а другие задержива-

ются снаружи. Проницаемость мембраны может меняться в зависимости от состояния — открытого или закрытого — специфических каналов. Когда каналы открыты, определенные ионы (т.е. атомы или молекулы, которые потеряли электроны или получили лишний) проникают в клетку. Открывая или закрывая ионные каналы, клетка может регулировать свой электрический потенциал по отношению к внешней среде.

Молекулярные насосы клеточной мембраны поддерживают внутри клетки концентрации ионов, существенно отличающиеся от их концентраций во внеклеточной жидкости. Наиболее изучен так называемый натриевый насос — механизм, понижающий концентрацию ионов натрия внутри клет-



ОТКЛОНЕНИЕ ПУЧКА является раздражающим стимулом для волосковых клеток в сенсорных образованиях внутреннего уха всех трех типов. На рисунке показано, как это происходит в маточке и мешочке (слева), полукружных каналах (в центре) и улитке (справа). В маточке и мешочке пучки волосков заходят в густую белковую сеть — отолитовую мембрану. Она усеяна кристаллами, называемыми отолитами. Их плотность гораздо больше, чем плотность эндолимфы, поэтому при перемещении головы с ускорением кристаллы отстают в своем движении от движения жидкости. Вследствие инерции отолит давит на отолитовую мембрану, и это передается пучкам волосковых клеток. Таким образом, специфическим стимулом для волосковых клеток яв-

ляется отклонение волоскового пучка в направлении, противоположном ускорению. В полукружных каналах волосковые клетки помещаются на гребешке, а их пучки погружены в студенистую купулу, лежащую поперек ампулы. При вращении головы эндолимфа по инерции отстаёт от движения стенок каналов и давит на купулу. Та прогибается и давит на пучки волосковых клеток. В улитке волосковые клетки расположены на тимпанальной мембране, а их пучки погружены в текториальную мембрану. При оттягивании стремечка обе мембраны сдвигаются вверх. Поскольку они закручены вокруг несовпадающих осей, то сдвигаются несинхронно, и пучки волосковых клеток отклоняются.

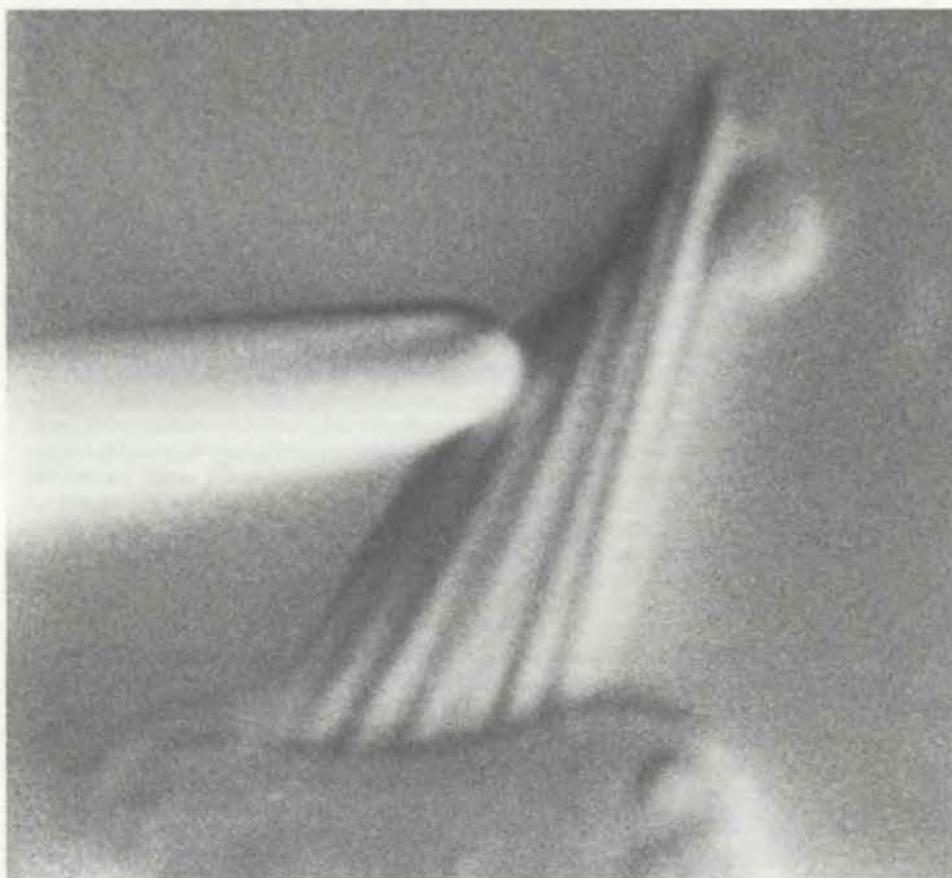
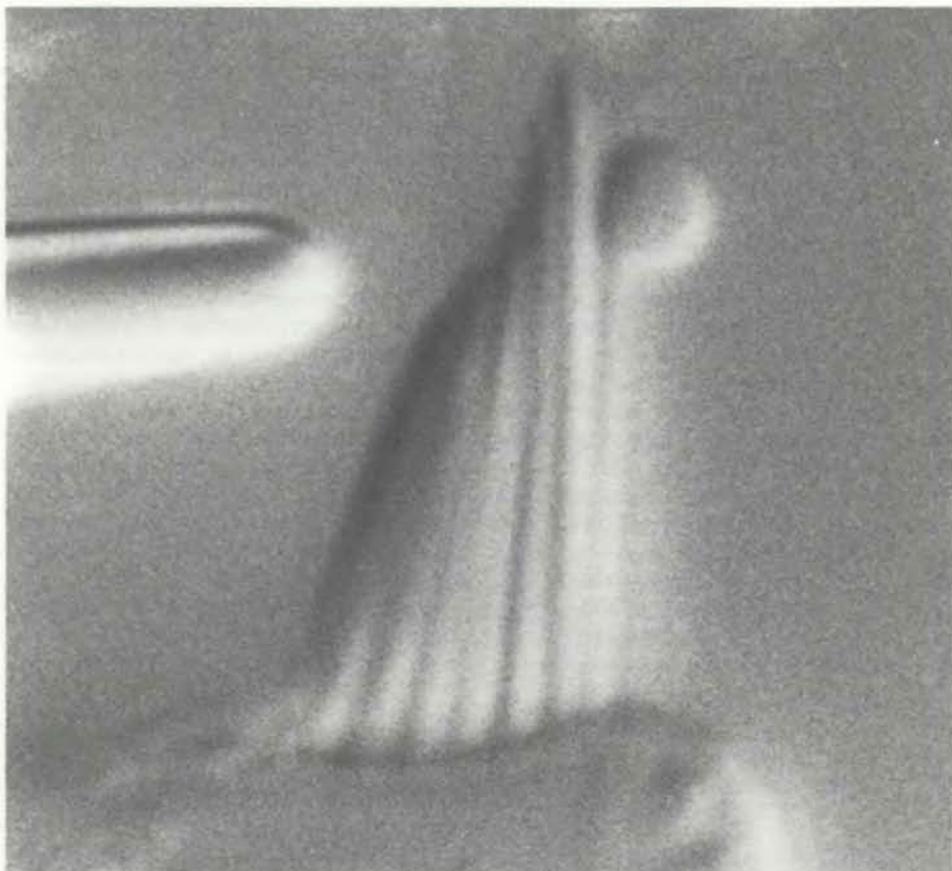
ки. Ион натрия имеет заряд $+1$. Поскольку концентрация натрия внутри клетки ниже, чем снаружи, внутриклеточная среда заряжена отрицательно по отношению к внешней среде. Разность потенциалов между клеткой и внеклеточной жидкостью называют мембранным потенциалом, так как она соответствует падению потенциала при переходе через мембрану. Когда клетка заряжена отрицательно, ее внутренняя среда должна притягивать положительно заряженные ионы. Если при этом каналы открыты, положительные ионы устремятся внутрь клетки и ее мембранный потенциал уменьшится.

КЛЕТочная мембрана благодаря описанным выше свойствам должна действовать как конденсатор, т.е. тонкая пластинка, разделяющая электрические заряды с противоположным знаком. Одно из свойств конденсатора — способность создавать разность потенциалов путем разделения очень небольших зарядов, причем переход даже нескольких заряженных частиц с одной стороны пластинки конденсатора на другую существенно меняет разность потенциалов.

Электрические свойства большинства нейронов находятся в зависимости только от одной внеклеточной жидкости. Соответственно клеточная мембрана этих клеток действует как одиночный конденсатор. В волосковой клетке ситуация сложнее. Как мы видели, волосковые клетки разделяют эндолимфу и перилимфу. Эндолимфа контактирует с апикальной поверхностью клетки, от которой отходит пучок волосков. Соотношение концентраций положительно и отрицательно заряженных ионов в эндолимфе и во внутриклеточной жидкости волосковых клеток одинаково: там много ионов калия и мало ионов натрия. Поэтому, если бы клетка соприкасалась только с эндолимфой, разность потенциалов на мембране не возникла бы.

Базальная поверхность клетки погружена в перилимфу, состав которой резко отличается от состава внутриклеточной жидкости. В частности, в перилимфе гораздо больше ионов натрия и гораздо меньше ионов калия. Если бы клетка соприкасалась только с перилимфой, ее потенциал был бы весьма значительным — на 90 мВ ниже, чем в перилимфе.

Свойствами конденсатора обладают как базальная, так и апикальная поверхность волосковой клетки. Общий мембранный потенциал клетки складывается из потенциалов апикальной и базальной мембран. Но доля их участия неодинакова. Каналы для ионов есть и в апикальной, и в базальной мембранах. В состоянии покоя (невозбужденном) открыты лишь немногие кана-



СТЕКЛЯННЫЙ МИКРОЗОНД. В своих экспериментах таким микрозондом автор статьи пользовался для смещения пучка волосковой клетки. *Вверху:* отдельная волосковая клетка из мешочка внутреннего уха американской лягушки-быка в состоянии покоя. *Внизу:* пучок волосковой клетки раздражают микрозондом. Отклонение пучка приводит к изменению электрической активности клетки, которую регистрируют с помощью микроэлектродов, введенного в клетку через ее апикальную поверхность (электрод не показан). Снимки получены методом дифференциальной интерференционно-контрастной микроскопии.

лы, через них внутрь клетки поступают положительно заряженные ионы, ток их постоянен, но невелик. В это время проницаемость базальной мембраны, зависящая от числа открытых ионных каналов, намного больше, чем проницаемость апикальной мембраны. Поэтому суммарный потенциал волосковой клетки ближе к значению -90 мВ, характерному для базальной мембраны, чем к нулю (потенциал апикальной мембраны равен нулю); он равен примерно -60 мВ.

Это значение, -60 мВ, регистрируется микроэлектродом в волосковой клетке, выделенной из мешочка внутреннего уха лягушки-быка. Если сместить зондом пучок волосков вдоль оси симметрии в сторону киноцилии, разность потенциалов на мембране снижается до -40 мВ. Уменьшение мембранного потенциала называется деполяризацией. При смещении волосков в противоположном направлении мембран-

ный потенциал, наоборот, возрастает от -60 до -65 мВ. Такое увеличение потенциала называется гиперполяризацией. Смещение волоскового пучка в любом направлении, перпендикулярном оси симметрии, не влечет за собой изменений мембранного потенциала.

ИТАК, волосковая клетка чувствительна к смещению пучка волосков вдоль оси симметрии пучка и совершенно нечувствительна к таким же смещениям вдоль перпендикулярных осей. Ответ клетки на смещение пучка волосков тем больше, чем ближе направление воздействия к оси симметрии пучка. Это согласуется с результатами, которые получили *in vitro* Отто Ловенштейн (Бирмингемский университет), а также Ян Верселл и Аки Флок (Королевская больница в Стокгольме). Каким-то образом волосковая клетка способна расчленять механическое воздействие на две составляющие, одна из

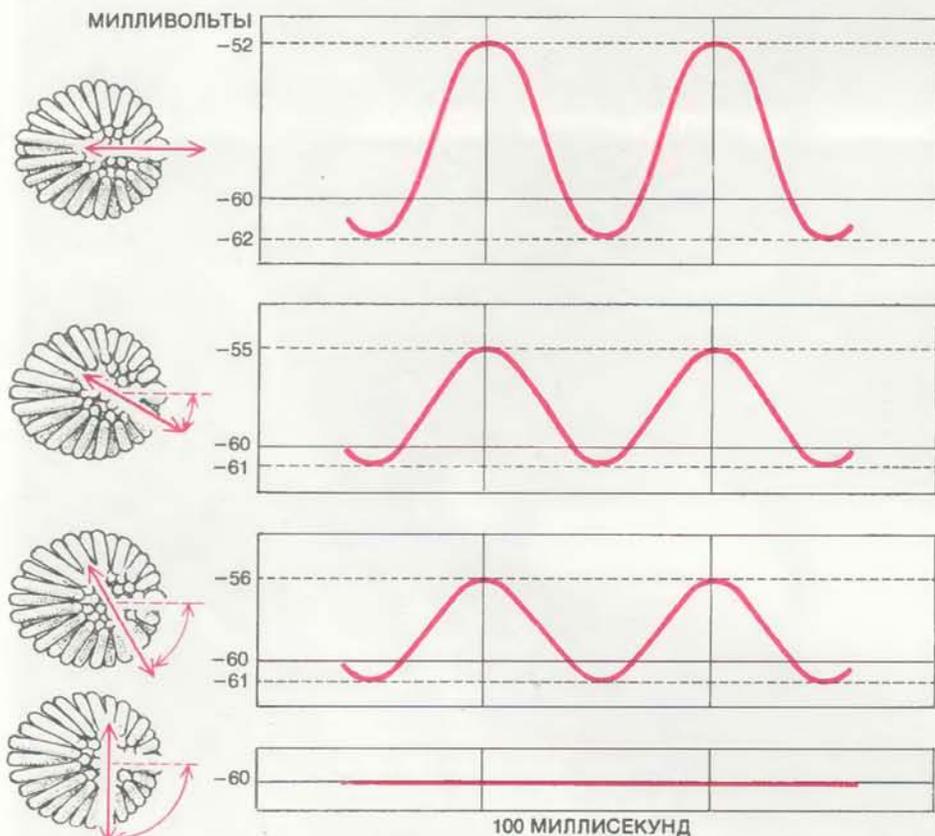
которых параллельна оси симметрии, а другая — перпендикулярна ей. В зависимости от направления первой составляющей клетка отвечает деполяризацией или, наоборот, гиперполяризацией, а на вторую составляющую клетки вообще не отвечает.

Чувствительность волосковой клетки к направлению раздражения имеет большое значение для восприятия. Если один отдельно взятый рецептор может дать информацию лишь об одной из составляющих стимула, то набор волосковых клеток с разной чувствительностью позволяет воспринимать ускорение в любом возможном направлении. Хотя приспособительный смысл чувствительности к направлению вполне понятен, ее механизм остается неизвестным.

Действительно, с точки зрения анатомии клетки и строения пучка волосков этот феномен — сплошная загадка. Каждая стереоцилия симметрична относительно своей длинной оси; казалось бы, отклонение ее в любом направлении должно приводить к одному и тому же результату. Киноцилия обладает двусторонней симметрией, как и весь пучок в целом. Однако киноцилия сама по себе не определяет направленного характера чувствительности. В самом деле, во время эмбрионального развития киноцилия в волосковых клетках улитки млекопитающих вообще исчезает. Более того, если удалить киноцилию из пучка волосковой клетки лягушки, ответ клетки не утрачивает направленного характера.

Есть три гипотезы, пытающиеся объяснить направленный характер реакции волосковой клетки на раздражение. Согласно одной из них, стереоцилия, возможно, имеет асимметрию, которую мы при нынешнем уровне электронной микроскопии просто не видим. С другой точки зрения чувствительность к направлению определяется не теми или иными компонентами пучка, а его организацией как целого. Наконец, не исключено, что дело вообще не в волосковом пучке, а в апикальной поверхности самой клетки.

Отсутствие данных о структурной основе чувствительности волосковой клетки к направлению раздражения не мешает изучать в ней электрические процессы. Как я уже говорил, мембранный потенциал волосковой клетки в покое равен -60 мВ, он определяется соотношением проницаемостей апикальной и базальной мембран. Можно предположить, что, если повлиять на мембранную проницаемость в апикальной или базальной частях клетки, потенциал изменится. Действительно, меняя проницаемость клетки различными искусственными воздействиями, можно вызывать как гиперполяризацию, так и деполяризацию мембраны; причем для этого надо воздействовать



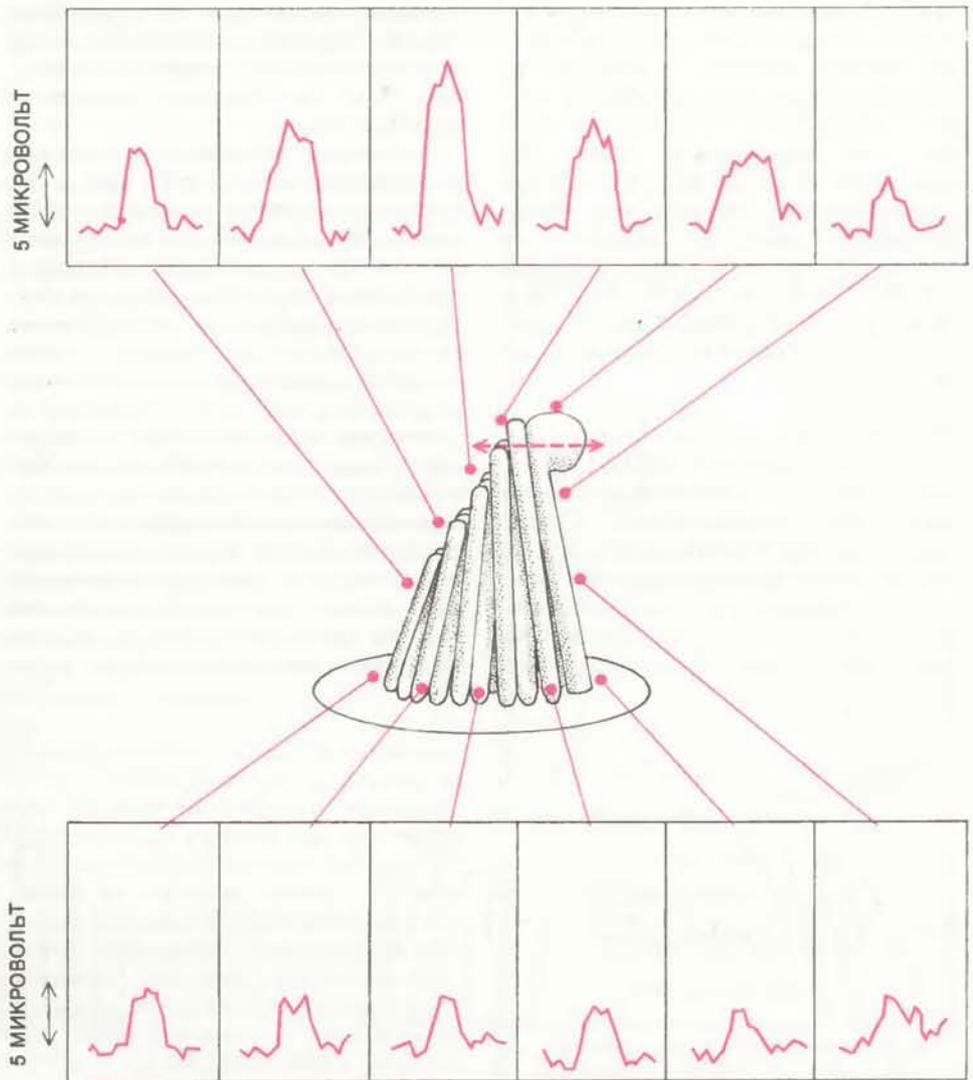
НАПРАВЛЕНИЕ, в котором чувствительна волосковая клетка, можно определить по записям электрической активности. Ее регистрируют с помощью электрода, введенного в отдельную волосковую клетку из мешочка внутреннего уха лягушки-быка. Представлены данные С. Шотвелл, которые она получила, работая в лаборатории автора статьи. Когда волосковая клетка находится в состоянии покоя, ее электрический потенциал -60 мВ по отношению к окружающей внеклеточной жидкости. Если пучок волосков сместить в сторону киноцилии вдоль оси симметрии пучка, потенциал падает до -52 мВ (*вверху*). Если пучок сместить вдоль той же оси, но в противоположном направлении, то потенциал возрастает до -62 мВ. Если направление смещения не совпадает с осью симметрии, ответ клетки слабее (*в центре*). На воздействия, перпендикулярные оси симметрии, клетка вообще не реагирует (*внизу*).

только на одну сторону клетки — либо на апикальную мембрану, либо на базальную, — не затрагивая другую.

Результаты моих опытов, так же как и работы других исследователей, указывают на то, что описанная выше картина изменений мембранного потенциала волосковой клетки в целом верна. В состоянии покоя определенное число ионных каналов открыто, причем в базальной части мембраны открытых каналов больше. При движении верхушки пучка волосковой клетки вдоль оси симметрии в направлении киноцилии в апикальной мембране открываются дополнительные каналы. Через эти каналы из внеклеточной среды внутрь отрицательно заряженной клетки устремляются положительно заряженные ионы. Возрастает вклад апикальной мембраны в суммарный потенциал клетки, который падает до -40 мВ. Если же пучок перемещается от киноцилии, ионные каналы апикальной области, открытые в состоянии покоя, тотчас закрываются. Соответственно вклад апикальной мембраны в потенциал уменьшается, и потенциал возрастает до -65 мВ.

Селективность ионных каналов-«преобразователей» в апикальной зоне клеточной мембраны, ответственных за описанный процесс смены потенциала, по-видимому, не очень велика. Когда они открыты, большая часть положительно заряженных частиц, размер которых не превышает $0,6$ нм, беспрепятственно проникает в клетку. Но поскольку основным положительно заряженным ионом эндолимфы является калий, именно его ионы в первую очередь переносят электрический заряд через мембрану. Эксперименты, в которых ионы калия в эндолимфе заменяли на другие положительно заряженные ионы, показали, что, хотя они и могут переносить электрический заряд, в интактной волосковой клетке эту роль выполняет преимущественно калий.

Поскольку молекулы, обеспечивающие перетекание электрического заряда через мембрану, пока что окончательно не идентифицированы, трудно определить и локализацию каналов-«преобразователей». Кое-что, однако, указывает, где именно они находятся. Когда ионные каналы открыты, в окружающей клетку жидкой среде имеются несильные электрические токи. С помощью электрода можно зарегистрировать такой слабый ток вокруг двигающегося пучка волосковой клетки. Этот ток максимален вблизи верхушки пучка, у концов стереоцилий. Можно предположить, что каналы открываются не у основания ресничек, а где-то вблизи их кончиков, возможно там, где они смыкаются друг с другом. Конечно, это лишь предположение, которое нуждается в проверке.



ЛОКАЛИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ТОКОВ, возникающих в жидкости вокруг волосковой клетки, свидетельствует о том, что ионные каналы, опосредующие электрический потенциал волосковой клетки, находятся вблизи верхушки пучка волосков. Электрический потенциал волосковой клетки изменяется в результате перетекания положительно заряженных ионов из эндолимфы внутрь клетки: их притягивает отрицательно заряженная внутриклеточная жидкость. Основной положительно заряженный ион — ион калия. Перемещение ионов калия (и, следовательно, потенциал клетки-рецептора) регулируется открыванием и закрыванием каналов-«преобразователей» в клеточной мембране. Когда они открываются и ионы калия устремляются внутрь клетки, в эндолимфе вблизи каналов возникают слабые электрические токи. На рисунке приведены результаты измерения напряжения, создаваемого этими токами в различных точках вокруг пучка волосков. Максимальная зарегистрированная величина — 13 мкВ. Вблизи верхушки пучка токи наиболее сильны, значит, ионные каналы-«преобразователи» находятся именно там

Запись электрической активности волосковой клетки показывает, что она отвечает на раздражение очень быстро. Органы слуха таких позвоночных, как летучие мыши и китообразные, улавливают звуки частотой до 100 кГц. Следовательно, скорость преобразования механического раздражения в электрический сигнал очень велика. Это подтверждается данными об активности изолированных волосковых клеток. В обычных условиях волосковые клетки внутреннего уха лягушки-быка реагируют на звуки частотой не более 3 кГц, но время ответа составляет десятые доли микросекунды. Таким обра-

зом, открывание ионных каналов-«преобразователей», т.е. первый этап реакции, занимает не больше времени, чем, например, действие фермента или другие процессы на молекулярном уровне. Значит, вряд ли есть какие-либо промежуточные этапы между механическим смещением пучка и началом электрического ответа клетки; поэтому можно считать, что механическое воздействие прямо влияет на состояние ионных каналов-«преобразователей».

Совершенно ничтожных отклонений пучка достаточно, чтобы заставить волосковую клетку реагировать. Для волосковых клеток ящериц и черепах рас-

стояние, на которое необходимо отклонить волоски для получения ответной реакции, оценивают в 340 мкм. Порог раздражения для волосковых клеток улитки млекопитающих еще меньше — 100 мкм. Судя по данным об электрической активности волосковых клеток мешочка лягушки, весь диапазон реакций рецептора приходится на отклонения пучка в пределах примерно 0,5 мкм. Длина пучка волосковой клетки из мешочка лягушки-быка 8,2 мкм, стало быть угловое отклонение пучка не превышает 3°.

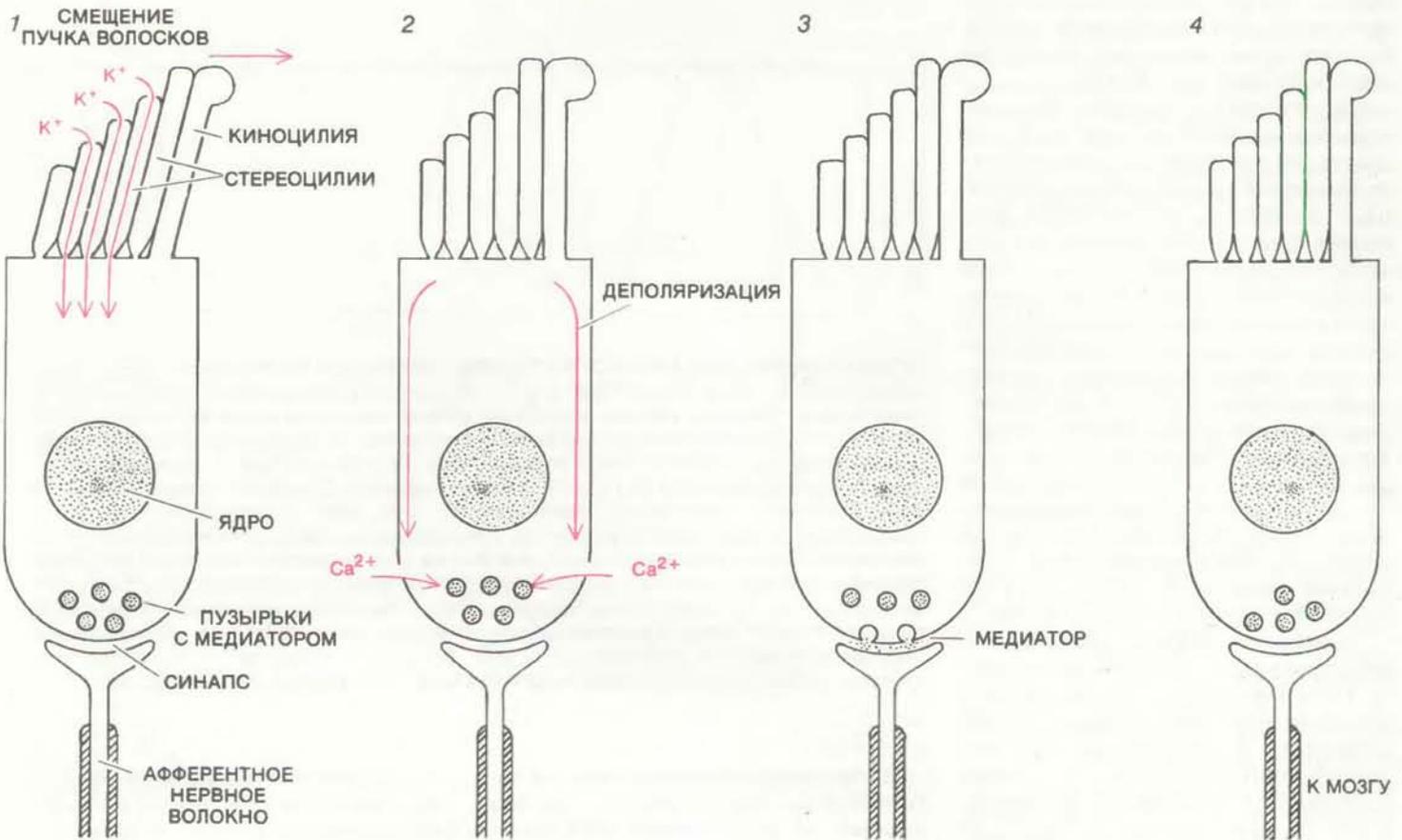
ВЕСЬМА вероятно, что длительные воздействия, например большие ускорения, могут отклонять стереоцилии значительно сильнее чем на 3°. Тогда клетка должна отвечать на раздражение долгим и сильным сигналом. Если затем интенсивность стимула несколько изменится, это уже не повлияет на силу ответа. Такая ситуация была бы,

очевидно, невыгодна для организма, так как небольшие изменения во внешней среде зачастую важнее для поведения, чем сильное, но постоянное воздействие.

В опытах с волосковыми клетками из мешочка лягушки-быка такого насыщения чувствительности не наблюдалось. В состоянии покоя изолированная клетка наиболее чувствительна к смещению волосков на несколько десятых долей микрометра в том или ином направлении. Когда же пучок волосков надолго перемещали в другое положение, скажем, на 1 мкм от исходного, просто сильного постоянного возбуждения рецептора не наблюдалось. Через несколько десятых долей секунды ответ на перемещение пучка на 1 мкм угасал и клетка вновь становилась чувствительной к небольшим отклонениям пучка от этой новой точки покоя. Как это происходит, пока не ясно, но адаптивное значение очевидно: орга-

низм получает возможность игнорировать сильные постоянные стимулы, полностью сохраняя способность реагировать на более важные небольшие краткие раздражения.

Интерес исследователей к волосковым клеткам вполне понятен: каков должен быть молекулярный механизм, способный обеспечить реакцию на стимулы с пикометровой амплитудой и частотой до 100000 Гц! В этой связи особое внимание в моей лаборатории в Калифорнийском технологическом институте, а также в некоторых других лабораториях привлекают ионные каналы-«преобразователи». Весьма правдоподобна гипотеза, согласно которой эти каналы открываются и закрываются вследствие хаотического теплового движения лежащих рядом молекул. Если это так, то доля каналов, открытых в данный момент, должна зависеть от разницы между энергетическими уровнями закрытых и от-



РЕАКЦИЯ ВОЛОСКОВОЙ КЛЕТКИ завершается передачей электрического сигнала в мозг по афферентному нервному волокну, окончание которого подходит к базальной мембране волосковой клетки. Когда пучок волосковой клетки отклоняется, открываются каналы-«преобразователи» (1). Ионы калия переходят внутрь клетки, и разность потенциалов между клеткой и окружающей жидкостью уменьшается. Падение потенциала (деполяризация) моментально распространяется по всей клетке (2). В нижней части клетки есть каналы, избирательно пропускающие ионы кальция. При деполяризации они открываются, и кальций попадает

внутри клетки. В основании клетки имеются микропузырьки, содержащие медиатор — вещество, предназначенное для передачи нервного импульса от одной клетки к другой. Ионы кальция вызывают слияние микропузырьков с клеточной мембраной, медиатор выходит наружу (3). Медиатор (химическая природа его пока неизвестна) диффундирует через синаптическую щель — пространство между волосковой клеткой и окончанием нейрона, — вызывая возбуждение последнего. Нейрон в свою очередь посылает сигнал в мозг по нервному волокну, входящему в состав восьмого черепно-мозгового нерва (4).

крытых каналов. Когда эта разница превышает среднюю кинетическую энергию столкновений с окружающими молекулами, каналы будут открываться редко и в любой момент большая часть их будет оставаться закрытой. Когда же энергетические уровни закрытых и открытых ионных каналов примерно одинаковы, то около половины их должно оставаться постоянно открытыми.

Предположим, что исходный энергетический уровень открытых каналов в апикальной мембране волосковой клетки относительно высок. Тогда большая часть каналов должна быть закрыта. Если смещение пучка волосков каким-то образом снижает энергию открытого канала, то доля открытых ионных каналов быстро увеличится под влиянием теплового движения окружающих молекул. Записи электрической активности волосковых клеток, в целом подтверждающие такое развитие событий, получил в моей лаборатории Дэвид Кори, который был в то время аспирантом Медицинской школы Йельского университета. Однако основной вопрос — каким образом движение волоскового пучка меняет энергетический уровень ионного канала — остается пока без ответа.

ИТАК, мы познакомились с современным состоянием знаний о механизме преобразования механической энергии в электрическую в волосковой клетке. Естественно, возникает вопрос, каким образом вследствие изменения мембранного потенциала информация передается в мозг. Поскольку у волосковых клеток нет аксонов, они не могут делать это сами. Возникающие сигналы передаются специальными нейронами, окончания которых находятся вблизи базальной поверхности клеток-рецепторов. Когда каналы-«преобразователи» волосковой клетки открываются, изменение потенциала очень быстро распространяется по всей ее мембране. В мембране базальной части клетки имеется много каналов, избирательно пропускающих ионы кальция. Состояние кальциевых каналов зависит от потенциала: при деполяризации они открываются.

Попав внутрь клетки, ионы кальция запускают другой важный процесс. Вблизи основания волосковой клетки расположено множество мельчайших пузырьков, содержащих химическое вещество со свойствами медиатора. Под действием ионов кальция эти пузырьки сливаются с наружной мембраной клетки и их содержимое попадает в синаптическую щель — просвет между волосковой клеткой и нервным окончанием.

Точный химический состав медиатора пока неизвестен. Молекулы медиатора, излившегося из микропузырьков,

диффундируют через синаптическую щель — ее ширина примерно 20 нм. Соединяясь с рецепторами на мембране нервного окончания, медиатор вызывает деполяризацию нейрона, очень похожую на деполяризацию волосковой клетки. В теле нейрона вследствие деполяризации возникают потенциалы (один или несколько), которые распространяются по аксону.

Гиперполяризация волосковой клетки имеет противоположный эффект. Даже в состоянии покоя некоторое число кальциевых каналов базальной мембраны открыто, поэтому через синапс постоянно диффундирует небольшое количество медиатора и в мозг непрерывно поступают слабые сигналы. При гиперполяризации кальциевые каналы закрываются, соответственно в синапс попадает меньше медиатора. Частота возникновения потенциалов действия уменьшается, а это для нервной системы также является информативным сигналом.

ИНФОРМАЦИЯ от всех волосковых клеток внутреннего уха поступает в мозг по аксонам восьмого черепного нерва. Каждое нервное волокно нерва несет сигналы от волосковых клеток одного из отделов органа. Причем каждое волокно предназначено для передачи совершенно определенной информации. Например, нервное волокно, идущее от одного полукружного канала, несет сигналы от волосковых клеток, воспринимающих угловое ускорение только вокруг какой-то одной оси и только при поворотах головы по часовой стрелке.

Импульсы идут по нервным волокнам не только от волосковых клеток к мозгу, но и в обратном направлении. Вблизи основания нервной клетки оканчиваются как афферентные волокна, служащие для передачи информации в мозг, так и эфферентные, передающие ее от мозга к волосковым клеткам. Когда возбуждаются эфферентные нервные волокна, волосковые клетки улитки становятся менее восприимчивыми к звуку. Кроме того, уменьшается их частотная избирательность. Смысл такого снижения чувствительности пока неясен. Это еще одна из неразгаданных загадок. Волосковые клетки сейчас интенсивно изучают во многих лабораториях, и можно надеяться, что в ближайшие годы мы получим ответы на многие вопросы, прежде всего на главный из них — о природе механизма преобразования энергии. Я думаю тем не менее, что наш интерес к внутреннему уху, этой маленькой части сложного аппарата живого организма, восхищение необычайной чувствительностью и слаженностью ее работы нисколько не уменьшатся.

Издательство
МИР
предлагает:

Р. Шрайнер
Р. Фьюзон
Д. Кёртин
Т. Моррилл

**Идентификация
органических
соединений**



*Р. Шрайнер, Р. Фьюзон,
Д. Кёртин и др.*

**ИДЕНТИФИКАЦИЯ
ОРГАНИЧЕСКИХ
СОЕДИНЕНИЙ**

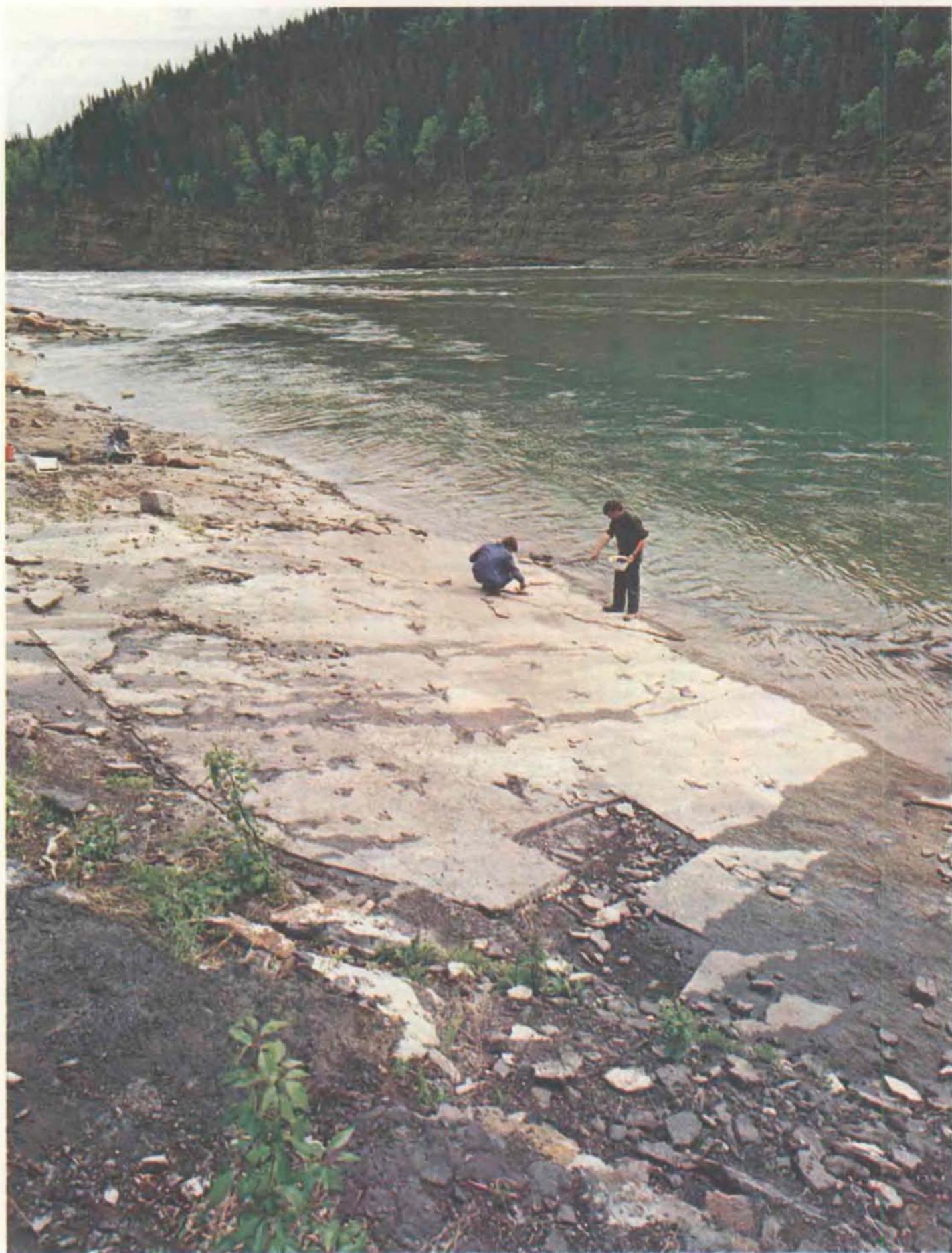
Перевод с английского

Предлагаемое вниманию читателей руководство издается за рубежом с 1935 г.; каждый выпуск его реализует те возможности, которые создаются в результате развития методов исследования органических соединений на данном этапе. Настоящее издание — шестое. В нем отражены все современные достижения в области исследования органических соединений; методы УФ-, ИК-, ЯМР-спектроскопии, масс-спектрометрии и различные типы хроматографии широко представлены наряду с традиционными методами исследования.

Книга может быть рекомендована как очень полезный справочник в повседневной работе любой лаборатории органического синтеза, как учебное руководство для студентов и преподавателей химических вузов.

1983, 50 л. Цена 3р.





СКОПЛЕНИЕ ОКАМЕНЕЛЫХ ОТПЕЧАТКОВ в долине реки Пис в районе строительства плотины в Британской Колумбии (Канада). Следы динозавров сохранились в отложениях раннего мела. На переднем плане — прямоугольный пласт с

отпечатками. На заднем плане — исследователи из Музея естественной истории в Альберте делают слепки с других следов. В карьере протяженностью 4 мили было найдено 1700 отпечатков ног динозавров по крайней мере 10 видов.

Следы вымерших животных

Следы позвоночных животных встречаются в отложениях со времени выхода их на сушу 370 миллионов лет назад. Большинство вымерших животных вообще известны нам только по оставленным ими следам

ДЭВИД ДЖ. МОССМАН И УИЛЬЯМ А. С. САРДЖЕНТ

В МУЗЕЯХ вымершие животные представлены обычно скелетами или отдельными костями, и может сложиться впечатление, что кости — главное доказательство их существования. Однако это не так. Кости животных встречаются гораздо реже, чем их следы. Многие вымершие наземные животные известны нам только по оставленным ими следам, останки же их не сохранились. В Англии, например, в отложениях среднего (Вустершир) и позднего (Ноттингемшир) триаса, которые относятся к мезозойской эпохе рептилий, окаменелости позвоночных не встречаются. Однако в тех же отложениях остались следы, доказывающие, что на территории Вустершира обитали рептилии по меньшей мере восьми видов, а на территории Ноттингемшира — еще шести видов.

Именно по следам мы узнали о тех позвоночных, которые первыми вышли на сушу. На Оркнейских островах в "красных слоях" — формации древнего красного песчаника, образовавшегося в девонское время 370 — 360 млн. лет назад, обнаружены следы древних рыб. Подобно современным двоякодышущим, те рыбы всецело зависели от сезонной засухи. Переползая на брюхе при помощи коротких мясистых плавников-лопастей из одного водоема в другой, они оставляли на песке свои следы.

Для нас девонский период — бесконечно далекая древность. Если же исходить из абсолютной временной шкалы истории Земли, кистеперые жили не так уж давно. Представьте, что 4,5 млрд. лет, прошедшие с момента образования Земли, — это один год, каждый день которого продолжался 12,3 млн. лет. Тогда первые формы жизни — примитивные растения, похожие на современные одноклеточные водоросли — возникли в морях нашей планеты приблизительно в начале мая. Что касается многоклеточных форм, то они появились не раньше начала ноября.

Примерно к 20 ноября в воде уже плавали первые рыбы. К концу ноября их потомки осмелились выбраться на сушу. К 7 декабря главными обитателями суши стали рептилии, а к середи-

не декабря заявили о себе первые млекопитающие. Около пяти часов вечера 31 декабря два древнейших представителя семейства гоминидов оставили свои следы в свежем вулканическом пепле на равнине Лаэтоли в Кении. Род *Homo* явился на свет всего лишь за час до полуночи — около 500 тыс. лет назад. Стало быть, вся история наземных позвоночных длится меньше шести недель в "году" истории Земли, так что эти 360 млн. лет, заполненные такими важными событиями, — всего лишь малая часть истории существования нашей планеты.

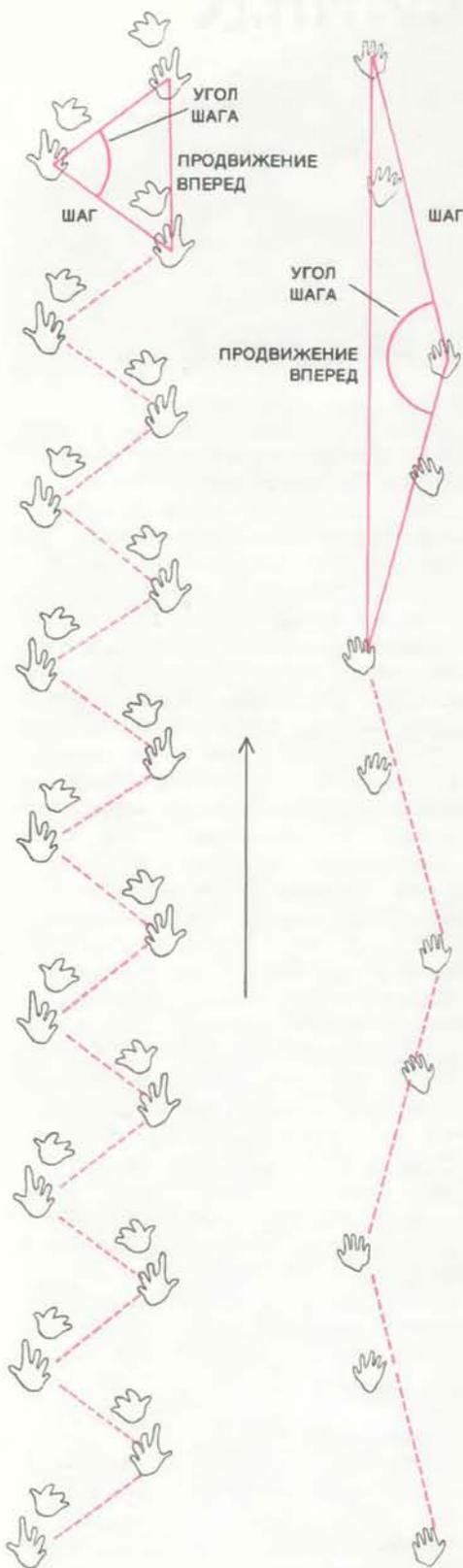
Что можно найти в земле

ЗА ВРЕМЯ существования позвоночных накопилось немало данных, с помощью которых палеонтологи составляют картину жизни животных прошлого. Эти данные можно разделить на две группы. Во-первых, останки животных (окаменевшие кости, цельные либо частично сохранившиеся, соединенные друг с другом или одиночные; зубы, чешуя, перья, иногда окаменелые куски кожи либо другого покрова). По ним можно достаточно точно реконструировать внешний вид животного и установить, как оно передвигалось и чем питалось. Не будем, однако, забывать, что у животного лишь одна телесная оболочка, поэтому если от нее что-то и осталось, то только в единственном конкретном месте. Во-вторых, важный источник информации — следы животных (встречаются и цепочки следов). Такого рода находки попадают чаще, ведь одна и та же особь может оставить много следов. По следам палеонтологам удается представить поведение животных.

От кистеперых рыб, которые первыми вышли на сушу в девонскую эпоху, произошли амфибии — животные с четырьмя конечностями. С точки зрения эволюции, переход совершился быстро: следы первых амфибий обнаруживаются уже в отложениях позднего девона. Следы амфибий легко распознать по широкой постановке конечностей и короткому шагу — характерным чертам еще несовершенного передвижения на четырех ногах. Лапы

всегда отпечатаны очень четко, значит, амфибии передвигались медленно; пальцы без когтей, широко растопырены и обращены более вбок, нежели вперед. Множество следов амфибий сохранилось в слоях каменноугольного периода, следующего за девонским. В пермский период (280 — 225 млн. лет назад) их уже меньше, а в более поздних слоях совсем мало — в основном потому, что выжившие виды амфибий предпочитали, как и теперь, влажные местообитания, а там следы сохраняются плохо. В отложениях конца каменноугольного периода появляются следы пресмыкающихся. Рептилий становилось все больше, о чем красноречиво свидетельствуют их следы — в пермских отложениях они попадаются все чаще и чаще. Локомоция рептилий была более совершенной. Изменилась форма пальцев, появились когти и короткий пятый отросток, напоминающий большой палец. У некоторых рептилий шаг становится уже и длиннее. Животные стали передвигаться быстрее, но ступали по-прежнему четырьмя конечностями поочередно. Судя по следам, к концу пермского периода многие мелкие рептилии при медленном передвижении переступали четырьмя конечностями, а при необходимости двигаться быстро переходили на две. Когда животное двигалось на двух ногах, его туловище опиралось на задние ноги, длинный хвост уравнивал передние ноги и почти прямо стоящий корпус.

Это была та ветвь рептилий, которая в начале мезозойской эры, 225 млн. лет назад, дала начало динозаврам. Многие динозавры триасовой формации ходили на двух ногах постоянно либо большую часть времени. Даже у тех рептилий, которые вторично вернулись к передвижению на четырех конечностях, заметна диспропорция между передними и задними ногами. Туловище по-прежнему опиралось на таз, задние ноги обычно были гораздо массивнее передних. Из всех ископаемых животных динозавры оставили больше всего следов: они обнаруживаются во множестве в мезозойских отложениях практически во всех частях света.



ПРОМЕРЫ ЦЕПОЧКИ СЛЕДОВ. Слева: широкая цепочка, характерная для амфибий. Цветной треугольник почти равносторонний, следовательно, продвижение животного вперед и его шаг были невелики. Справа: более узкая цепочка следов, характерная для рептилий. Продвижение и шаг у динозавра намного больше, чем у амфибии, значит, его локомоция совершеннее.

Со временем в двух группах небольших динозавров развились крылья. У птерозавров были развиты кожные складки между телом и вытянутым четвертым пальцем передней конечности; благодаря этим перепонкам они могли планировать. У. Л. Стокс из Университета Юты обнаружил окаменелые следы этих летающих рептилий в отложениях формации Моррисон поздней юры, в шт. Аризона. По следам ясно, что животные могли не только парить в воздухе, но и легко передвигаться на всех четырех конечностях, перепонка (крылья) при этом волочилась по земле. Другие рептилии приспособились к полетам иначе: у них чешуйчатый покров тела видоизменился в перья, что открывало большие возможности для летания. Задние конечности изменились не сразу, но через некоторое время появились и типично птичьи следы. Особенно четкие, прекрасно сохранившиеся следы древних птиц нашел в отложениях мелового периода в восточной части Британской Колумбии Ф. Карри из Тирреллского музея палеонтологии в Драмхеллере (провинция Альберта, Канада).

Не все мезозойские рептилии стали ходить на двух ногах. Синапсиды (Synapsida) так и остались четвероногими, эта ветвь рептилий развивалась обособленно от динозавров. Однако и у синапсид шаг удлинился и стал уже, а пальцы развернулись вперед, что характерно для более эффективного и быстрого передвижения. Ноги у синапсид по строению приобретали все большее сходство с ногами млекопитающих. В отложениях позднего триаса и ранней юры в шт. Сан-Паулу (Бразилия) палеонтолог Дж. Леонарди обнаружил множество следов, по виду которых трудно было сказать, принадлежали ли они рептилиям или млекопитающим.

В конце мезозойской эры следы динозавров исчезают из геологической летописи. Начало кайнозойской эры (65 млн. лет назад) ознаменовано появлением разнообразных следов млекопитающих, что говорит о расцвете этой прогрессивной группы позвоночных. Многообразие млекопитающих — одно из важнейших эволюционных событий третичного периода, первого и самого длинного отрезка кайнозоя. Вполне закономерно, что в Лазтоли в отложениях следующего периода, четвертичного, среди следов млекопитающих обнаружили следы двуногих предков человека.

История открытий

КАКОЙ ОНА БЫЛА, первая документально зарегистрированная находка окаменелых следов позвоночного жи-

вотного? Можно думать, что первые следы нашли в Европе. На самом деле произошло это в долине реки Коннектикут неподалеку от Саут-Халли (шт. Массачусетс), где на поверхность выходят «красные слои» — порода красного песчаника, образовавшегося в конце триасового — начале юрского периода. В 1802 г. сын местного фермера Плиний Муди обнаружил следы небольшого динозавра. Поскольку не знали, отпечатки приняли за следы огромных птиц. Поговаривали, что следы эти оставил ворон с Ноева ковчега.

Четверть века прошло, прежде чем появилось первое научное описание следов ископаемых животных. Следы были обнаружены в «красных слоях» Шотландии. Возраст геологической формации установить тогда не удалось, но сейчас нам известно, что эти отложения относятся к концу палеозойской эры. Следы нашел натуралист-любитель — местный священник Генри Дункан. В 1828 г. он опубликовал описание своей находки, его статья произвела сенсацию в научном мире.

Следы, которые нашел Дункан, принадлежали животному с коротким шагом и широко расставленными ногами — так называемому казеазавру, представителю большой группы крупных травоядных рептилий. Подобно тому как следы в долине реки Коннектикут назвали вороньями, следы казеазавра приняли за черепахи. Узнав об открытии Дункана, видный английский геолог Уильям Бакленд решил проверить гипотезу о черепахах. Вот как описал Джон Муррей-третий, известный издатель, опыт Бакленда.

«В прошлую субботу я отправился провести вечер к Марчисону, где все собрались посмотреть, как черепахи будут ходить по тесту. Профессор Бакленд был за церемониймейстера. Там были и другие геологи и прочие ученые, среди них доктор Уолластон. Поначалу животные запрямылись и не хотели трогаться с места. Профессору пришлось призвать на помощь всю свою изобретательность. Он принял ся щелкать их по хвосту, а те ни в какую. Впрочем, ничего удивительного: когда черепахи попытались вытащить, оказалось, что они совершенно увязли в тесте и на каждую лапку налипло по целому кому, а тесто вдобавок совсем засохло. Пришлось замесить и раскатать тесто заново. Надо сказать, что ученая братия не гнушалась стряпни! Истинным наслаждением было наблюдать, как все эти философы, перепачканные мукой, самозабвенно трудятся с засученными рукавами. Рад сообщить, что их бурная деятельность увенчалась успехом: тесто замесили как надо, и черепахи проковыляли по нему в лучшем виде. Демонстрация настолько удалась, что по завершении эксперимента

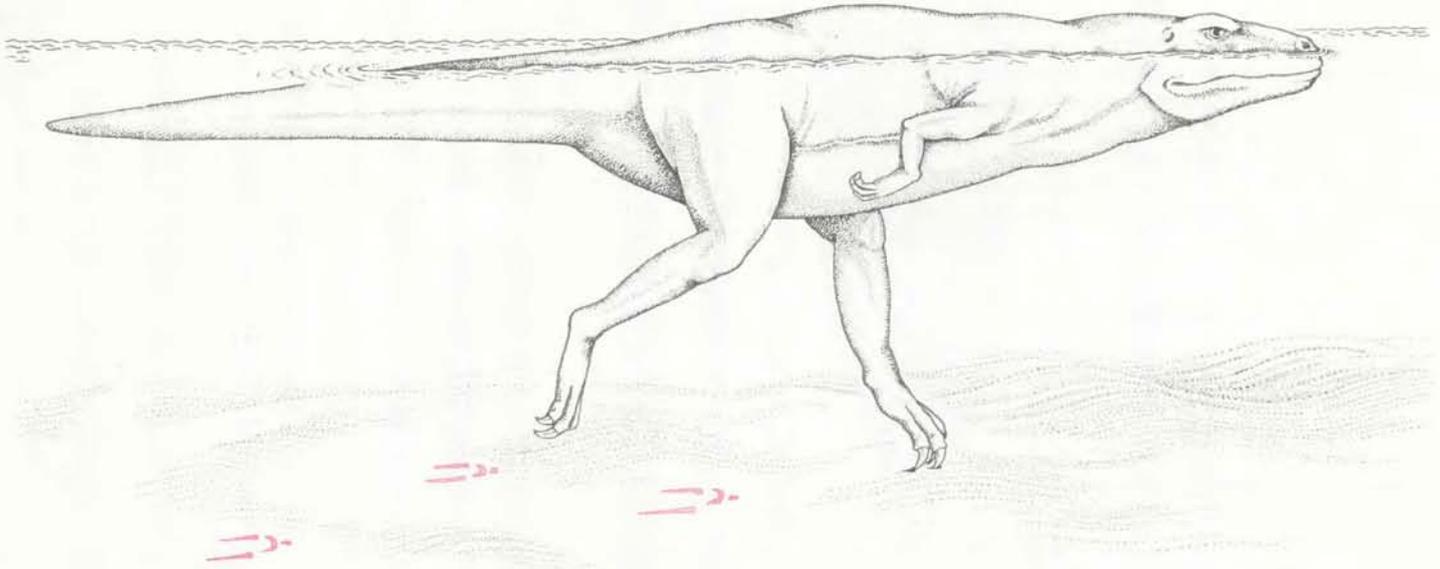
многие скептики склонны были поверить в выдвинутую гипотезу».

После открытия Дункана стали появляться все новые и новые сообщения о следах, однако далеко не все находки принимались на веру. Например, в 1841 г. на побережье южнее Хортон-Блаф (провинция Новая Шотландия, Канада) путешественник Уильям Ло-

ган нашел кусок осадочной породы с хорошо сохранившимися следами позвоночного животного. Порода относилась к каменноугольному периоду, то есть ко времени, когда, по бытовавшему в то время мнению, никаких позвоночных, кроме рыб, существовать не могло. Когда, вернувшись в Англию, Логан представил свою находку

в Геологическое общество, ему никто не поверил.

Лишь в 1872 г. открытие Логана было признано. В тот год Джон Д. Доусон вместе с известнейшим геологом сэром Чарлзом Лайелем исследовал каменноугольные слои на восточном побережье залива Фанди. В эти слои входили залежи угля близ Джоггинса



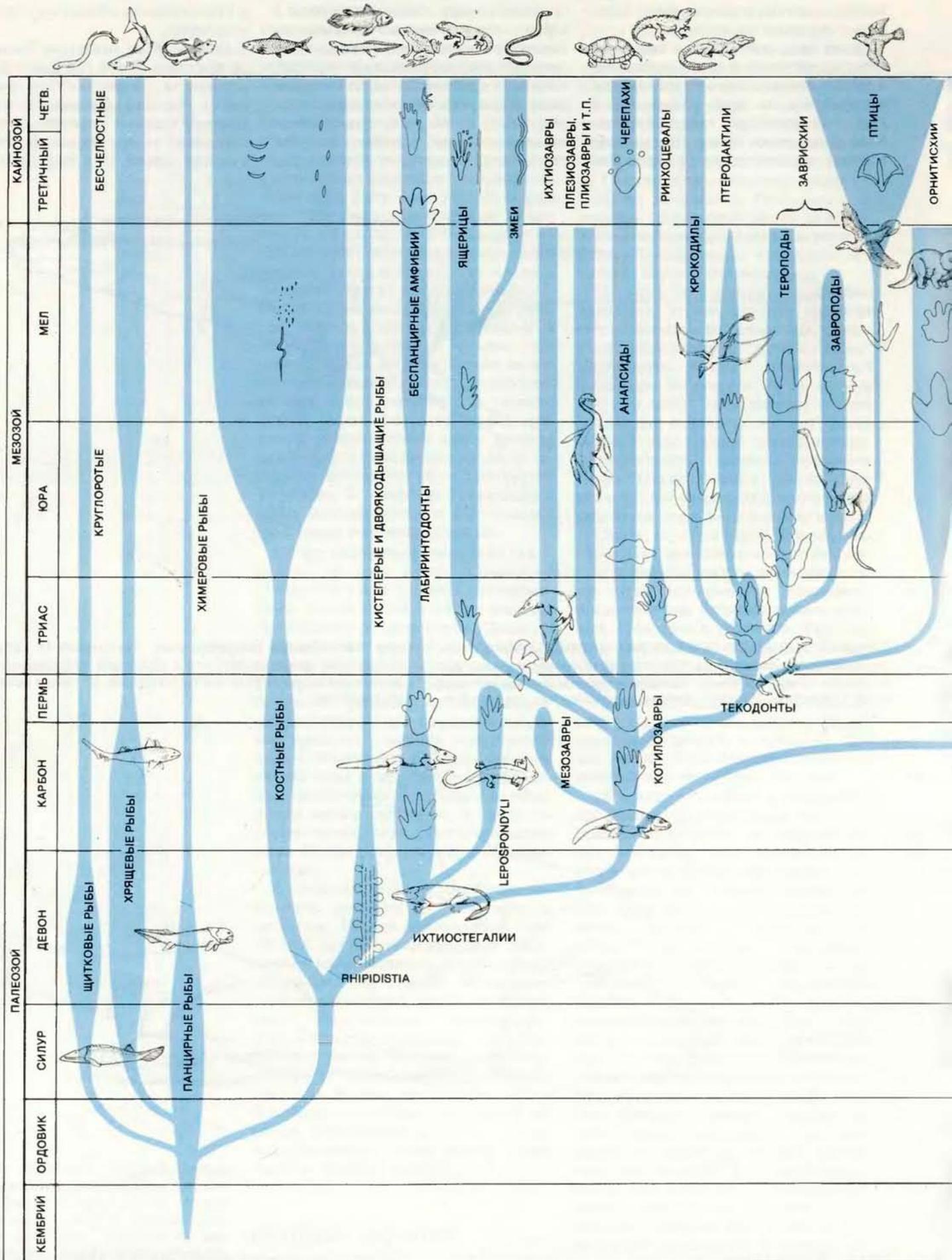
СЛЕДЫ ПЛЫВУЩЕГО ПЛОТЯДНОГО ДИНОЗАВРА в отложениях юрского периода. Четко отпечатались пальцы ног и когти, следовательно, животное не наступало на дно всей тяжестью. Рисунок сверху выполнен по реконструк-

ции мегалозавра (*Megalosaurus*), сделанной М. Хайменом. Эти следы доказывают, что в водоемах травоядные динозавры никак не могли найти спасение от своих естественных врагов.



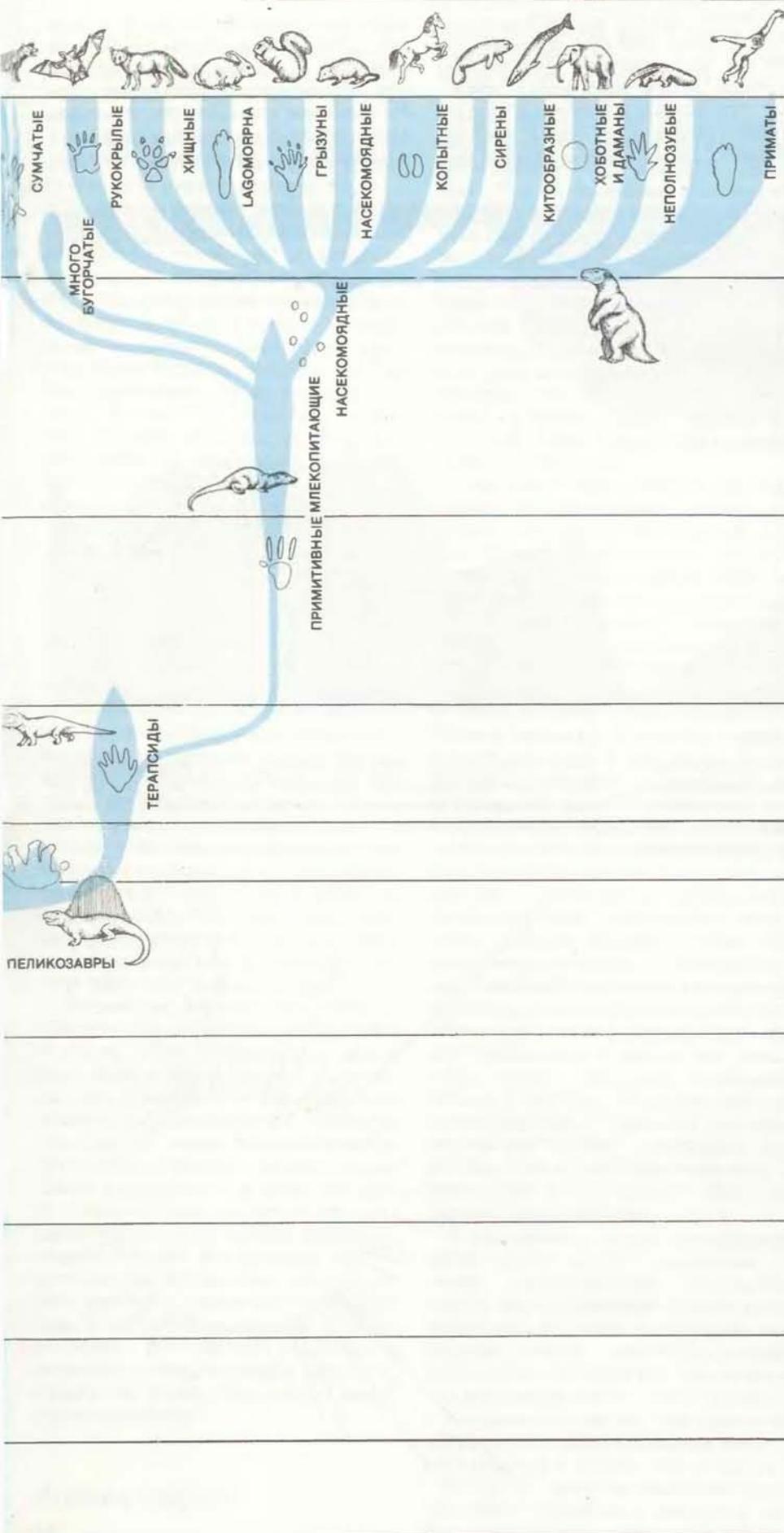
СЛЕДЫ ДИНОЗАВРОВ, обнаруженные в раннеюрских "красных слоях" в долине реки Коннектикут. Эти животные были двуногими (слева), но иногда ходили и на четырех конечностях (справа). Следы принадлежат одному из тех много-

численных вымерших видов рептилий, которые нам известны только по следам. Р. Лалл из Йельского университета реконструировал по следам внешний вид животного. Это травоядное, один из первых орнитоподов (*Ornithopoda*).



ЭВОЛЮЦИЯ ПОЗВОНОЧНЫХ. Немало следов, в том числе следы древнейшего наземного животного — кистеперой

рыбы, сохранилось в среднедевонских "красных слоях" на Оркнейских островах (пятая дорожка слева). В более по-



в этих слоях встречаются отпечатки амфибий, затем рептилий, птиц и, наконец, млекопитающих. Последние отпечатки (крайняя правая дорожка) принадлежат представителю семейства гоминидов, следы которого найдены в Кении.

(Новая Шотландия), в которых сохранились окаменелые прямостоящие пни. Доусон полагал, что в полостях пней могут быть останки небольших амфибий и рептилий. Действительно, там нашли останки рептилий. Вероятно, животные застряли там, как в ловушке, когда забрались внутрь в поисках воды или насекомых. Так или иначе, стало ясно, что в каменноугольный период жили не только рыбы, но и наземные позвоночные.

Логану и Доусону суждено было возглавить канадскую науку. Логан стал первым директором Института геологических исследований в Канаде, а Доусон — ректором Макгиллского университета. Впоследствии и того и другого произвели в рыцари.

Интерес падает

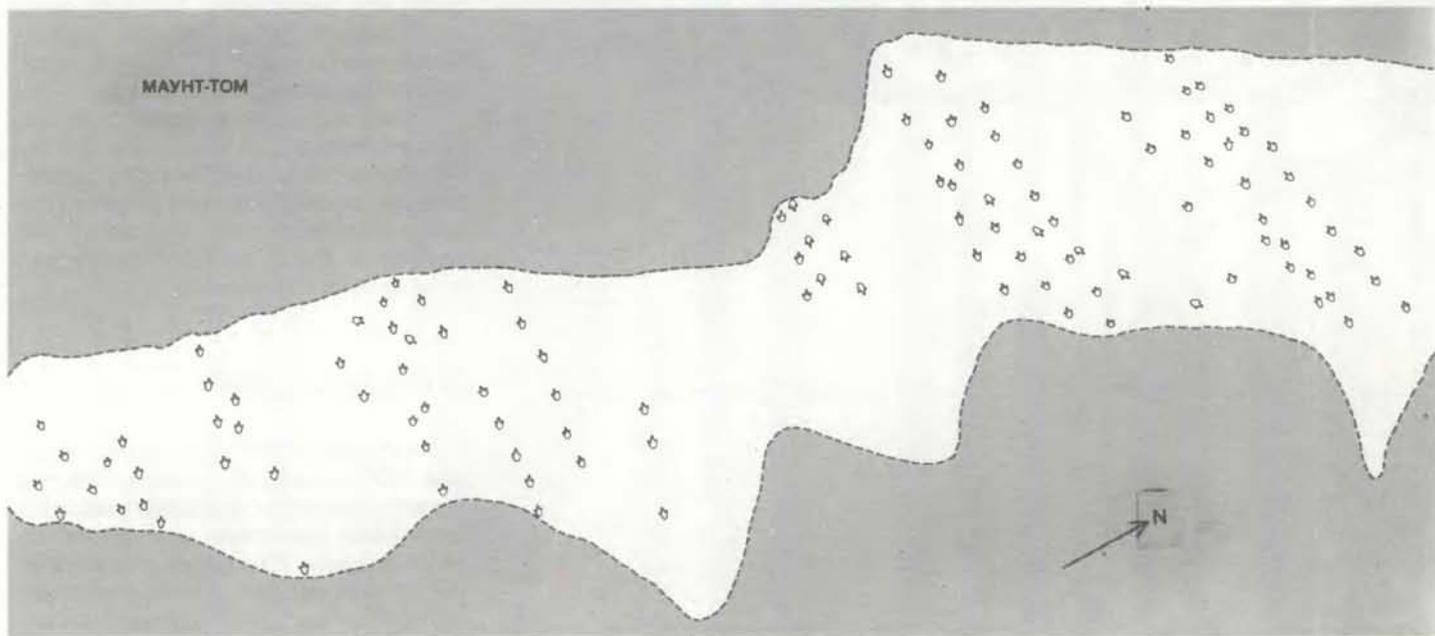
По сравнению со второй половиной XIX в. в первой половине XX столетия сообщений о находках следов позвоночных животных становится гораздо меньше. Ихнология (так называют то направление в палеонтологии, которое изучает следы ископаемых животных; от греческого *ихнос* — след) потеряла популярность у геологов. Причины установить нетрудно. В 1930 — 1960 гг. немногочисленные работы в этой области писали в основном любители, а не специалисты; уровень их был невысок, да и печатались они в малоизвестных журналах. Описания изобиловали досадными неточностями, авторы редко сопоставляли свои данные с опубликованными ранее. Если следы и фотографировали, то, как правило, при верхнем освещении, а не при боковом, которое лучше выявляет низкий рельеф. Часто в качестве иллюстраций приводились даже не фотоснимки, а просто рисунки, порой весьма посредственные. Почти никогда не указывалось, где находятся образцы — в основном потому, что большинство образцов вообще не попадало в научные коллекции. В этом вина не только авторов находок. Пластины с отпечатками обычно очень большие, они неудобны в обращении и поэтому не пользовались успехом у хранителей музеев. А если они и поступали в музей, то чаще всего оказывались где-нибудь во дворе, порой прямо на земле, под ногами посетителей, и постепенно разрушались от дождя, солнца и ветра.

В 50-е годы изыскания немецкого палеонтолога Вальтера Х. Хенцшеля, а также подвижническая деятельность его ученика Адольфа Зайлахера возродили интерес к следам морских организмов. К сожалению, о следах позвоночных того же нельзя сказать. В настоящее время лишь горстка ученых за-

нимается этой проблемой: Леонарди и Родольфо Казаникела в Южной Америке, Д. Бэйрд из Принстонского университета, Дж. Делейр в Англии, Ж. Дематье и А. Лаппаран во Франции, Х. Хаубольд в ГДР и О. С. Вялов в Советском Союзе.

Помимо того что публикации в этой области были чаще всего непрофессиональны, исследователь, взявшийся за изучение следов ископаемых животных, сталкивался и с другими трудностями. Прежде всего много проблем связано с самими отпечатками. В иде-

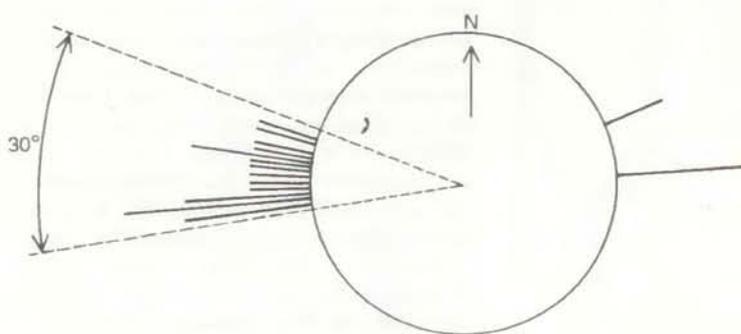
але, чтобы животное оставило четкий след, оно должно было пройти по влажному и мягкому мелкозернистому пластичному грунту. Желательно, чтобы животное двигалось при этом медленно, тогда отпечатываются и передние и задние ноги (если речь идет о четверо-



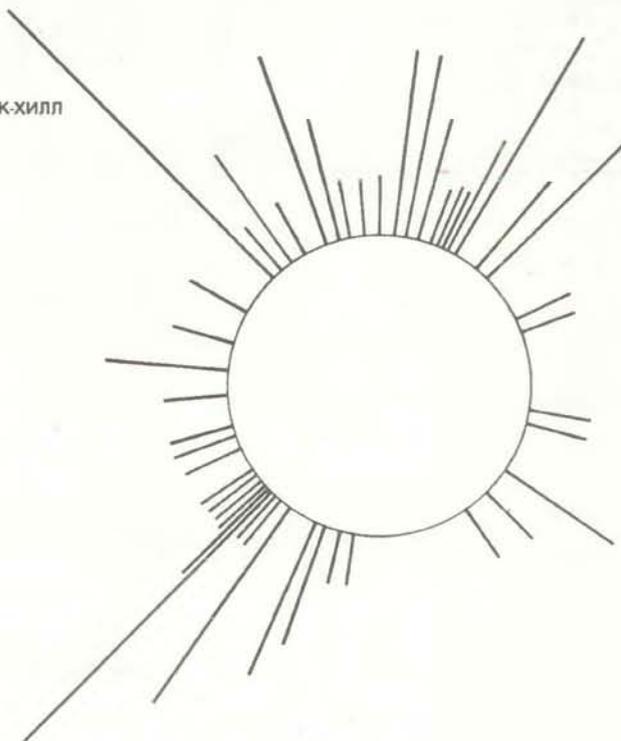
О СОЦИАЛЬНОМ ПОВЕДЕНИИ ДИНОЗАВРОВ можно говорить на основании следов, найденных в долине реки Коннектикут возле Холиока (шт. Массачусетс); они относятся к триасовому периоду. Дж. Остром из Йельского университета проанализировал следы и пришел к выводу, что не менее

19 плотоядных динозавров, относящихся к роду *Eubrontes*, пересекли увлажненную песчаную почву с востока на запад. Животные двигались в одном направлении; это наводит на мысль, что они сообща охотились.

МАУНТ-ТОМ



РОК-ХИЛЛ



СРАВНИТЕ СЛЕДЫ эубронтид в Маунт-Том (слева) и следы других динозавров в Рок-Хилл (справа). Следы справа имеют более случайный характер. На рисунке слева 70% цепочек следов тянется в пределах сектора в 30°. Случайная

ориентация следов в Рок-Хилл (справа) свидетельствует о том, что эти отпечатки были оставлены в разное время; впрочем, это вовсе не опровергает гипотезу о стадном поведении динозавров.

ногом). Если все эти условия соблюдены, в отпечатке сохранится все, вплоть до точного контура когтей (или ногтей), формы подушечек и рисунка чешуи.

К сожалению, на практике такие идеальные отпечатки встречаются крайне редко. Если порода слишком груба, в ней не отпечатываются мелкие детали. Если в отложениях избыток влаги, вода заполнит углубления и испортит форму следа. Если грунт слишком сухой, след рассыплется. Следы может уничтожить сильный ветер, а на побережье — приливы. Даже захоронение отпечатков новым слоем, что само по себе необходимо для их консервации, может испортить следы. Если новый слой такой же, как предыдущий, хранящийся отпечаток, слои трудно будет разделить и, значит, мы просто ничего не обнаружим.

Наилучшие условия для сохранения следов создаются, когда с суши уходит паводок, оставляя за собой влажную мелкозернистую почву. На морском побережье это случается после максимальных весенних приливов, а на суше — по окончании сезона дождей, когда вода в реке или водоеме поднимается до наибольшего уровня. Отпечатки в такой влажной почве затвердеют, когда она высохнет, и сохранятся, покрывшись новыми отложениями. Но даже в этом случае то, что сохранится, может оказаться не собственно отпечатком, а его слепок, если новый слой более грубозернистый и пластичный, чем прежний. Слепки следует искать на подошве слоев; обнаружить их не всегда удастся, разве что такой пласт окажется перевернутым в результате обвала скалы или вскрышных работ.

Наконец, вероятность того, что следы наземного животного сохранятся и в конце концов обнаружатся, прямо пропорциональна размерам животного. Большие животные в поисках пищи вынуждены перемещаться на значительные расстояния, они часто посещают водопои в долинах. Кроме того, их следы вдавливаются в почву сильнее, и, следовательно, не так подвержены разрушению. Хотя мелкие животных гораздо больше, чем крупных, они передвигаются на меньшие расстояния, их потребность в пище и воде не так велика и следы они оставляют не такие глубокие. Вот почему вероятность встретить следы динозавра больше (и узнать их легче), чем следы какой-нибудь ящерицы.

Анализ следов

В ИДЕАЛЕ цепочка следов, пригодная для анализа, должна состоять по меньшей мере из трех отпечатков или слепков. Четвероногое начинает идти,

делая шаг задней ногой, затем представляет переднюю ногу того же бока, затем шагает второй задней ногой и, наконец, второй передней. Если животное двигается быстро, земли одновременно касаются две или три ноги, а если медленно — три или даже четыре ноги. При передвижении скачками все четыре следа располагаются кучно, однако друг друга не перекрывают. Следы прыгающих животных — редкость; несколько таких следов обнаружили не так давно Леонарди и один из авторов этой статьи (У. Сарджент) в мезозойской формации Бразилии. Если животное передвигалось на двух ногах, то следы обычно расположены поочередно — правый, левый, правый, левый и т.д.; редко когда левый и правый следы стоят рядом.

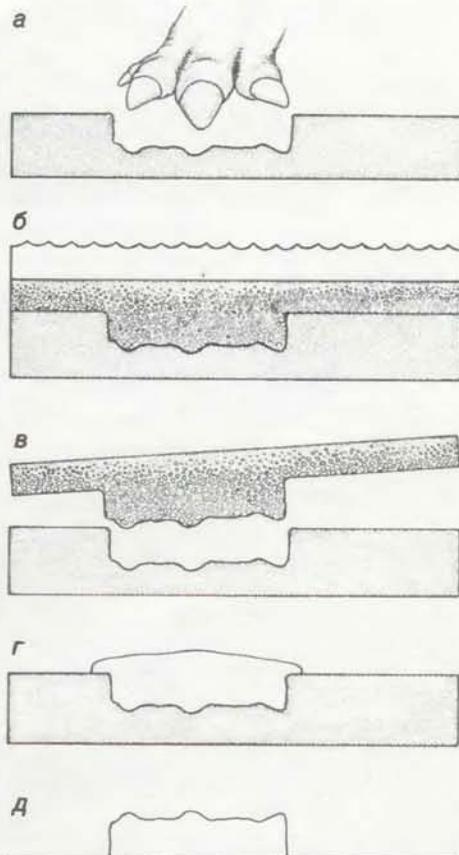
Анализируя след, надо прежде всего сделать четыре основных замера. Во-первых, измеряют продвижение вперед: берется расстояние от какой-то определенной точки одного следа до такой же точки следующего отпечатка той же ноги. Во-вторых, определяют шаг, измеряя расстояние между отпечатками правой передней и левой передней ног, а также между отпечатками правой задней и левой задней ног. Первый параметр, как правило, одинаков для передних и для задних ног, а второй может сильно различаться. В-третьих, измеряется угол бега или шага; это угол, который получается, если соединить центральные точки трех следов от последовательного переставления ног — либо только задних, либо только передних. В-четвертых, измеряется ширина цепочки следов. Как уже отмечалось выше, для несовершенного хождения характерны расставленные следы и короткий шаг. Соответственно, если левые и правые следы лежат близко друг к другу и шаг длинный, значит, животное двигалось быстро и уверенно. Что касается средних показателей, то они могут принадлежать как «неумелому» шагавшему животному, так и, наоборот, «умелому», но которое в тот момент двигалось сравнительно медленно.

В отношении следов четвероногих важно также измерить расстояние от точки, расположенной посередине между двумя соседними отпечатками задних ног, до точки, находящейся посередине между соответствующими отпечатками передних ног. Фактически это расстояние между тазобедренным и плечевым суставами. Оно примерно соответствует длине туловища животного (исключая голову, шею и хвост).

Поскольку контуры следов или слепков могут сливаться с текстурой почвы, порой бывает трудно определить их точные границы. В результате замеры часто производятся неправильно, так что исследователь должен остерегаться делать поспешные выводы.

Другая трудность в том, что в ряде случаев животное, оставившее отпечаток, давило своей массой не только на верхний слой почвы, но также и на лежащие под ним слои. Поэтому следует быть внимательным и отличать настоящие следы от «призрачных» отпечатков на подпочве. Желательно анализировать не только сам след, но и его слепок. Если же обнаружен только слепок, надо сделать с него отпечаток (и таким образом воссоздать форму утраченного следа). Если мы имеем дело с подлинным следом (отпечатком), следует сделать с него слепок. Подобные слепки изготавливаются прямо в поле из гипса, латекса или фиброгласовой массы. Слепки — ценный материал для последующих лабораторных исследований.

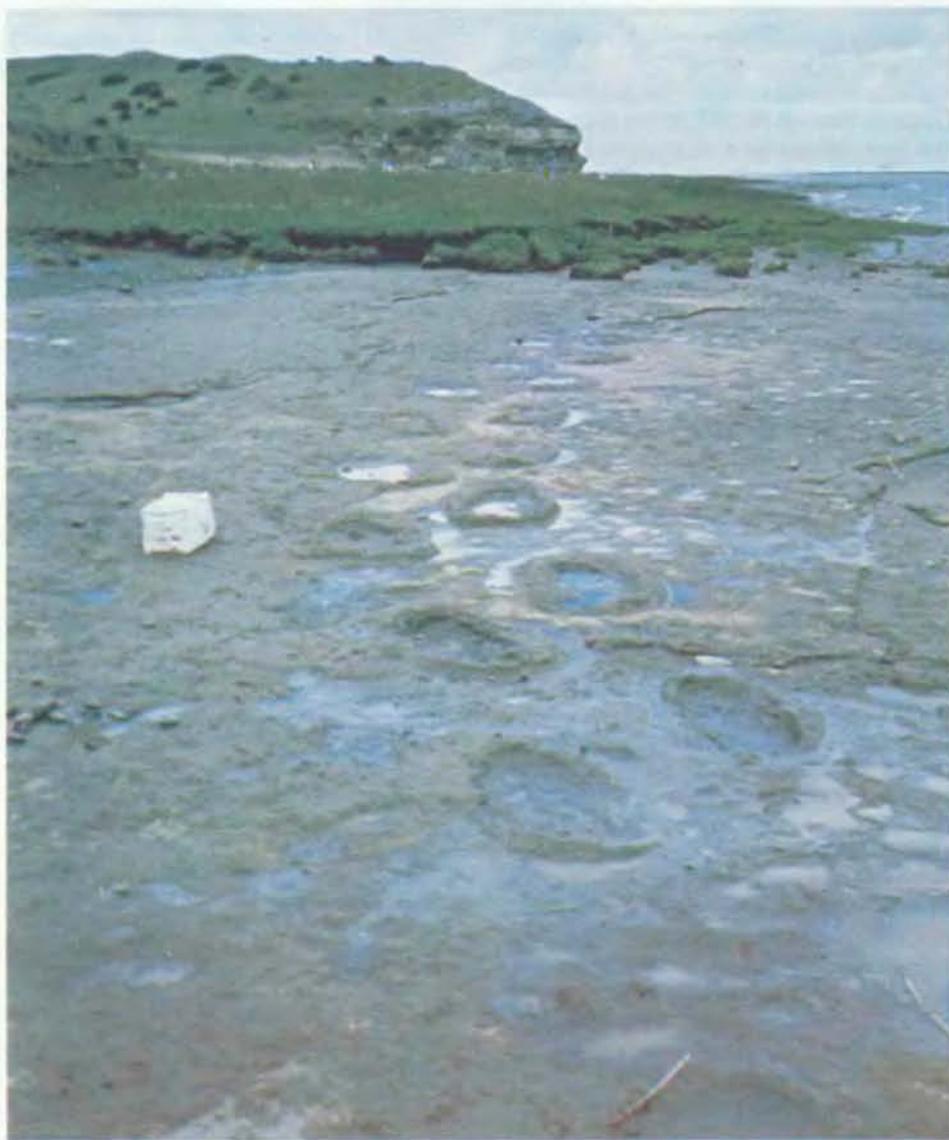
Полезно определять степень перекрытия следов от передних и задних ног. За исключением некоторых животных с подвижным туловищем, таких, как саламандра, по степени и частоте перекрытий следов также можно судить о расстоянии между тазобедренным и плечевым суставами.



КОНСЕРВАЦИЯ СЛЕДА: вмятина (а) заполняется породой, контрастной по твердости (б), оба слоя затвердевают. Впоследствии слои могут разъединиться. Если сохранится заполняющий слой (в), то получается естественный слепок. Если сохранится продавленный слой (г), мы найдем след, с которого можно сделать слепок (д).



ПТИЧЬИ СЛЕДЫ на обнажившихся мезозойских отложениях в районе знаменитого каньона в долине реки Пис, где в 1922 г. были найдены многочисленные следы динозавров. Эти следы прибрежных птиц — единственные известные палеонтологам следы пернатых нижнего мела.



ЦЕПОЧКА ОГРОМНЫХ СЛЕДОВ пересекает обнажившийся слой в районе Риу-Негру (Аргентина). Следы размером со слона. Животное, по-видимому, шло медленно. Слои относятся к позднему плиоцену (3,5 млн. лет назад).

Положение отдельных следов относительно оси цепочки следов говорит о походке животного. Например, если осевая линия не проходит через точки, которые лежат посередине пары следов, можно думать, что походка у животного была, так сказать, вихляющей.

Реконструирование неизвестных животных

НАСКОЛЬКО сложно реконструировать внешний вид животного по окаменелым следам, хорошо видно на примере хиротерия (*Chirotherium*). Следы хиротерия впервые были обнаружены в 1834 г. в “красных слоях” центральной области Германии — Тюрингии, — и датировались они триасовым периодом (225 — 195 млн. лет назад). Отпечатки задних ног были размером с ладонь человека; четыре пальца смотрят прямо, пятый чуть в сторону, вроде большого пальца руки у человека. Рядом с некоторыми отпечатками задних ног располагались меньшие по размеру, но очень похожие на них отпечатки, которые сочли следами передних ног.

В триасовое время преобладали рептилии, однако следы в Тюрингии поначалу приписали некоей разновидности обезьяны либо медведя. Исследователи ошибочно приняли оттопыренный отросток за большой палец, хотя его отпечаток располагался с внешней стороны следа. Пытаясь воссоздать облик хиротерия, его поначалу изображали жабоподобной амфибией, которая передвигалась на скрещенных ногах — такое положение ног объясняло отпечаток “большого пальца”. В 1874 г., обращаясь к Британской ассоциации по распространению научных знаний, зоолог Л. С. Майелл доказал, что эта реконструкция ошибочна, и выдвинул предположение, что следы принадлежали какому-то динозавру. Во всяком случае, животное, оставившее эти следы, несомненно, относится к классу рептилий: цепочка следов хиротерия достаточно узкая (у амфибий конечности расставлены гораздо шире).

Самым сильным аргументом в пользу того, что хиротерий — рептилия, послужил тот факт, что в наилучших отпечатках можно было разглядеть контуры чешуек. Кроме того, у него были хорошо развиты когти, следовательно, он был скорее всего плотоядным. Анализ следов показал, что длина туловища хиротерия около 1 м, ходил он в основном на двух ногах и, значит, имел хвост примерно такой же длины — хвост должен был уравновесить туловище в вертикальном поло-

жени. С учетом головы и шеи общая длина хиротерия от конца морды до кончика хвоста примерно 2,5 м.

Сегодня мы знаем, что животные, оставившие эти следы, относятся к так называемым псевдозухиям — важной группе рептилий, от которых произошли и динозавры и крокодилы. Хотя сейчас по следам известны почти два десятка видов хиротерия, окаменелые скелеты остались всего от нескольких видов. Один из них, вид *Ticinosuchus*, который открыли около двадцати лет назад в отложениях среднего триаса в Швейцарии, считается наиболее вероятным кандидатом на роль того, чьи следы так озадачили палеонтологов прошлого века.

Отпечатки чешуек, сохранившиеся в некоторых следах хиротерия, помогли установить, что это животное относится к классу рептилий; точно так же в следах других животных могут сохраниться фрагменты мягких тканей, которые редко окаменевают. Взять, к примеру, следы гадрозавров (*Hadrosaurus*), обнаруженные в верхнемеловых отложениях Альберты. Гадрозавры — это крупные двуногие плотоядные динозавры. Отпечатки, найденные в Альберте, свидетельствуют о том, что, как у современных слонов, у гадрозавров были на подошвах ног подушечки, а пальцы задних ног были сильно развиты; эти приспособления служили для амортизации их огромного веса.

Следы и поведение животных

ОКАМЕНЕЛЫЕ следы, с одной стороны, дают новую информацию об ископаемых животных, а с другой — изменяют наши представления об их поведении, индивидуальном и стадном. Например, завроподы (*Sauropoda*), или ящероногие, которых впервые описал в 1842 г. английский зоолог Р. Оуэн, — самые крупные из наземных животных. Более ста лет считалось, что эти тяжеловесные травоядные четвероногие с длинной шеей и длинным хвостом обитали в основном в воде, где им было легче двигаться при таком колоссальном весе. По сути дела вообще ставилась под сомнение их способность передвигаться на суше. Позднее Р. Бэрд из Американского музея естественной истории обнаружил следы завроподов в двух техасских формациях, относящихся к меловому периоду: в Пэлекси-Крик в 1944 г. и в Уэст-Верде-Крик в 1954 г. Его находки многое прояснили. Следы бронтозавра (*Brontosaurus*) в Пэлекси-Крик особенно впечатляют. Это узкая цепочка огромных отпечатков, оставленных,

по всей видимости, в илистой почве, которая была частично или целиком открыта воздуху. Следы отстоят друг от друга на добрых два метра, их характер неопровержимо свидетельствует о том, что бронтозавр был настоящим наземным животным с развитой локомоцией, так что от гипотезы о водной среде обитания пришлось отказаться. По следам бронтозавра можно прочесть довольно драматическую историю: они перекрываются отпечатками ног крупного плотоядного двуногого динозавра — возможно, аллозавра (*Allosaurus*), который двигался в том же направлении и, похоже, преследовал безобидного бронтозавра.

В другом месте, в Уэст-Верде-Крик, помимо отпечатков ног завропода сохранилась сплошная глубокая борозда. Очевидно, это след волочившегося хвоста динозавра. Можно думать, что илистая почва, по которой двигалось животное, не была покрыта водой, то есть эти следы — дополнительное подтверждение того, что завроподы передвигались по суше. Конечно, это вовсе не означает, что гигантские динозавры никогда не плавали. В этом смысле некоторый свет проливает еще одно открытие Бэрда. Он нашел отпечатки передних ног завропода, рядом с которыми был только один отпечаток левой задней ноги. Вероятно, задняя часть туловища и хвост животного находились в воде, но водоем был довольно мелкий, так что оно ступало по дну передними ногами, подобно тому, как это делают современные бегемоты. Поворачивая налево, динозавр оставил след задней ноги, оттолкнувшись ею от дна.

Одно время вошло в обычай изображать гигантских травоядных динозавров плавающими в воде и пощипывающими водоросли, в то время как их естественные враги, плотоядные динозавры, бродят по берегу не в силах достать добычу. Следы в Парке динозавров (Рок-Хилл, шт. Коннектикут) подсказывают иную картину. В Рок-Хилл в озерных отложениях ранней юры сохранились сотни следов в основном плотоядных зубронтид (*Eubrontes*). Некоторые отпечатки удивительно четкие, другие едва видны; одни следы отпечатались глубоко, другие слабо. Все следы трехпалые, что характерно для двуногих плотоядных динозавров. Особенно интересна одна цепочка следов, обнаруженная У. Кумсом-младшим из Колледжа Западной Новой Англии. Эти следы многое проясняют относительно способности плотоядных динозавров плавать. Цепочка состоит из восьми следов, отстоящих друг от друга в среднем на метр. Расстояние между отпечатками правой ноги все время симметрично на двадцать длиннее расстояния между левыми следами; Кумс сделал вывод, что животное

двигалось в воде, так сказать, галопом. На некоторых отпечатках отчетливо видны следы когтей, что было бы невозможно, будь это “призрачные” следы, а вместе с тем непохоже, чтобы животное основательно наступало на грунт. Кумс предположил, что животное плыло на мелководье, отталкиваясь от дна кончиками пальцев. Более того, цепочка следов начинается и обрывается внезапно, следовательно, животное время от времени плыло по настоящему, т.е. не касаясь дна. Видимо, традиционное представление о плотоядном динозавре, ожидающемся на берегу, когда его жертва выйдет из воды, следует пересмотреть.

Остатков, которые бы свидетельствовали о том, что динозавры жили группами, пока немного. Известно, например, скопление более чем двадцати скелетов динозавров в отложениях раннего мела под Берниссаром (Бельгия). Все это были крупные двуногие плотоядные рода *Iguanodon*. Предполагали, что они погибли, когда все стадо провалилось в известняковое ущелье, то есть подразумевалось, что игуанодоны бродили стадами. Однако недавно Д. Норман из Оксфордского университета обратил внимание на то, что скелеты животных найдены на разных стратиграфических уровнях, а сама осадочная формация фактически состоит из нескольких слоев. Это открытие ставит под сомнение гипотезу о стадности динозавров.

Еще о социальном поведении динозавров

СКОПЛЕНИЕ скелетов динозавров было обнаружено также в триасовых отложениях под Гост Ранч (шт. Нью-Мексико) в 1947 г. Все скелеты принадлежали небольшому плотоядному динозаврам рода *Coelophysus*. Опять-таки одни исследователи видят в этом доказательство того, что животные охотились сообща, другие же считают скопление просто случайным. Вообще говоря, окаменелые кости по самой своей природе не могут дать прямой информации о поведении животного.

Один из источников данных — гнезда динозавров. В 20-е годы в Монголии нашли гнезда с невысиженными яйцами динозавров, уложенными симметрично, как птичьи яйца. В свое время это произвело сенсацию в палеонтологическом мире. Одно такое гнездо, принадлежавшее небольшому четвероногую динозавру, — протоцератопсу (*Protoceratops*) — навело на мысль, что эти древние рептилии в отличие от современных — таких, как черепаха — охраняли отложенные яйца. Возле гнезда нашли окаменелый скелет целу-

розавра, небольшого двуногого плотоядного; судя по всему, он умер насильственной смертью. Этого динозавра отнесли к новому виду и назвали соответственно обстоятельствам *Oviraptor*.

Еще одно гнездо нашел два года назад в меловых отложениях Монтаны Дж. Хорнер из Университета шт. Монтана. В этом гнезде оказались 18 детенышей динозавров. Возраст их определили в 1—2 недели. То, что молодняк так долго оставался в гнезде, свидетельствует об определенном уровне социального поведения, по крайней мере о существовании родительской опеки.

О каких аспектах социального поведения могут говорить следы? Начнем с

того, что на стадность динозавров указывают находки Бэрда, о которых уже шла речь. Он нашел около двадцати параллельных цепочек следов завроподов; следовательно, животные шли в одном направлении. Некоторые цепочки следов перекрывались. Кроме того, отпечатки отличались по размеру, значит, в стаде были особи разного возраста.

Через несколько лет после открытия Бэрда Д. Остром из Йельского университета нашел 25 цепочек следов динозавров в отложениях раннего мела вблизи озера Инс в шт. Техас. Все следы однотипные, они принадлежат двуногому травоядному, вероятно, камптозаврам (*Camptosaurus*). Животные дви-

гались в одном направлении — на северо-запад. Кроме того, в отложениях триасового периода в районе Маунт-Том (шт. Массачусетс) Остром нашел на ровном плато по меньшей мере 19 отдельных цепочек следов зубронтид. Следы шли опять-таки в одном направлении. Несомненно, все животные шли рядом друг с другом, поскольку следы нигде не перекрываются. Пожалуй, эту находку можно считать указанием на то, что зубронтиды охотились сообща.

Таким образом, отпечатки дают основание полагать, что хотя бы некоторые виды травоядных и плотоядных динозавров жили стадами. Уже одно это говорит о довольно высоком уровне социального поведения — у современных рептилий его нет. На основании находок Бэрда Р. Бэкер из Университета Джонса Гопкинса предположил даже, что в стаде существовала определенная организация: молодняк шел в центре, а взрослые животные охраняли молодых, окружив их кольцом. Хотелось бы, однако, получить дополнительные доказательства того, что такая организация стада динозавров была неслучайной и отражала действительно существовавшие социальные отношения.

Канадские сокровища

ПЕРЕЧЕНЬ следов ископаемых животных пополнился за последние несколько лет благодаря настойчивым изысканиям в долине реки Пис (провинция Британская Колумбия, Канада), где находятся отложения, относящиеся к середине мелового периода. Известно было, что этот каньон протяженностью в семнадцать миль богат следами; там еще в 1922 г. Ч. Стернберг из Королевского музея провинции Онтарио обнаружил 400 следов динозавров. В 1930 г. он опубликовал описание своих находок; по его мнению, можно было говорить о восьми новых типах следов динозавров, которые, за одним исключением, передвигались на двух ногах.

В 1975 г. недалеко от места находок Стернберга, ниже по течению реки Пис, началось строительство большой плотины. Сотрудникам Музея естественной истории в Альберте пришлось срочно заняться неисследованным районом каньона, где также могли быть отпечатки. Пять сезонов напряженной работы под руководством Ф. Карри дали ошеломляющие результаты.

Хотя удалось обследовать только четыре мили в нижней части каньона, нашли более 100 цепочек следов: 1700 отпечатков ног динозавров как минимум 10 различных видов, полосу птичьих следов и одну цепочку следов черепахи.



ДВЕ ЦЕПОЧКИ СЛЕДОВ, обнаруженные Р. Бэрдом в 1944 г. (Пэлекси-Крик, штат Техас), свидетельствуют об интересном эпизоде. Более крупные следы принадлежат четвероногому травоядному динозавру, возможно, бронтозавру. Меньшие по размеру следы оставлены двуногим хищным динозавром, вероятно аллозавром. Аллозавр, двигаясь в том же направлении, что и бронтозавр, наверно, преследовал его.

Составлены карты более 1000 отпечатков и почти столько же измерено. Сделано около 200 слепков, 90 отпечатков вывезено для дальнейшего исследования (впоследствии их предполагается выставить на всеобщее обозрение).

Среди прочих отпечатков оказалась великолепная серия, запечатлевшая все этапы роста гадрозавра — от совсем маленького детеныша до взрослого животного. По мере созревания животного и увеличения его веса изменялась форма стопы. Подобного материала еще не знала ихнология. Стадо гадрозавров, по-видимому, двигалось по территории меловых отложений, при этом животные шли широким фронтом, иногда бок о бок. Судя по тому, что в некоторых местах маленькие следы отпечатались поверх больших, молодые животные шли позади взрослых. Одна серия следов показывает, что какое-то время 11 животных двигались на юг, а затем внезапно повернули на восток. Сохранилась цепочка следов одного гадрозавра, который шел в обратном направлении, с юга на север, следовательно, стадо из 11 животных повернуло налево не потому, что встретило на своем пути естественное препятствие. Из 11 животных 4 шли рядом; если внимательно рассмотреть их следы, видно, что одно животное пошатывалось, а остальные трое старались отодвинуться и не столкнуться с ним.

Отпечатки в долине реки Пис также показывают, что маленькие и средние плотоядные динозавры охотились группами. Так, в одном месте шесть цепочек плотоядных динозавров среднего размера тянутся в одном направлении, правда, две цепочки дважды пересекаются. Наоборот, по следам крупных плотоядных — вероятно, тиранозавров (*Tyrannosaurus*) — можно заключить, что эти животные бродили поодиночке, в лучшем случае парами. Следы крупных плотоядных динозавров, охотившихся группой, пока что не найдены.

По следам можно определить скорость передвижения животного, однако тут следует быть осторожным. Приведем в качестве примера случай со следами динозавра, обнаруженными в начале 60-х годов в одном из карьеров в Англии. Недалеко от Херстона, в Дорсете, выходят на поверхность пурбекские слои — формация позднего мела. На дне карьера нашли две параллельные цепочки следов двуногого травоядного. Сначала решили, что это отпечатки левой и правой ног одного и того же животного. Довольно короткий шаг наводил на мысль, что динозавр двигался небыстро; один из исследователей предположил даже, что, поскольку животное ступало в основном на подушечки пальцев, оно, вероятно, медленно одолевало крутой подъем.

Такая картина соответствовала бытовавшему тогда представлению о динозаврах как о неповоротливых, медлительных животных. Однако, когда карьер расширили, обнаружилось, что следы раздваиваются; получается, что их оставил не один динозавр, медленно карабкавшийся в гору, а два динозавра, которые быстро бежали бок о бок.

Данные из долины реки Пис убеждают в том, что некоторые виды динозавров действительно могли передвигаться довольно быстро. По формуле, выведенной Р. Макнейл-Александром из Лидского университета, скорость движения животного можно рассчитать, исходя из рисунка следов и интервала между отдельными отпечатками. Наибольшая скорость получилась для плотоядного динозавра средней величины: 16,5 км/ч. Это близко к максимальной скорости, которую может развить человек. Другие плотоядные бегали не так резко: 6 — 8,5 км/ч. Травоядные двигались еще медленнее: их максимальная скорость 6 км/ч — для плотоядных это минимальная скорость.

Итак, последние исследования следов ископаемых животных показали, что представление о динозаврах как о животных от природы необщительных, медлительных, неуклюжих и туго соображающих далеко от истины. Может статься, когда так же тщательно исследуют окаменелые следы других наземных позвоночных — например, амфибий, прочих видов рептилий и млекопитающих ранней кайнозойской эры — и появится новая информация об их поведении, не исключено, что нам придется пересмотреть прежние результаты. Не возродится ли интерес к науке о следах ископаемых животных? Во всяком случае, в ближайшие десятилетия эта область палеонтологических исследований наверняка будет одной из наиболее интересных.

Издательство МИР предлагает:

**Б. Джон, Э. Дербшир,
Г. Янг, Р. Фейбридж,
Дж. Эндрюс**
ЗИМЫ
НАШЕЙ ПЛАНЕТЫ
Земля подо льдом

Перевод с английского

Книга представляет собой научно-популярное изложение основных фактов, теорий и гипотез, посвященных ледниковым периодам, — «зимам Земли», современному распространению ледников и многолетней мерзлоты на земном шаре, влиянию оледенений на изменение климата, развитие фауны и флоры. Текст сопровождается многочисленными фотографиями и схемами. Книга доступна не только геологам, географам, преподавателям высшей и средней школы, но и широкому кругу любителей природы.

1982, 336 стр. Цена 1 р. 60 к.

Требуйте эту книгу во всех магазинах научно-технической литературы!

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

В двух частях

Перевод с английского

Продолжение серии учебных пособий, промежуточных между программами для высших и средних учебных заведений и заполняющих некоторый разрыв в химической литературе, образуемый школьными и вузовскими учебниками (См. издания этой серии: Кемпбел Дж. Современная общая химия. 1973. Полинг Л. Химия. 1978. Слейбо У., Персонс Т. Общая химия. 1979 и др.)

1983, 75 л. Цена 6р. 40к. за комплект



Исследование живых организмов методом ЯМР

Обычно химические реакции обмена веществ изучают *in vitro*. Методом спектроскопии ядерного магнитного резонанса (ЯМР) можно исследовать реакции непосредственно в органах и тканях

Р. Г. ШУЛЬМАН

В СЕРЕДИНЕ XIX в. Луи Пастер установил, что определенные химические реакции идут в присутствии живых клеток; он показал, что дрожжи, с помощью которых углеводы сбраживаются до этилового спирта и двуокиси углерода, представляют собой живые клетки. В конце века братья Э. и Х. Бюхнеры обнаружили, что если к измельченным дрожжевым клеткам добавить углеводы, то они тоже окисляются до спирта и двуокиси углерода. Таким путем они пришли к выводу, что в дрожжевых клетках содержатся вещества, которые катализируют химические реакции. Это открытие определило основное направление развития биохимии. В течение XX в. биохимики пытаются понять, как извлеченные из клеток и очищенные вещества могут осуществлять те химические превращения, которые свойственны самим живым клеткам. Исследовались самые различные реакции, и постепенно в путанице событий ученые находили «ниточки» внутриклеточных метаболических путей. Хотя некоторые аспекты метаболизма до сих пор остаются невыясненными, расшифрованные цепи реакций (пересекающиеся, соединяющиеся, циклические) начинают складываться в сложную картину обмена веществ всей клетки.

В той мере, в какой живы еще возражения против правомерности современной биохимии, они касаются и вопроса о сведении жизненных процессов к последовательности химических реакций. «Да, в пробирках реакции идут, — слышим мы, — но происходит ли то же самое в живых клетках? А в многоклеточном организме?» Здесь я расскажу о методе исследования, который помогает ответить на подобные вопросы, позволяя наблюдать протекание реакций прямо в отдельных клетках, тканях, органах и в целом в живых организмах, в том числе в организме человека. Этот метод — спектроскопия ядерного магнитного резонанса (ЯМР-спектроскопия). Явление ЯМР основано на том, что ядра с нечетным числом нуклонов (протонов и нейтро-

нов) обладают магнитными свойствами, которые превращают каждое такое ядро в магнитный диполь, имеющий определенную ориентацию. К подобным ядрам относятся, в частности, протоны (^1H), составляющие 99,98% всех атомов водорода в природе, углерод-13 (^{13}C), содержание которого в природе 1,1%, и фосфор-31 (^{31}P), который составляет все природные атомы фосфора.

В ЯМР-спектроскопии клетки, ткани или органы подвергаются одновременному действию двух полей. Первое — сильное магнитное поле; оно заставляет ядерные диполи (ядра водорода-1, углерода-13 и фосфора-31 в исследуемом образце) ориентироваться таким образом, чтобы каждый диполь был направлен по полю (точнее, вдоль его магнитных силовых линий) или против поля. Ориентированные вдоль направления поля ядра обладают меньшим запасом энергии, чем ядра, ориентированные против поля.

ЗАТЕМ налагают второе поле — электромагнитное излучение в радиочастотной области спектра. Определенной напряженности магнитного поля соответствует определенная частота электромагнитного излучения, при которой каждый фотон (квант излучения) имеет энергию, достаточную для того, чтобы заставить ядра определенного типа совершить «перескок» от ориентации по полю к ориентации против поля. Следовательно, если поддерживать постоянной напряженность магнитного поля и менять его частоту (или наоборот фиксировать частоту, а напряженность поля менять), наступит момент резонанса ядер — они будут поглощать кванты радиоионизации. Например, в магнитном поле напряженностью 84 000 Гс резонанс на ядрах ^1H происходит при частоте ~ 360 МГц, на ядрах ^{31}P — при частоте ~ 146 МГц, на ядрах ^{13}C — при частоте ~ 90 МГц.

В клетках, тканях и живых организмах частота резонанса зависит еще и от химического окружения данного ядра.

Поскольку ядра входят в состав атомов, а из атомов построены молекулы, частота имеет «химический сдвиг», т.е. отличается от той, при которой осуществлялся бы резонанс изолированного ядра. Рассмотрим спектр ЯМР глутаминовой кислоты, представляющей собой серию пиков (линий поглощения). Хотя природное содержание углерода-13 составляет лишь 1,1%, в спектре четко видны пики, соответствующие резонансу на ядрах ^{13}C для пяти разных положений этого атома в молекуле. Если спектр получен при изменении напряженности магнитного поля, то эти пики охватывают область приблизительно в 200 миллионов долей, м. д. (0,02% напряженности поля). В молекуле глутаминовой кислоты два атома углерода связаны с двумя атомами кислорода каждый (COO^-), поэтому их пики совмещаются в один. На определенном расстоянии от него находятся пики двух атомов углерода, связанных с двумя атомами водорода, и пик атома углерода, связанного с одним атомом водорода.

Наблюдаемый в спектре ЯМР пик можно отнести к определенному атому углерода данной молекулы разными способами, самый прямой из них — метод углеродной «метки», когда спектр записывают после того, как в определенное положение молекулы введен изотоп углерода-13, так что число атомов ^{13}C в данном положении становится намного больше, чем при его естественном содержании. В спектре соответствующий пик увеличивается. Этот метод демонстрирует преимущество использования углерода-13 для изучения химических реакций обмена веществ: введение углеродной метки в исходную молекулу позволяет проследить, как меняется ее положение во время метаболических превращений.

АТОМ фосфора-31 обладает другим преимуществом. Естественное содержание таких атомов составляет 100%, поэтому необходимость в метках отпадает. Кроме того, ^{31}P дает сильный сигнал ЯМР даже в случае очень малых

количество биологически важных веществ. Так, при исследовании суспензии бактерии *Escherichia coli* (*E. coli*) в спектрах ЯМР наблюдались пики, соответствующие трем атомам фосфора аденозинтрифосфата (АТФ), в котором запасается химическая энергия. Наблюдался также сигнал от ядер фосфора в неорганическом фосфате (P_i) — АТФ, отдавшем энергию, и пики двух атомов фосфора никотинамидадениндинуклеотида, который участвует во внутриклеточном окислении. Иногда проявляются сигналы, соответствующие аденозиндифосфату (АДФ) [в котором на один атом фосфора меньше, чем в АТФ], фосфоенолпирувату [который поставляет фосфат P_i для превращения АДФ в АТФ] и полифосфатным цепям.

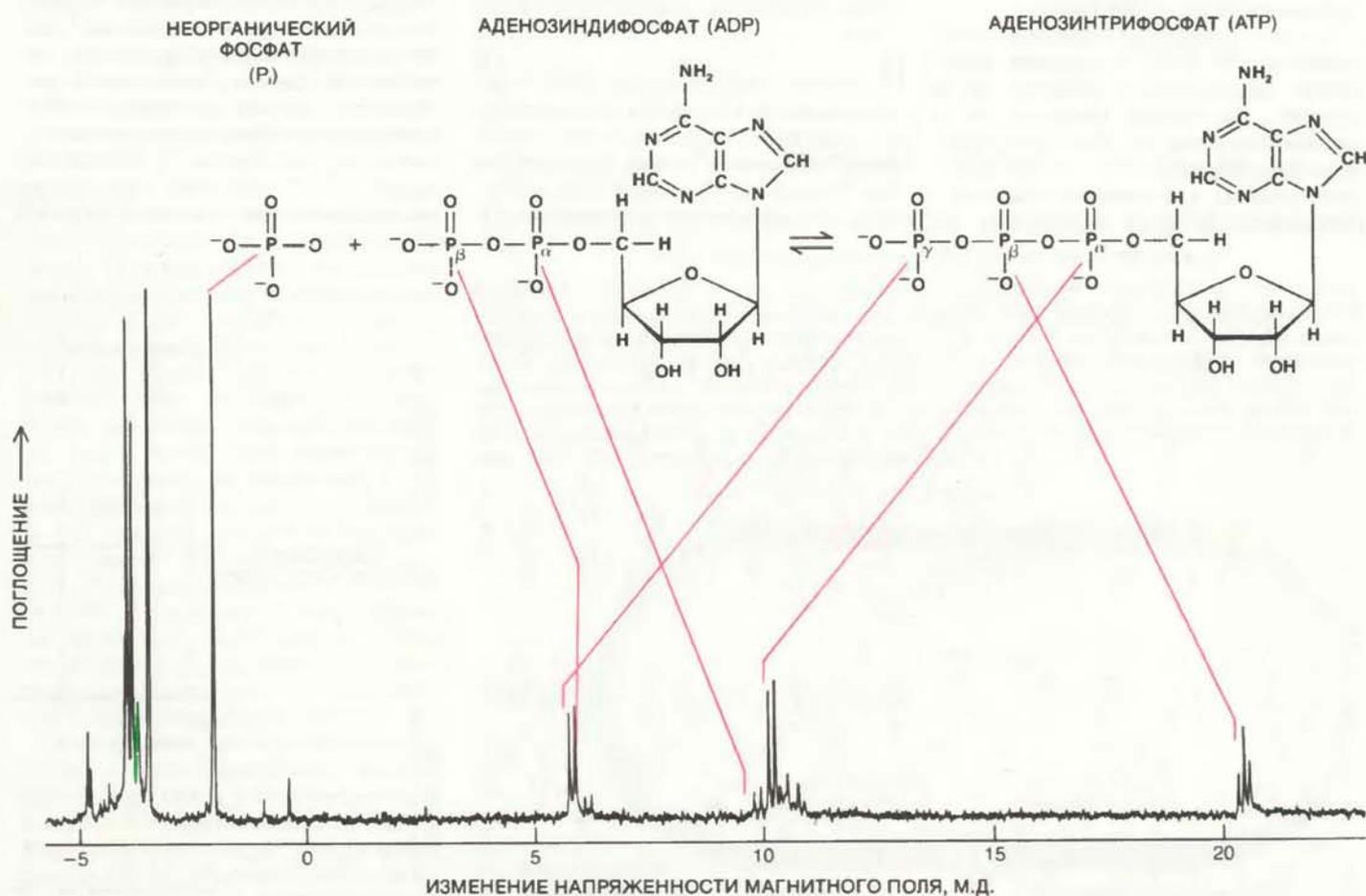
Когда бактерии питаются глюкозой, в их клетках последовательно протекает ряд определенных метаболических реакций; эта цепь реакций называется гликолизом или гликолитическим расщеплением. В этом случае можно обнаружить молекулы — продукты от-

дельных этапов гликолиза, в частности фруктозо-1,6-бисфосфат (ФБФ). Все названные молекулы дают узкие пики в спектрах ЯМР благодаря очень небольшим размерам (в среднем их масса не превышает 1000 масс атома водорода). В растворе маленькие молекулы совершают быстрые хаотические движения (порядка 10^9 в секунду). При этом углы между химическими связями в молекуле и ее окружением принимают все возможные значения, в результате чего они усредняются. Напротив, большие молекулы движутся медленно, а молекулы, зафиксированные в твердом теле, совсем не движутся. Линии поглощения в спектрах большого числа таких молекул уширяются из-за вкладов от ядер, ориентированных под разными углами по отношению к окружению, поэтому даже при высокой концентрации ядер фосфора-31 в образце их нельзя наблюдать в спектре ЯМР.

Среди наблюдаемых сигналов фосфора-31 пик, соответствующий не-

органическому фосфату, оказался простейшим в смысле интерпретации и одним из самых информативных. В клетках фосфат связан с одним или двумя протонами. При pH 6,7 внутри клетки концентрация однопротонированной и двупротонированной форм одинакова. При более высоких pH (в более щелочной среде) доминирует однопротонированная форма, при более низких pH (в более кислой среде) — двупротонированная. Каждой форме присущ характерный химический сдвиг, и в спектре ЯМР сигнал фосфата клетки будет находиться в некотором промежуточном положении в зависимости от средней степени протонирования всех P_i .

ТАКИМ образом, положение этого пика может служить точной мерой степени протонирования фосфата P_i , которая, в свою очередь, определяет значение pH внутри клетки. Работая вместе со мной в Bell Laboratories несколько лет назад, Дж. Нэвон и К. Угурбил с помощью такого метода выяснили,



ПИКИ В СПЕКТРЕ ЯМР соответствуют поглощению радиочастотного излучения ядрами атомов в определенных положениях молекул, находящихся в магнитном поле. Вверху показаны химические реакции, при которых неорганический фосфат (P_i) и аденозиндифосфат (АДФ) дают аденозинтрифосфат (АТФ), в молекулах которого в живых клетках запасается энергия. Внизу представлен спектр ЯМР фосфора-31

для опухолевых клеток мыши. Почти все пики относятся к ядрам фосфора-31 в молекулах, показанных вверху. Пики, соответствующие γ -фосфору-31 в АТФ и β -фосфору-31 в АДФ, слились, поскольку эти атомы имеют одинаковое химическое окружение. Для β -фосфора-31 в АТФ наблюдается отдельный пик, поскольку этот атом имеет другое химическое окружение — фосфатные группы.

что рН внутри клетки *E. coli* поддерживается постоянно вблизи значения 7,4, когда бактерии могут откуда-то черпать энергию, например, в среде есть глюкоза. По спектру ЯМР можно проследить также превращение глюкозы в ФБФ и постепенный рост концентрации АТФ, в котором в клетке запасается энергия.

Английский биохимик П. Митчелл предположил, что взаимопревращения АТФ, АДФ и неорганического фосфата в клетке связаны с переносом протонов через клеточную мембрану. В частности, реакция расщепления АТФ на АДФ и P_i в которой высвобождается химическая энергия, сопряжена с выбросом протонов из клетки. Таким образом, создается протонный градиент; в виде протонного градиента в клетке резервируется электрическая и химическая энергия. Возвращение протона в клетку наоборот дает энергию, необходимую для связывания P_i и АДФ в АТФ. Изменение концентрации протонов внутри клетки отражается в изменении рН; следовательно, по химическому сдвигу для P_i в спектре ЯМР можно проверить гипотезу Митчелла.

В начале опыта клеткам *E. coli*, находившимся до этого в условиях недостатка питательных веществ, дали глюкозу. До подачи глюкозы рН в клетках был ниже 7,0. Как только клетки начали перерабатывать свежую порцию глюкозы, наблюдаемый пик неорганического фосфата расщепился на

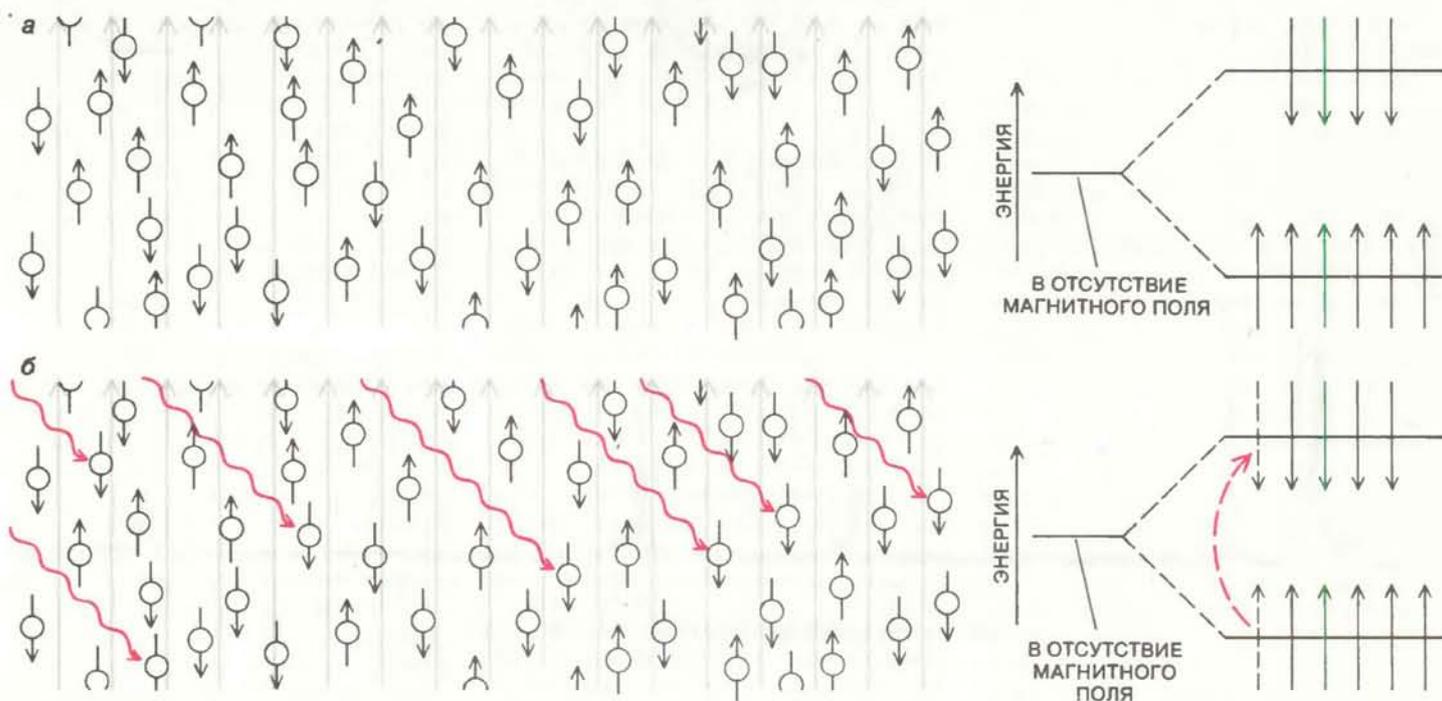
две линии. Одна, соответствующая рН 7,4, принадлежит P_i внутри клетки. Другая, указывающая на более низкое значение рН (более высокую концентрацию протонов), принадлежит P_i среды, в которой суспендированы клетки. Эти сигналы подтверждают, что установился протонный градиент. В то же время появляются пики, соответствующие АТФ.

Реакция расщепления АТФ на АДФ и фосфат катализируется аденозинтрифосфатазой (АТФ-азой) — ферментом, который сопрягает гидролиз АТФ с переносом протонов через клеточную мембрану. Если к суспензии *E. coli* вместе с новой порцией глюкозы добавить какой-нибудь ингибитор АТФ-азы, то снова обнаружится, что глюкоза усвоена. Вскоре образуется ФБФ, а затем АТФ. Спектр показывает, что, как только образовалось заметное количество АТФ, протонный градиент перестает увеличиваться. Кроме того, порция глюкозы сохраняется значительно дольше, чем прежде. Отсюда можно заключить, что в клетках значительная доля молекул АТФ расходуется на поддержание протонного градиента.

ВАЖНУЮ роль спектров ЯМР в исследовании метаболизма иллюстрирует, в частности, серия опытов на препаратах мышечной ткани, проведенная Дж. Раддой, Д. Гадрианом и их коллегами в Оксфордском университете. В

1974 г. эти ученые показали, что спектры ЯМР можно использовать для изучения метаболизма в мышечной ткани лягушки. В соответствующих спектрах наблюдаются пики фосфата, АТФ и креатинфосфата (в мышцах креатинфосфат служит источником макроэргического фосфата при превращении АДФ в АТФ). Если мышцы лишить питания, то креатинфосфат расходуется; а концентрация АТФ поддерживается за счет креатинфосфата. Когда же весь креатинфосфат был использован, началось снижение концентрации АТФ и появились АДФ и P_i . Положение пиков АТФ показывает, что в клетках почти весь аденозинтрифосфат входит в состав комплекса с положительно заряженными ионами металла (скорее всего магния).

Эти предварительные данные (дополненные аналогичными экспериментами, проведенными М. Бэрни, С. Бёртом и Т. Глонекком в Медицинском центре Иллинойского университета) подтвердились при химическом анализе большого числа образцов мышечной ткани через разные промежутки времени после инкубации в среде. Исследования продолжались. Д. Гадриан с Д. Уилки и Дж. Доусоном из Медицинской школы Лондонского университета решили по спектрам ЯМР найти однозначную корреляцию между составом метаболитов и усталостью мышц, т.е. ослаблением силы мышц после длительной нагрузки. Они закре-



ВНУТРЕННЯЯ НАМАГНИЧЕННОСТЬ некоторых ядер (в том числе водорода-1, углерода-13 и фосфора-31) обуславливает эффект ЯМР, поскольку каждое такое ядро подобно магнитной стрелке. В сильном магнитном поле ядра ориентируются или по полю, или против поля (а). Под действием радиочастотного поля эти ядра поглощают кванты излучения,

получая энергию для «перескока» из ориентации по полю в ориентацию против поля (б). Типы ядер и их химическое окружение определенным образом связаны с частотой и напряженностью этого магнитного поля, что проявляется в виде пиков (линий) в спектре ЯМР.

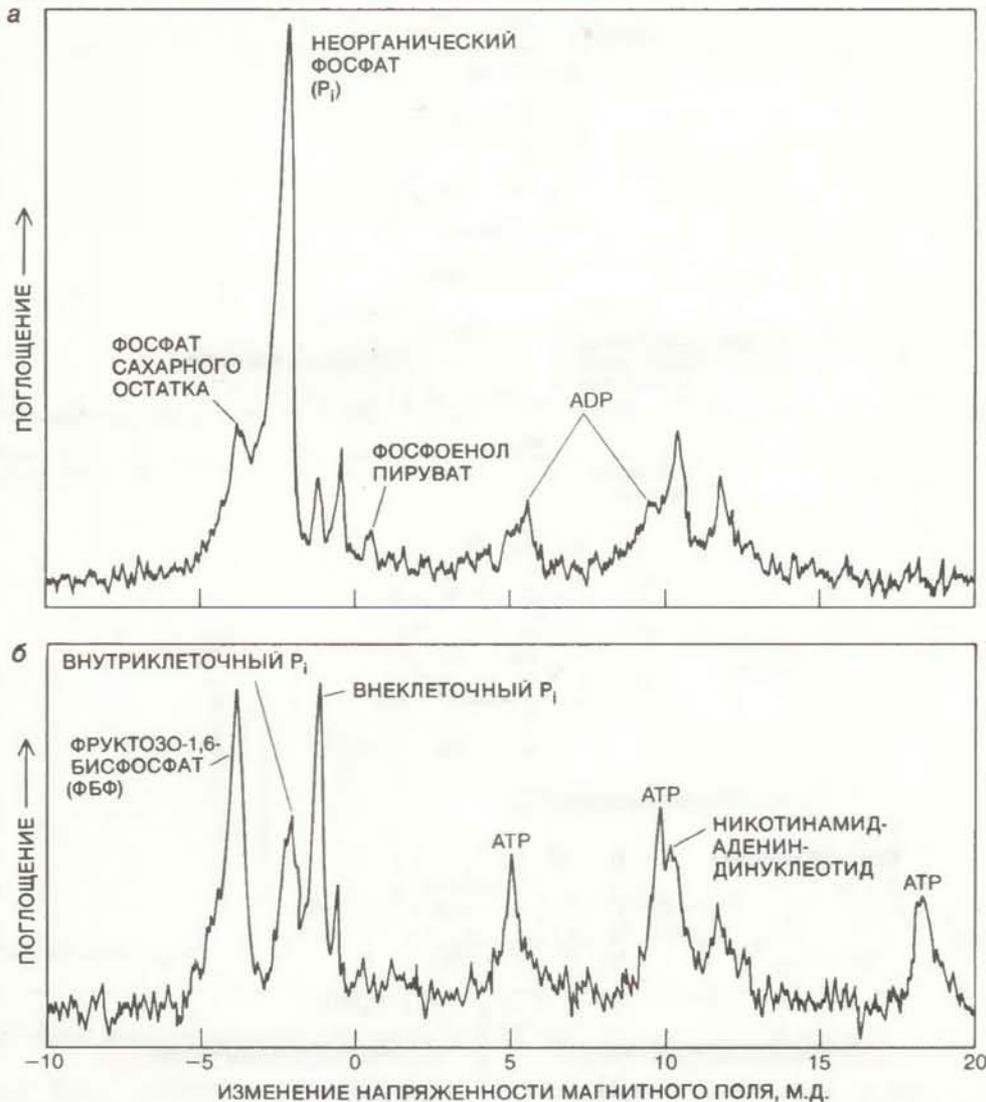
пили мышцу лягушки в пробирке и поместили в ЯМР-спектрометр.

В одних опытах раствор, в который помещают мышцу, насыщали кислородом, в других — кислород из раствора удаляли. Мышцу заставляли сокращаться, раздражая ее с помощью электрода. Силу, развиваемую мышцей, измеряли тензометром. Д. Гадан и его коллеги пришли к выводу, что усталость мышцы коррелирует с накоплением ADP. Кроме того, она пропорциональна скорости расщепления АТР, но не зависит от его концентрации. Экспериментаторы следили за скоростью расщепления АТР, измеряя уменьшение количества креатинфосфата (источника АТР в мышцах) и одновременно определяя концентрацию фосфата, который образуется при гидролизе АТР.

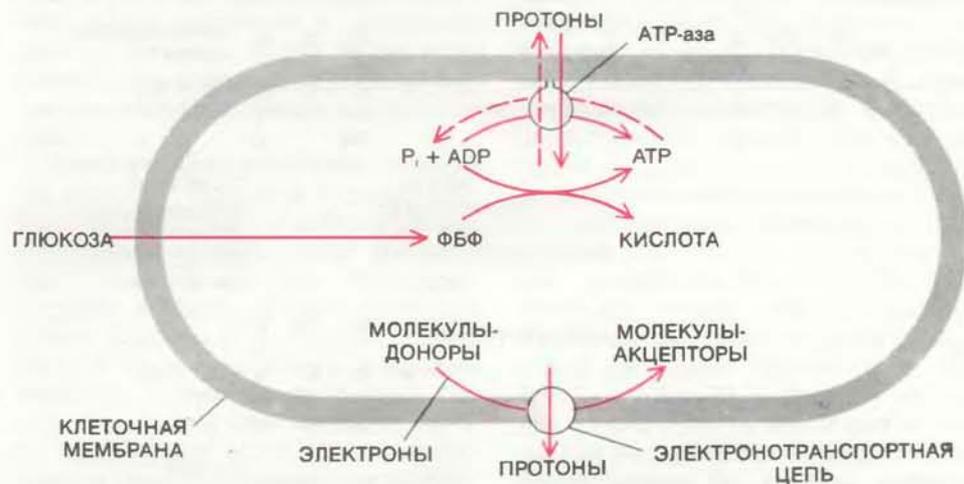
За последние два года развитие ЯМР-спектроскопии и создание новых спектрометров позволили исследовать метаболические реакции в мышцах конечностей человека. Спектрометры, предназначенные для химических исследований, сконструированы так, что образец в цилиндрической ампуле вставляется в радиочастотную катушку; при этом и ампула, и катушка находятся в постоянном однородном поле магнита. Понятно, что для обследования мышц живого человека нужен другой прибор.

В НОВЫХ спектрометрах плоскую катушку помещают на поверхности образца. Плоская катушка возбуждает радиочастотное поле в ограниченной области объекта («глубина» возбуждения равна диаметру катушки). Это создает ряд удобств для работы: исследователь может наблюдать ход химических процессов в определенной области ткани. Чтобы еще более ограничить эту область, в современных спектрометрах магнитное поле регулируется так, что оно становится однородным только в объеме 1 — 2 см³. Для этого объема и наблюдаются узкие пики ЯМР. В остальном объеме образца магнитное поле настолько неоднородно, резонанс осуществляется в таком широком спектре частот, что сигналы поглощения маскируются фоном.

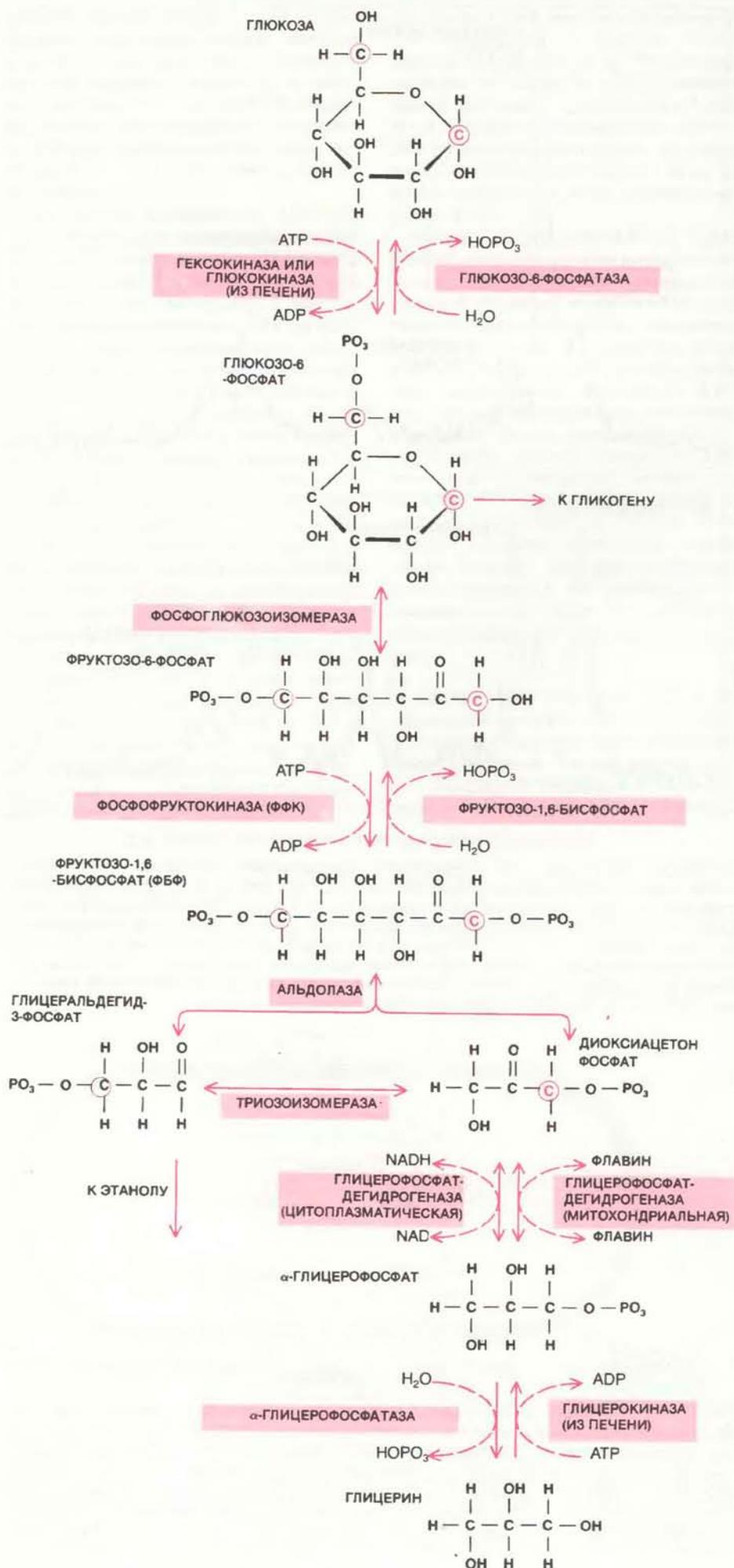
Сочетая плоскую поверхностную катушку с «фокусированным» магнитным полем, Радда и Гадан в сотрудничестве с исследователями из Oxford Research Systems, где создаются новые спектрометры, смогли получить сигналы ЯМР фосфора-31 для печени живой крысы, исключив сигналы окружающей ее мышечной ткани. Они установили, что эти сигналы связаны именно с печенью, поскольку в спектрах не было пиков креатинфосфата, которого много в мышцах, но нет в печени. Совсем недавно Радда, работая совместно с клиницистами под руководством



ВЛИЯНИЕ ГЛЮКОЗЫ на соединения, содержащие фосфор, у бактерий *Escherichia coli* проявилось в этих спектрах ЯМР фосфора-31, которые были получены до того, как в клетки ввели глюкозу (а), и потом в интервале между 4 и 6 мин после поступления в них глюкозы (б). Во втором спектре наблюдается расщепление пика фосфата. По положениям двух полученных пиков можно установить, что внутренняя среда клетки стала более щелочной, чем раствор, в котором эти клетки суспендированы. Остальные пики относятся к внутриклеточным веществам: АТР, АТР и фруктозо-1,6-бисфосфату (ФБФ).



ВНУТРИКЛЕТОЧНЫЕ МЕХАНИЗМЫ вызывают изменения в спектрах ЯМР (см. рисунок сверху). При метаболизме глюкозы образуются ФБФ и молочная кислота. На последней стадии гликолиза за счет ФБФ образуется АТР. Энергия АТР расходуется в реакции, катализируемой мембранным ферментом АТР-азой, на выброс протонов из клетки. В результате создается протонный градиент, и внутренняя среда становится более щелочной по сравнению с окружением клетки. При обратной реакции, катализируемой АТР-азой, протоны возвращаются в клетку и дают энергию для образования АТР. Внизу показан механизм выведения протонов.

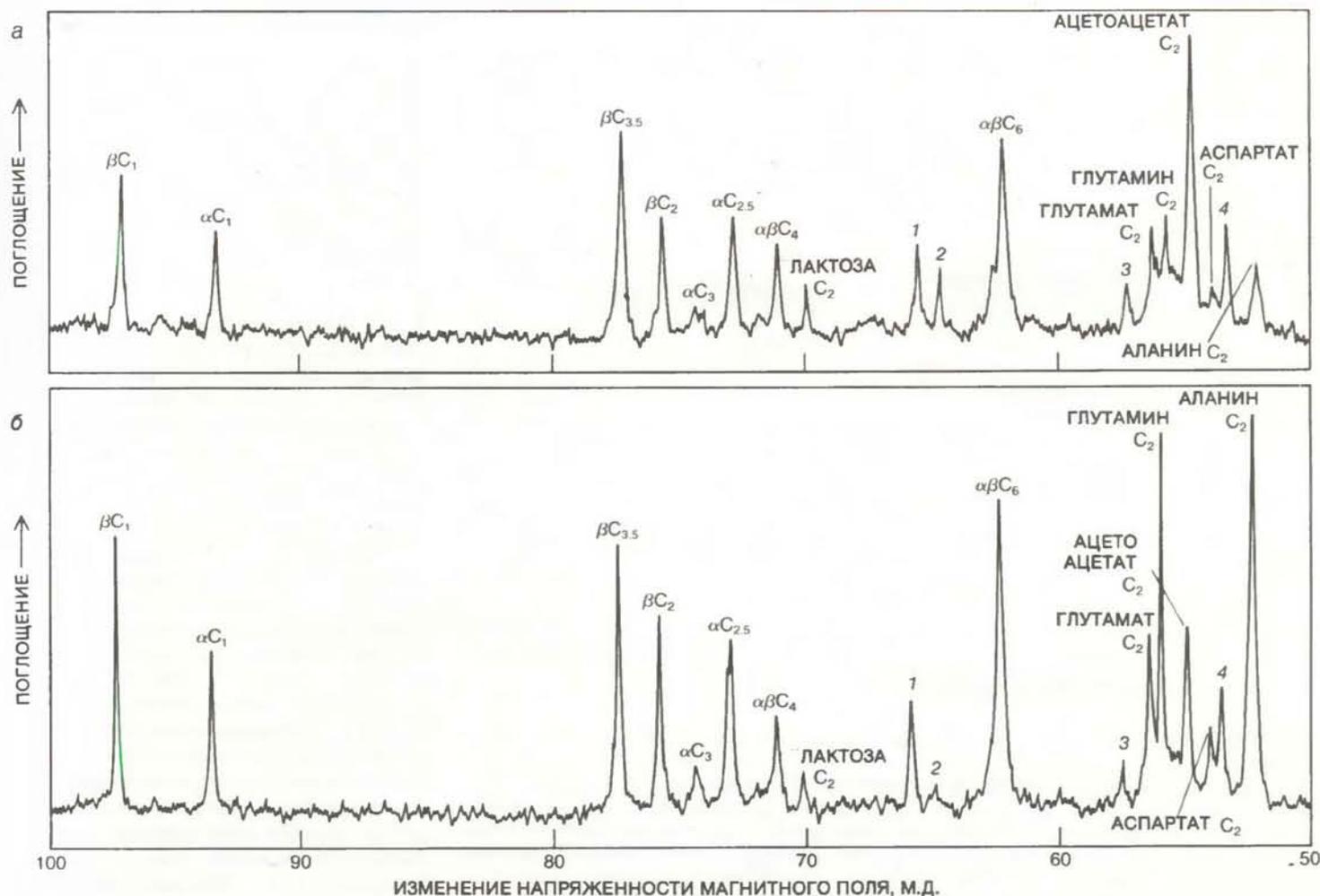


Б. Росса из Оксфорда, сообщил об использовании ЯМР-спектроскопии для диагноза одного заболевания у человека. Пациенту в возрасте 51 года поставили диагноз — синдром Макардла. Причины синдрома Макардла — генетические нарушения; при этом заболевании не функционирует фермент фосфорилаза. Фосфорилаза участвует в расщеплении гликогена до глюкозы. Страдающие этим заболеванием люди устают от малейшего мышечного усилия.

Чтобы поставить диагноз, врачи попросили пациента поместить руку в спектрометр и сняли спектр фосфора-31 работающих мышц предплечья. Ранее было известно, что в работающих мышцах здорового человека рН сначала снижается от 7,0 до 6,4, а потом, когда нагрузка снята, постепенно возвращается к значению 7,0. В мышцах больного рН наоборот повысился от 7,1 до 7,2. Кроме того, когда пациент напрягал мышцы, в спектре ЯМР пик креатинфосфата заметно уменьшался.

Объяснение этих явлений заключается в отсутствии фосфорилазной активности, из-за чего мышцы пациента имеют низкую концентрацию глюкозы, необходимой для гликолиза. В результате гликолиза образуется молочная кислота; по мере ее накопления рН внутри нормальных мышечных клеток снижается. При гликолизе также накапливается АТФ, энергия которого в дальнейшем может использоваться для совершения механической работы. В мышцах больного синдромом Макардла необходимый АТФ синтезировался за счет креатинфосфата. Этот диагноз — отсутствие активности фосфорилазы — затем подтвердился при химическом анализе материала биопсии мышцы. Росс и его коллеги подчеркивают, что неинвазивное обследование методом ЯМР может помочь не только при диагнозе таких болезней,

ГЛИКОЛИЗ — последовательность химических реакций превращения глюкозы в клетках. Эту последовательность можно наблюдать в спектрах ЯМР, добавляя в питательную среду, в которой живут клетки, глюкозу с углеродной меткой. В данном случае молекула глюкозы была помечена в положении С₁ (цветной кружок). Затем в ходе гликолиза метка перешла в положение С₁ молекулы ФБФ, а потом — в диоксиацетонфосфат, соединение с тремя атомами углерода. В случае обратной реакции значительная доля меченых атомов попадет в молекулу глицеральдегид-3-фосфата (цветные кружки). В итоге она окажется в положении С₆ молекулы глюкозы. Измерения интенсивности соответствующих пиков углерода-13 в спектрах ЯМР показывают, что «перескок» метки в молекулу ФБФ служит мерой обратного течения гликолиза в клетке.



ТИРЕОИДНЫЙ ГОРМОН в клетках печени крысы увеличивает скорость синтеза глюкозы по пути, являющемуся обращением гликолиза. Один спектр ЯМР (а) представляет собой пики углерода-13 в веществах, которые печеночные клетки синтезируют после того, как крысе дали аланин, меченный углеродом-13 в положении C_3 . Другой спектр получен для

печени крысы, которой вводили тиреоидный гормон, а затем давали меченый аланин (б). Пики углерода-13 в разных положениях для двух форм молекулы глюкозы (α и β) заметно увеличились. Другие пики также изменились. Пики, обозначенные цифрами 1, 2, 3 и 4, еще не идентифицированы.

как синдром Макардла, но и при оценке результатов лечения.

С ПОМОЩЬЮ ЯМР можно детально исследовать гликолитическое расщепление глюкозы в живой клетке. При этом молекула глюкозы, построенная из шести атомов углерода, превращается в две молекулы молочной кислоты, в которых по три атома углерода. Как я уже отметил, закисление внутриклеточной среды проявляется в спектрах ЯМР фосфора-31 как смещение сигнала фосфата соответственно снижению значения рН.

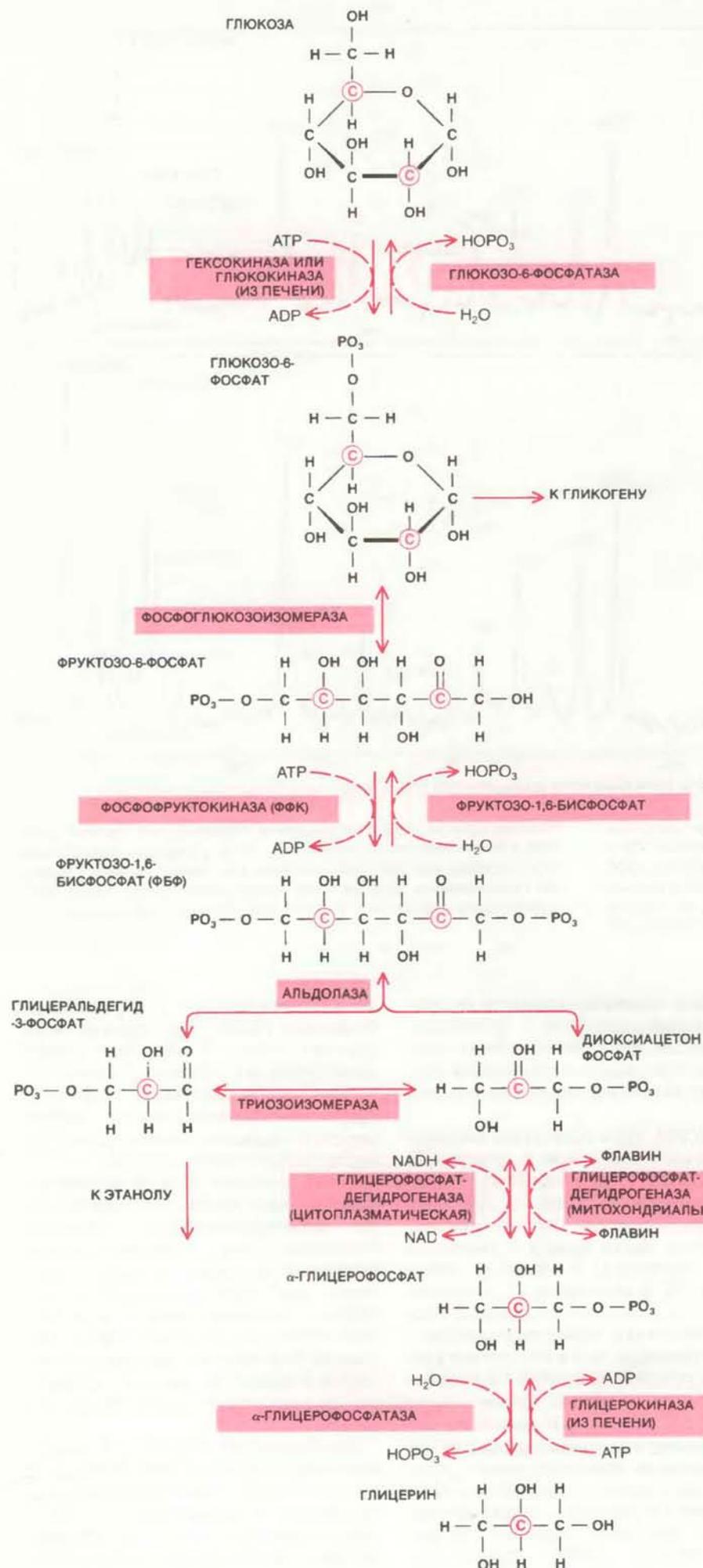
Однако химические превращения глюкозы можно наблюдать непосредственно с помощью спектров ЯМР углерода-13 в клетках, растущих на глюкозе, молекулы которой обогащены изотопом ^{13}C в положении C_1 . Такой метод применил в моей лаборатории в Йельском университете Дж. ден Холландер, продолжая работу, продолженную в сотрудничестве с К. Угурбиллом и Т. Брауном. Целью исследова-

ния было измерение скорости отдельных стадий гликолиза в дрожжевых клетках для того, чтобы потом сопоставить эти данные со свойствами ферментов, катализирующих каждую стадию.

Известно, что в отсутствие кислорода скорость гликолиза в дрожжевых клетках выше, чем в аэробных условиях. Это явление называется эффектом Пастера. Поэтому ден Холландер, Угурбилл и Браун начали с измерения пиков углерода-13 в глюкозе, обогащенной ^{13}C в положении C_1 , которую вводили в суспензию дрожжевых клеток. Результаты измерений однозначно подтвердили, что в отсутствие кислорода глюкоза усваивается и расщепляется вдвое быстрее. Затем возник следующий вопрос: обусловлен ли эффект Пастера изменениями скоростей определенных ферментативных реакций? Один вариант, в частности, стоил проверки. На одном из этапов гликолиза под действием фермента фосфофруктокиназы (ФФК) фруктозо-6-

фосфат превращается в фруктозо-1,6-бисфосфат (ФБФ). Как известно, этот фермент обладает аллостерическими свойствами: его активность зависит не только от концентрации субстрата (фруктозо-6-фосфата), но, по крайней мере *in vitro*, еще от концентраций примерно десяти низкомолекулярных соединений, которые по этой причине называют аллостерическими эффекторами фосфофруктокиназы. Частично благодаря такому изобилию возможных путей регуляции активности фермента уже давно предполагали, что ФФК — ключевой фермент в регуляции обмена веществ живой клетки. Однако не был проведен эксперимент, который показал бы, какие из эффекторов реально влияют на этот фермент в клетке.

Ден Холландер, Угурбилл и Браун использовали спектры ЯМР фосфора-31 для того, чтобы точно определить, что происходит в дрожжевых клетках в присутствии кислорода. Они наблюдали значительное изменение пика P_i . Его



интенсивность уменьшилась почти в 4 раза, а смещение его положения указывало на рост pH внутри клетки от 7,04 до 7,45. В то же время пик фосфора в фруктозо-6-фосфате увеличился в несколько раз, а пики ATP и ADP почти не изменились. Химические измерения активности ФФК, проведенные недавно Дж. ден Холландером и Д. Ребстейном, показали, что активность этого фермента снижается в присутствии кислорода.

СТРАННО, однако, что, судя по спектрам, полученным ден Холландером, концентрация ФБФ внутри клетки остается постоянной, когда скорость его образования значительно уменьшается. Значит, и скорость расщепления ФБФ должна в такой же степени уменьшиться. Содержание ФБФ в клетке можно узнать из спектров ЯМР ^{13}C методом, использующим саму природу реакций гликолиза. Введенная ден Холландером в положение C_1 молекулы глюкозы углеродная метка на первой стадии гликолиза попала прямо в положение C_1 молекулы ФБФ. Затем идет реакция, в которой ФБФ расщепляется на два соединения, содержащих по три атома углерода. Каждое такое соединение может вступить в следующие реакции гликолитического пути. При этом оно либо превращается в другое такое же соединение, либо две его молекулы вновь образуют молекулу ФБФ. В последних реакциях углерод-13 распределяется так, что во вновь образовавшемся ФБФ он попадает в положение C_6 .

Следовательно, для всего гликолитического пути конкуренция между прямыми и обратными реакциями, в которых вновь синтезируется ФБФ, создает распределение меченых атомов углерода между положениями C_1 и C_6 . Если прямые реакции протекают медленно, то времени для образования ФБФ оказывается достаточно. В этом

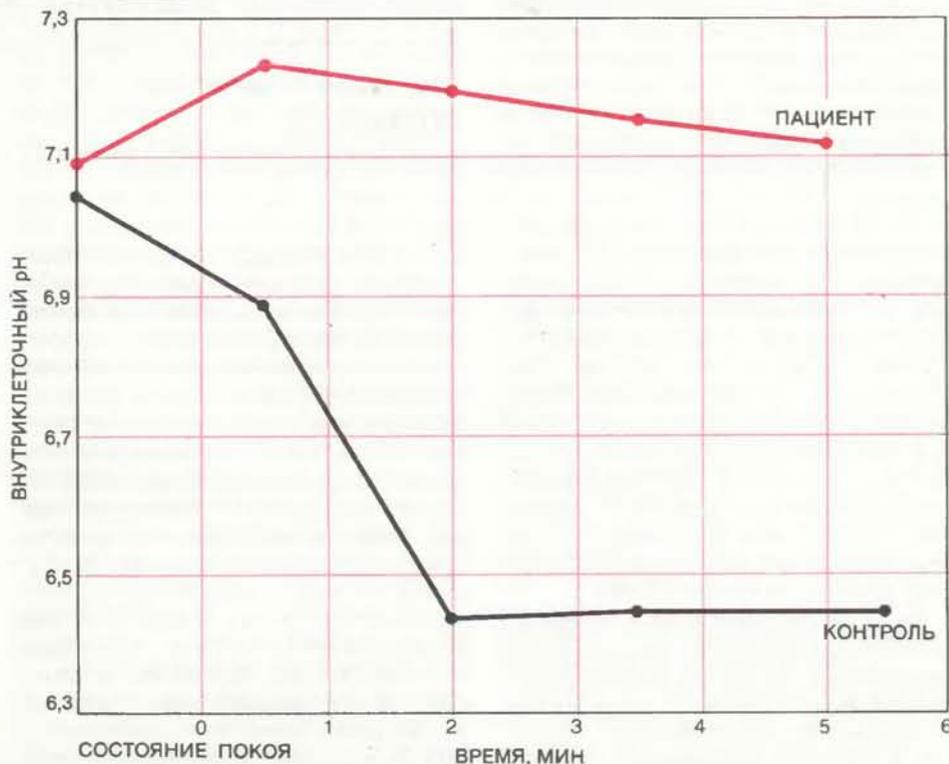
ВВЕДЕНИЕ УГЛЕРОДНОЙ МЕТКИ В МОЛЕКУЛУ ГЛИЦЕРИНА (глицерин — конечный продукт метаболизма глюкозы) позволяет исследовать последовательность реакций глюконеогенеза. Если сначала метка введена в середину молекулы глицерина (выделено цветом), то на конечной стадии она распределяется между положениями C_2 и C_5 молекулы глюкозы. Небольшая часть меченых атомов попадает в положение C_1 (на рисунке не показано), потому что проходит через альтернативный путь — пентозофосфатный. ЯМР-исследования глюконеогенеза показывают, что тиреоидный гормон увеличивает скорость синтеза глюкозы у гипертиреоидных крыс, повышая активность митохондриального фермента — глицерофосфатдегидрогеназы.

случае интенсивность сигнала ЯМР от ^{13}C в положении C_6 должна быть равна интенсивности сигнала для положения C_1 . Если же скорость прямой реакции велика, то времени для того, чтобы углеродная метка «перескочила» в положение C_6 , не хватит и для этого положения пика не будет. По спектрам, полученным ден Холландером, видно, что оксигенация дрожжевых клеток увеличивает вероятность таких «перескоков». Этот автор рассчитал, что в данном случае доля реакций, ведущих к образованию ФБФ, снизилась в несколько раз. Значит, направление процесса регулируется более поздней стадией гликолиза.

Обратные реакции гликолиза изучать значительно труднее, поскольку большинство клеток таким путем осуществляет синтез глюкозы (глюконеогенез), если в этом возникает необходимость. Фруктозо-1,6-бисфосфат — промежуточное звено и гликолиза, и глюконеогенеза. Фермент, воздействующий на ФБФ при гликолизе, — ФФК; фермент, который катализирует обратную реакцию и переводит ФБФ на одну ступень ближе к глюкозе, — фруктозо-1,6-бисфосфатаза. Следует отметить, что при образовании ФБФ с помощью ФФК необходим перенос фосфата с АТФ на фруктозо-6-фосфат. В обратной же реакции фосфат просто отщепляется. Когда реакция идет в обоих направлениях, суммарный результат — гидролиз АТФ, т.е. бесполезный, или холостой, цикл. Известно много таких циклов.

Что заставляет метаболический путь работать вхолостую? Одна из гипотез относительно цикла через ФБФ возникла из известного факта, что ФБФ, подобно многим другим сахарам, может существовать в двух формах (α - и β -формы), которые отличаются только положением связей двух атомов углерода. В смеси этих форм в течение 1 с устанавливается равновесное распределение: 15% молекул находится в α -форме и 85% — в β -форме. Химические исследования показали, что фруктозо-1,6-бисфосфатаза, превращающая ФБФ в глюкозу, действует преимущественно на α -форму. Альдолаза — фермент следующей стадии гликолиза — предпочитает β -форму ФБФ.

В связи с этим было сделано предположение, что в живой клетке регуляция осуществляется через распределение форм ФБФ. Эту гипотезу нельзя было проверить, анализируя ФБФ, экстрагированный из клетки, так как процедура выделения длится более 1 с, т.е. дольше, чем время установления равновесия форм ФБФ. Спектры ЯМР интактных бактерий *E. coli* позволили несколько иначе поставить эксперимент. Ден Холландер, Угурбил и Браун наблюдали пики углерода-13 для α - и β -



ДИАГНОЗ ЗАБОЛЕВАНИЯ пациента удалось установить с помощью ЯМР-спектроскопии группе исследователей под руководством Дж. Радды и Б. Росса из Оксфордского университета. Болезнь — синдром Макардла — проявляется как усталость после малейшего мышечного напряжения и вызвана отсутствием активности фосфоорилазы — фермента, который участвует в усвоении глюкозы в мышцах. Продукты превращения глюкозы снижают pH клетки. В спектрах ЯМР, полученных для руки пациента, картина иная: для мышц, совершивших работу, положение пиков фосфата совсем не изменилось по сравнению с неработавшими мышцами. На время измерений пациенту наложили жгут, чтобы в мышцы не поступала глюкоза артериальной крови.

форм ФБФ в клетках в то время, когда они перерабатывали глюкозу. Результаты показали, что поддерживалось равновесное распределение ФБФ. Значит, направление реакции регулируется как-то иначе.

У МЛЕКОПИТАЮЩИХ конечный продукт гликолиза — молочная кислота — уносится кровотоком в печень вместе с конечными продуктами обмена жиров (к ним относится, например, глицерин). В печени эти отходы накапливаются и вновь превращаются в глюкозу. Поэтому печень стала объектом многочисленных исследований глюконеогенеза. Парадоксально, но данных даже слишком много: изучали и целую печень, и ее срезы, и отдельные печеночные клетки; открыли несколько путей регуляции метаболизма, но ясного представления о том, как это происходит в живом организме, нет. Ниже я перечислю несколько предложенных механизмов регуляции, чтобы показать преимущества ЯМР-исследований в этой области.

Во первых, скорость образования глюкозы в печени зависит от концентрации субстратов глюконеогенеза.

При повышении концентрации молочной кислоты в печени ускоряется синтез глюкозы. Во-вторых, скорость синтеза глюкозы зависит от питания организма. У животных, лишенных глюкозы, возрастает концентрация ферментов ее синтеза. В-третьих, на активность ферментов глюконеогенеза влияет фосфат. Известно, что фосфорилирование (оно находится под контролем быстродействующих гормонов типа глюкагона) активирует клеточные ферменты. В-четвертых, некоторые ферменты глюконеогенеза регулируются с помощью эффекторов. В-пятых, содержание некоторых ферментов зависит еще от медленно действующих гормонов, к которым, например, относятся тиреоидные гормоны (так называются гормоны щитовидной железы).

Ш. Коэн из Bell Laboratories использовала спектры ЯМР соединений с углеродными метками для того, чтобы проследить глюконеогенез в интактной печени крысы. В одном из своих экспериментов она расшифровала путь синтеза глюкозы из глицерина — он включает шесть реакций. Обнаружена разница между нормальными крысами и крысами, у которых создали картину

гипертрофии щитовидной железы, давая большие дозы тиреоидного гормона. У таких зверьков глюкоза синтезировалась вдвое быстрее, чем в норме, а содержание α -глицерофосфата (глицерофосфат — продукт следующей стадии) оказалось в два с половиной раза меньше.

За α -глицерофосфат как субстрат конкурируют два фермента. Оба называются глицерофосфатдегидрогеназой, но один находится внутри клеточных органелл — митохондрий, а другой — в цитоплазме клетки. Коэн подсчитала, что под влиянием тиреоидного гормона митохондриальный фермент расходует в четыре раза больше субстрата, чем цитоплазматический, что хорошо согласуется с данными о содержании и активности этих двух ферментов, полученными при анализе экстрактов клеток печени.

Были и некоторые необъяснимые результаты. Например, судя по спектрам, снятым Ш. Коэн, гормон щитовидной железы в несколько раз ускоряет «холостой» глюконеогенез. Вероятно, вследствие длительного действия гормона изменяются концентрации ферментов.

ПОСЛЕДНИЙ эксперимент, проведенный учеными из Oxford Research Systems и Йельского университета по предложению Дж. Элджера из моей лаборатории, демонстрирует возможности ЯМР-спектроскопии. Экспериментаторы дали крысе глюкозу, меченную атомами ^{13}C . Затем по спектру ЯМР они наблюдали, как глюкоза исчезает из желудка зверька. В течение нескольких часов в печени крысы росла концентрация гликогена (в печени глюкоза запасается в виде гликогена). Наконец, когда был переработан меченый гликоген, соответствующий пик исчез. Применение ЯМР-спектроскопии позволило проследить метаболизм непосредственно в организме животного. С помощью ЯМР можно будет определить, как гормоны, питание и заболевания влияют на биохимические процессы. Учитывая короткий срок, в течение которого ЯМР-спектроскопию применяют для изучения метаболизма, можно надеяться, что в ближайшем будущем использование этого метода коренным образом изменит наши представления о биохимических процессах в живых организмах.

Что дает снижение стоимости запоминающих устройств

В ЭЛЕКТРОННЫХ вычислительных машинах первых выпусков пространство, отводимое для хранения информации, было дефицитным, и поэтому программы записывались в самой сжатой форме. Когда стоимость памяти в ЭВМ снизилась, требование к компактности программ стало менее жестким. Более существенными теперь являются другие показатели — быстродействие программы и простота, с которой она может быть написана, понята и перестроена. Недавно в журнале «Computer» была опубликована статья сотрудника фирмы Servio Logic Corp. (Портленд, шт. Орегон) Дж. Коупленда, в которой автор рассматривает влияние дальнейшего снижения стоимости памяти и, в частности, возможные изменения, которые могут произойти в вычислительной технике, если хранение информации будет обходиться бесплатно.

В настоящее время самое широкое распространение получили запоминающие устройства на магнитных лентах и дисках. Они являются самым дешевым видом машинной памяти. На них можно безгранично долго хранить большие объемы информации, как, например, сведения о заработной плате и о сотрудниках фирмы. При необходимости любые данные можно извлечь и передать в оперативную память ЭВМ. Именно так строятся все современные «базы данных», в которых информация периодически добавляется, изменяется и стирается. Самое существенное изменение, которое произойдет с появлением бесплатных запоминающих устройств, как считает Коупленд, заключается в том, что никакая информация никогда не будет стираться из памяти системы.

Может показаться, что возможность стирать записанную информацию дает определенные преимущества, и не только в смысле многократного использования носителя для записи новых данных. Это особенно удобно в тех случаях, когда в записанной информации обнаруживается ошибка. Исключить ее очень просто — на место прежних данных записываются другие, уже исправленные. Однако, как подчеркивает Коупленд, это таит в себе некоторую опасность. Предположим, была допущена ошибка при записи суммы заработной платы сотрудника фирмы. Ее легко устранить указанным способом. Но на основе этой суммы уже могли быть рассчитаны пенсион-

ные отчисления, страховые премии, налоговые вычеты и т.д.

Запрет на стирание исключает возможность «вернуться в прошлое и изменить ход истории», но при этом возникают другие неудобства. Всякий раз, когда вносится исправление, появляется новая запись, а старая сохраняется и, таким образом, производится накопление вариантов записи. Для их идентификации Коупленд предлагает приписывать каждому варианту записи два числовых индекса. Одно число, называемое «заменителем», остается неизменным для всех версий, а другое служит как «временной штамп» и указывает на срок, когда данная версия была занесена в память. Коупленд отмечает, что принцип сохранения всех записанных в памяти данных, когда ошибочные сведения могут быть исправлены, но не уничтожены, не является новым. Он давно используется в бухгалтерском деле, где существует правило: «При всякой новой записи в рабочую книгу старые данные сохранять».

Стоимость запоминающих устройств, используемых в ЭВМ, конечно, никогда не упадет до нуля, но она все же может стать настолько малой, что позволит постоянное хранение информации. Отметим, кстати, что сегодня уже существует по крайней мере один вид весьма дешевой памяти, который как представляется, лучше всего подходит для реализации рассматриваемого принципа. Речь идет об оптических дисках. Информация на них записывается в виде микроскопических канавок, прорезаемых в поверхностном слое носителя лазерным лучом. Невозможность стирания канавок считалась одним из недостатков записи информации на оптических дисках, но с точки зрения идеи Коупленда это свойство можно рассматривать как их достоинство.

Синтез сверхтяжелых элементов

СООБЩЕНИЕ о синтезе нового тяжелого элемента с атомным номером 109 в периодической таблице вызвало большой интерес среди физиков-ядерщиков, надеющихся получить ряд стабильных сверхтяжелых элементов с атомными номерами выше 114-го. Единственный атом 109-го элемента был идентифицирован среди продуктов необычно «мягкого» ядерного столкновения в эксперименте, проведенном летом 1981 г. в лаборатории Общества по исследованию тяжелых ионов в Дармштадте (ФРГ). Группой

экспериментаторов руководили П. Амбрустер и Г. Мюнценберг.

Новый элемент был получен на лабораторном линейном ускорителе тяжелых ионов Упиас методом так называемого «холодного синтеза». Пучок ускоренных ионов железа-58 направили на тонкую фольгу из висмута-209. В принципе, столкновение ядра железа, содержащего 58 нуклонов (26 протонов и 32 нейтрона), с ядром висмута, состоящего из 209 нуклонов (83 протона и 126 нейтронов), должно привести к образованию ядра с 267 нуклонами (109 протонов и 158 нейтронов), но в строго контролируемых условиях. В таком столкновении запас энергии должен быть достаточным для слияния ядер, но не слишком большим, чтобы они тотчас же не разлетелись в разные стороны.

Расчеты показали, что даже в строго контролируемых условиях «холодного слияния» железа-58 с висмутом-209 может происходить крайне редко — один раз на каждые 100 млрд. ядерных столкновений. Амбрустер, Мюнценберг и их коллеги планировали для получения доказательств существования 109-го элемента десятидневную работу дармштадтского ускорителя. 29 августа, в последний день намеченного срока, детектор зарегистрировал ожидаемое событие. Четыре измерения свойств нового атома и продуктов его распада подтвердили, что время жизни ядра 109-го элемента составило примерно 5 миллисекунд.

Этот синтез при условии, что его можно повторить, устанавливает новый рекорд в ядерной физике: получен самый тяжелый элемент. Известны природные элементы с атомными номерами до 92-го, а искусственные — до 106-го — открыты ранее. В 1981 г. Амбрустер и Мюнценберг идентифицировали 107-й элемент вслед за сообщением об этом же физиков из Объединенного института ядерных исследований в Дубне, СССР*. (108-й элемент, по-видимому, должен быть менее стабильным, чем 107-й и 109-й.)

Несомненный успех метода холодного синтеза стимулировал попытки применить его для получения сверхтяжелых элементов, поиск которых давно ведется. Возможность существования таких элементов вытекает из модели ядерных оболочек, согласно которой нуклоны последовательно заполняют оболочки, аналогичные электронным (определяющим химические свойства атомов). На каждой оболочке может находиться определенное число нуклонов, а полностью заполненные оболоч-

ки соответствуют устойчивым ядрам. Предполагают, что в элементах от 114-го до 126-го заполненные нуклонные оболочки должны обуславливать высокую стабильность этих гипотетических ядер. Элементы, занимающие такой «остров стабильности», по-видимому, будет легче обнаружить, чем элементы с атомными номерами от 109-го до 114-го.

Ученые из Дармштадта и группа сотрудников лаборатории Лоуренса в Беркли во главе с ветераном в области синтеза тяжелых элементов А. Гиорсо объединили усилия в надежде получить методом холодного синтеза элемент с атомным номером 116. Проводимые в настоящее время эксперименты по бомбардировке мишени из кюрия-248 ускоренными ионами кальция-48 на ускорителе тяжелых ионов Super HIAC в Беркли идут так же успешно, как и в Дармштадте. А. Гиорсо, когда-то уже заключавший со своим коллегой Г. Сиборгом пари на 100 долларов, что сверхтяжелые элементы никогда не получат, сейчас считает, что вероятность успешного исхода в этих экспериментах не превышает 1 %.

Источник гамма-излучения в центре Галактики

ЦЕНТР нашей Галактики скрывают звездные облака, скопления газа и пыли, но в последнее время появилась информация, ведущая к разгадке его природы. Обнаружено, что центр Галактики испускает гамма-лучи — электромагнитное излучение самой высокой энергии. В полученном спектре наблюдается узкая линия, которая соответствует фотонам с одинаковой энергией (0,511 МэВ), эквивалентной массе электрона или позитрона («анти-электрона»). Значит, в основном эти гамма-кванты рождаются в результате аннигиляции электрон-позитронных пар. Излучение центра Галактики было открыто группой исследователей, возглавляемой М. Левенталем (Bell Laboratories) и К. Мак-Колумом (Sandia National Laboratories), с помощью гамма-телескопа, поднятого на аэростате, когда он находился над г. Алис-Спрингс (Австралия).

Последующие наблюдения показали, что поток гамма-излучения изменяется во времени, точнее, наблюдается его заметный спад. Так, согласно измерениям, выполненным группой ученых из Лаборатории реактивного движения с помощью гамма-телескопа, установленного на борту спутника HEAO-3 (High Energy Astronomical Observatory), с сентября 1979 по март 1980 г. поток уменьшился на две трети, а позднее (21 ноября 1981 г.) Левенталю с сотрудни-

ками вообще не удалось зарегистрировать гамма-излучение. Последний результат подтвердили исследователи из Годдардовского центра космических полетов НАСА и Центра ядерных исследований в Сакле (Франция), которые пытались зарегистрировать гамма-излучение 20 ноября 1981 г.

В журнале "The Astrophysical Journal" Левенталь с сотрудниками так интерпретирует совокупность полученных данных: «По-видимому, поток от источника гамма-излучения достиг самого низкого уровня во время измерений на HEAO-3 в марте 1980 г. и оставался на этом уровне по ноябрь 1981 г.» И далее: «Вероятно, характерное время изменения потока гамма-излучения не превышает шести месяцев». По продолжительности вариации потока можно оценить предельный размер источника. «Это относительно компактный объект» в масштабе Галактики; его диаметр, по-видимому, не больше одного светового года.

Может ли быть источником гамма-излучения черная дыра? Левенталь и его сотрудники ссылаются на наблюдения в инфракрасном излучении, из которых следует, что в пределах области радиусом 10 световых лет от центра Галактики содержатся облака ионизованного газа. Судя по скоростям движения этих облаков, они обращаются вокруг сверхмассивного центрального объекта. По-видимому, поток позитронов выбрасывается из горячего газового диска, окружающего черную дыру. При прохождении позитронов сквозь облака ионизованного вещества сильно возрастает вероятность их столкновений с электронами, и в результате аннигиляции электрон-позитронных пар образуются гамма-кванты.

* О работах советских ученых по синтезу сверхтяжелых элементов см: «Природа», 1977, № 6, с. 8 — 19; «Наука и жизнь», 1977, № 4, с. 66 — 67. — Прим. ред.

Физические процессы в органных трубах

*Величественное звучание органа создается
благодаря взаимодействию строго синхронизированных
по фазе воздушной струи, проходящей через разрез в трубе,
и воздушного столба, резонирующего в ее полости*

НЕВИЛЬ Х. ФЛЕТЧЕР И СУСАННА ТУЭЙТС

НИ ОДИН музыкальный инструмент не может сравниться с органом по силе, тембру, диапазону, тональности и величественности звучания. Подобно многим музыкальным инструментам, устройство органа постоянно совершенствовалось благодаря усилиям многих поколений искусных мастеров, медленно накапливавших опыт и знания. К концу XVIII в. орган в основном приобрел свою современную форму. Два наиболее выдающихся физика XIX в. Герман фон Гельмгольц и лорд Рэлей выдвинули противоположные теории, объясняющие основной механизм образования звуков в органных трубах, но из-за отсутствия необходимых приборов и инструментов их спор так и не был решен. С появлением осциллографов и других современных приборов стало возможным детальное изучение механизма действия органа. Оказалось, что как теория Гельмгольца, так и теория Рэрея справедливы для определенных величин давления, под которым воздух нагнетается в органную трубу. Далее в статье будут изложены результаты последних исследований, которые во многом не совпадают с объяснением механизма действия органа, приводимым в учебниках.

Трубки, вырезанные из камыша или других растений с полым стеблем, были, вероятно, первыми духовыми музыкальными инструментами. Они издадут звуки, если дуть поперек открытого конца трубки, или дуть в трубку, вибрируя губами, или, защемяв конец трубки, вдвухать воздух, заставляя вибрировать ее стенки. Развитие этих трех видов простейших духовых инструментов привело к созданию современной флейты, трубы и кларнета, из которых музыкант может извлекать звуки в довольно большом диапазоне частот.

Параллельно создавались и такие инструменты, в которых каждая трубка предназначалась для звучания на одной определенной ноте. Простейший из таких инструментов — это свирель (или «флейта Пана»), которая обычно имеет около 20 трубок различной дли-

ны, закрытых с одного конца и издающих звуки, если дуть поперек другого, открытого конца. Самым большим и сложным инструментом этого типа является орган, содержащий до 10 000 труб, которыми органист управляет при помощи сложной системы механических передач. Орган ведет свое происхождение из глубокой древности. Глиняные фигурки, изображавшие музыкантов, играющих на инструменте из многих труб, снабженных мехами, были изготовлены в Александрии еще во II в. до н.э. К X в. орган начинает использоваться в христианских церквях, и в Европе появляются написанные монахами трактаты об устройстве органов. По преданию, большой орган, построенный в X в. для Винчестерского собора в Англии, имел 400 металлических труб, 26 мехов и две клавиатуры с 40 клавишами, где каждая клавиша управляла десятью трубами. На протяжении последующих столетий устройство органа совершенствовалось в механическом и музыкальном отношении, и уже в 1429 г. в Амьенском соборе был построен орган, имевший 2500 труб. В Германии к концу XVII в. органы уже приобрели свою современную форму.

ТЕРМИНЫ, применяемые для описания устройства органа, отражают их происхождение от трубчатых духовых инструментов, в которые воздух вдвухался ртом. Трубы органа сверху открыты, а снизу имеют суженную конусообразную форму. Поперек суженной части, над конусом, проходит «ротик» трубы (разрез). Внутри трубы помещен «язычок» (горизонтальное ребро), так что между ним и нижней «губой» образуется «лабиальное отверстие» (узкая щель). Воздух нагнетается в трубу большими мехами и поступает в ее конусообразное основание под давлением от 500 до 1000 паскалей (от 5 до 10 см.вод.ст.). Когда при нажатии соответствующей педали и клавиши воздух входит в трубу, он устремляется вверх, образуя при выходе из лабиальной щели широкую плоскую струю.

Струя воздуха проходит поперек разреза «ротика» и, ударяясь о верхнюю губу, взаимодействует с воздушным столбом в самой трубе; в результате создаются устойчивые колебания, которые и заставляют трубу «говорить». Сам по себе вопрос, каким образом происходит в трубе этот внезапный переход от молчания к звучанию, очень сложен и интересен, но в данной статье он не рассматривается. Разговор в основном будет идти о процессах, которые обеспечивают непрерывное звучание органных труб и создают их характерную тональность.

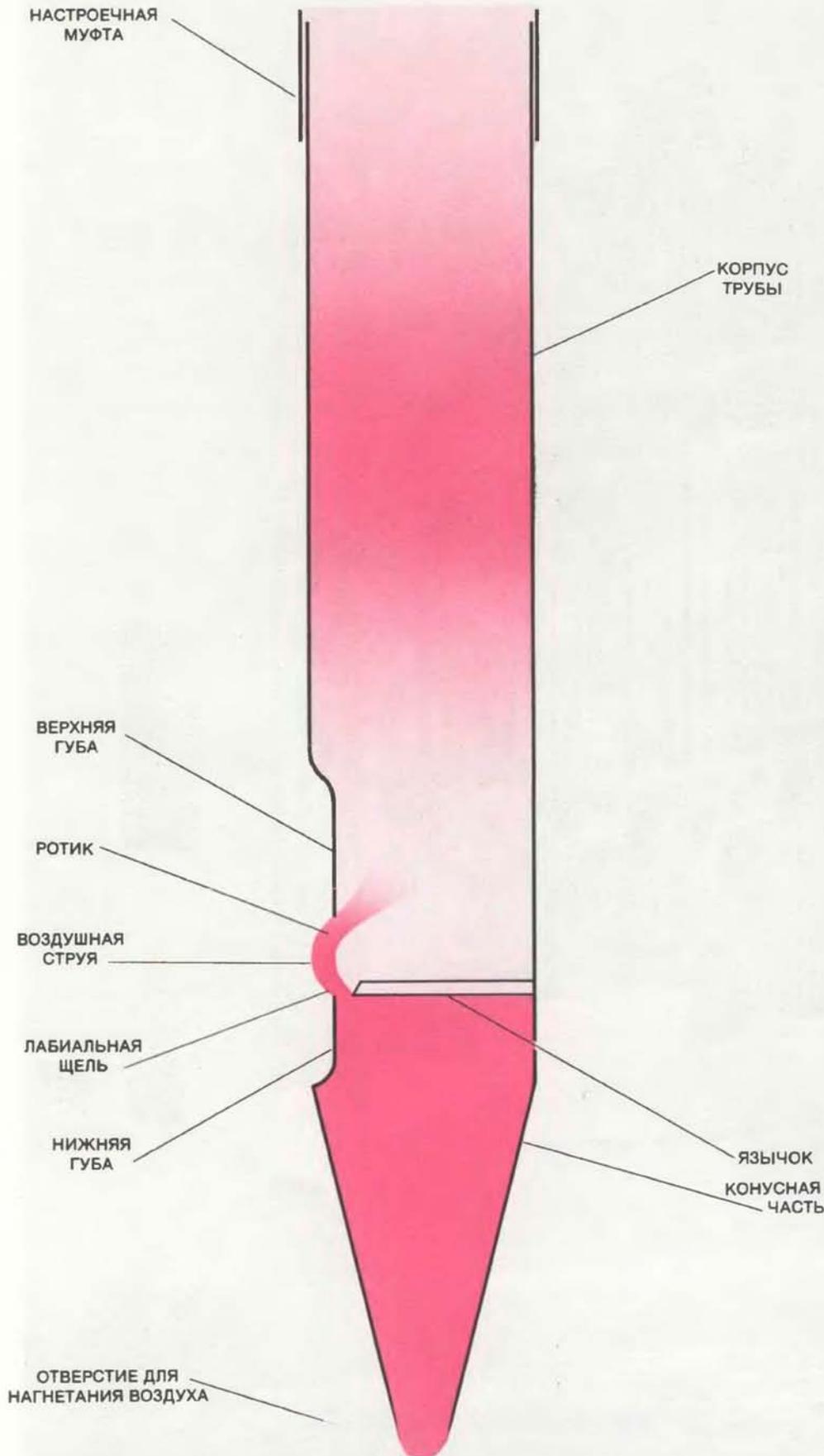
Может показаться, что задача описания воздушной струи, порождающей и сохраняющей звучание органа, полностью относится к теории потоков жидкостей и газов. Выяснилось, однако, что весьма трудно теоретически рассмотреть движение даже постоянного, плавного, ламинарного потока, что же касается полностью турбулентной струи воздуха, которая движется в органной трубе, то ее анализ невероятно сложен. К счастью, турбулентность, представляющая собой сложный вид движения воздуха, в действительности упрощает характер воздушного потока. Если бы этот поток был ламинарным, то взаимодействие струи воздуха с окружающей средой зависело бы от их вязкости. В нашем случае турбулентность заменяет вязкость в качестве определяющего фактора взаимодействия в прямой зависимости от ширины воздушного потока. При строительстве органа особое внимание уделяется тому, чтобы воздушные потоки в трубах были полностью турбулентны, что достигается с помощью мелких нарезок по кромке язычка. Как ни удивительно, в отличие от ламинарного турбулентный поток устойчив и может быть воспроизведен.

Полностью турбулентный поток постепенно смешивается с окружающим воздухом. Процесс расширения и замедления при этом сравнительно несложен. Кривая, изображающая изменение скорости потока в зависимости от расстояния от центральной плоско-



ОРГАН, установленный в 1979 г. в концертном зале Сиднейского оперного театра в Австралии, является самым большим и технически совершенным органом в мире. Спроектирован и построен Р. Шарпом. В нем имеется около 10 500 труб, управляемых с помощью механической передачи пя-

тью ручными и одной ножной клавиатурами. Орган может управляться автоматически магнитной лентой, на которой в цифровой форме ранее было записано исполнение музыканта.



ОРГАННАЯ ТРУБА возбуждается воздухом, поступающим в ее нижний конец и образующим струю при прохождении через щель между нижней губой и язычком. В разрезе струя взаимодействует с воздушным столбом в трубе у верхней губы и проходит то внутри трубы, то вне ее. В воздушном столбе создаются установившиеся колебания, заставляющие трубу звучать. Давление воздуха, изменяющееся по закону стоячей волны, показано цветной штриховкой. На верхний конец трубы насаживается съемная муфта или заглушка, которые позволяют при настройке слегка изменять длину воздушного столба.

сти его сечения, имеет вид перевернутой параболы, вершина которой соответствует максимальному значению скорости. Ширина потока возрастает пропорционально расстоянию от лабиальной щели. Кинетическая энергия потока остается неизменной, поэтому уменьшение его скорости пропорционально корню квадратному из расстояния от щели. Эта зависимость подтверждается как расчетами, так и результатами эксперимента (при учете небольшой области перехода вблизи лабиальной щели).

В уже возбужденной и звучащей органной трубе воздушный поток попадает из лабиальной щели в интенсивное звуковое поле в прорези трубы. Движение воздуха, связанное с генерацией звуков, направлено через прорезь и, следовательно, перпендикулярно плоскости потока. Пятьдесят лет назад Б. Брауну из колледжа Лондонского университета удалось сфотографировать ламинарный поток задымленного воздуха в звуковом поле. На снимках было отмечено образование извилистых волн, увеличивающихся по мере их продвижения вдоль потока, пока последний не расстался на два ряда вихревых колец, вращающихся в противоположных направлениях. Упрощенная интерпретация этих и подобных им наблюдений привела к неверному описанию физических процессов в органной трубе, которое можно найти во многих учебниках.

Более плодотворный метод изучения действительного поведения воздушной струи в звуковом поле заключается в экспериментировании с отдельно взятой трубой, в которой звуковое поле создается с помощью репродуктора. В результате таких исследований, проведенных Дж. Колтманом в лаборатории компании Westinghouse Electric Corporation и группой с моим участием в Университете Новой Англии в Австралии, были разработаны основы современной теории физических процессов, происходящих в органной трубе. Фактически еще Рэлея дал тщательное и почти полное математическое описание ламинарных потоков вязких сред. Поскольку обнаружилось, что турбулентность не усложняет, а упрощает физическую картину воздушной струи, оказалось возможным использовать метод Рэлея с небольшими изменениями для описания воздушных потоков, экспериментально полученных и исследованных Колтманом и нашей группой.

ЕСЛИ БЫ в трубе не было лабиальной щели, то можно было бы ожидать, что воздушная струя в виде полосы движущегося воздуха просто смешалась бы назад и вперед вместе со всем остальным воздухом в прорези трубы под воздействием акустических колебаний.

В действительности же при выходе струи из щели она эффективно стабилизируется самой щелью. Этот эффект можно сравнить с результатом наложения на общее колебательное движение воздуха в звуковом поле строго сбалансированного смещения, локализованного в плоскости горизонтального ребра. Это локализованное смещение, которое имеет ту же частоту и амплитуду, что и звуковое поле, и в результате создает у горизонтального ребра нулевое смещение струи, сохраняется в движущемся потоке воздуха и создает извилистую волну.

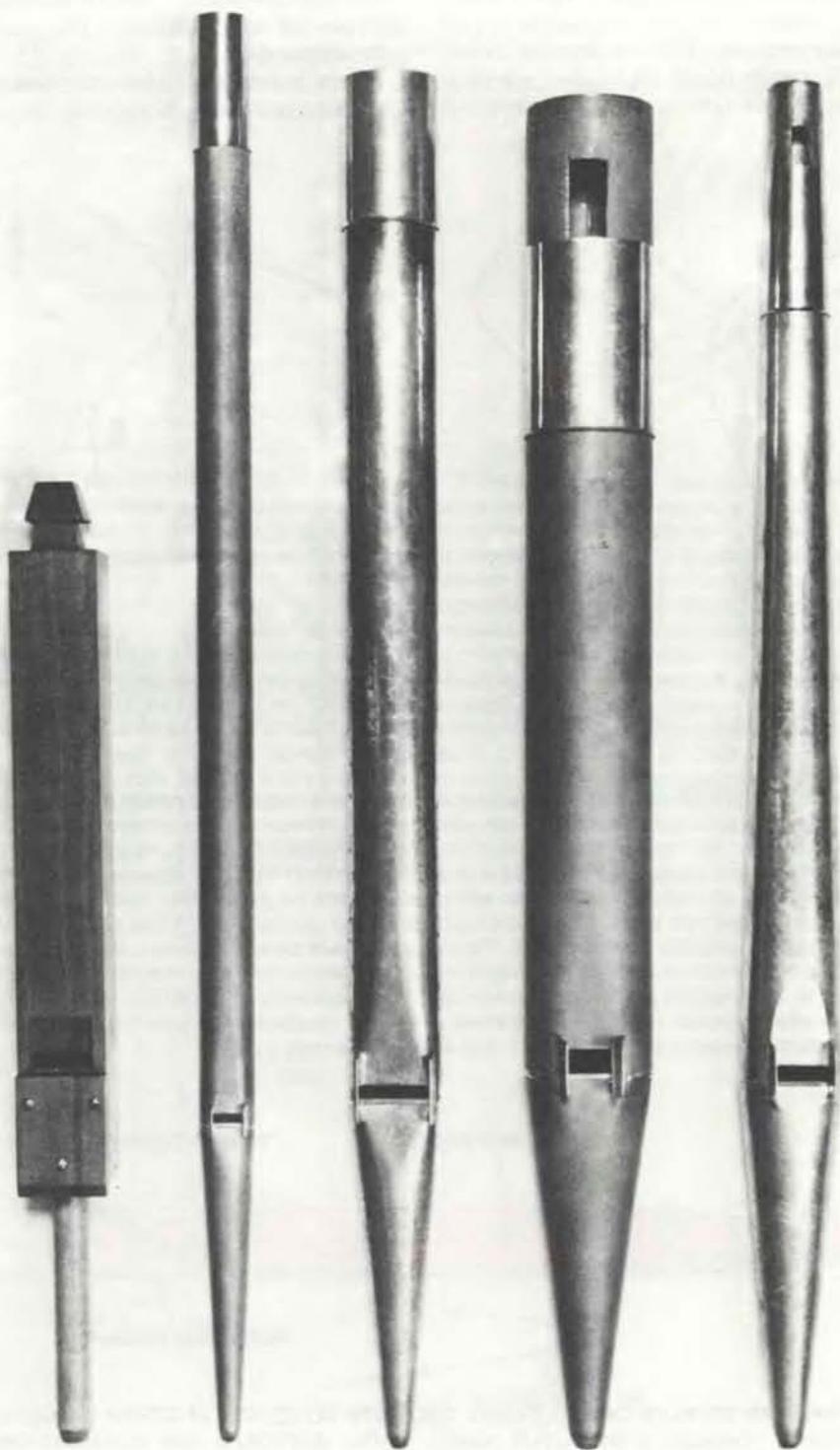
Как показал Рэлей для исследованного им типа струи и как мы всесторонне подтвердили для случая с расходящейся турбулентной струей, волна распространяется вдоль потока со скоростью несколько меньшей половины скорости движения воздуха в центральной плоскости струи. При этом по мере движения вдоль потока амплитуда волны возрастает почти по экспоненте. Как правило, она увеличивается вдвое при перемещении волны на один миллиметр, и ее воздействие быстро становится преобладающим по отношению к простому возвратно-поступательному боковому перемещению, вызываемому звуковыми колебаниями.

Было установлено, что наибольшая скорость увеличения волны достигается в том случае, когда ее длина вдоль потока в шесть раз превышает ширину потока в данной точке. С другой стороны, если длина волны оказывается меньше ширины потока, то амплитуда не увеличивается и волна может вообще исчезнуть. Поскольку воздушная струя расширяется и замедляет движение по мере удаления от щели, распространяясь по длинным потокам с большой амплитудой могут только длинные волны, то есть низкочастотные колебания. Это обстоятельство окажется немаловажным при последующем рассмотрении создания гармонического звучания органных труб.

Рассмотрим теперь воздействие на воздушную струю звукового поля органный трубы. Нетрудно представить, что акустические волны звукового поля в прорези трубы заставляют кончик воздушной струи перемещаться поперек верхней губы прорези, так что струя оказывается то внутри трубы, то вне ее. Это напоминает картину, когда толкают уже раскачивающиеся качели. Воздушный столб в трубе уже колеблется, и, когда порывы воздуха входят в трубу синхронно с колебанием, они сохраняют силу колебаний, несмотря на различные потери энергии, связанные с распространением звука и трением воздуха о стенки трубы. Если же порывы воздуха не совпадают с колебаниями воздушного столба в трубе, они будут подавлять эти колебания и звук будет затухать.

Связь между возникновением акустических колебаний в прорези трубы и моментом поступления очередной порции воздушной струи на верхнюю губу прорези определяется отрезком времени, за который волна в воздуш-

ном потоке проходит расстояние от лабиальной щели до верхней губы. Мастера по изготовлению органов называют это расстояние «подрезом». Если «подрез» велик или давление (а следовательно, и скорость движения) возду-



ПЯТЬ ТРУБ РАЗНОЙ КОНСТРУКЦИИ производят звуки одинаковой высоты, но разного тембра. Вторая труба слева — это дутьсиана, обладающая нежным, тонким звучанием, напоминающим звучание струнного инструмента. Третья труба — открытый диапазон, дающий светлый, звонкий звук, который наиболее характерен для органа. У четвертой трубы звук сильно приглушенной флейты. Пятая труба — Waldflöte («лесная флейта») с мягким звучанием. Деревянная труба слева закрыта заглушкой. Она имеет ту же основную частоту колебаний, что и другие трубы, но резонирует на нечетных обертонах, частоты которых в нечетное число раз больше основной частоты. Длина остальных труб не совсем одинакова, так как для получения одинаковой высоты тона производится «коррекция конца».

ха низкое, то время движения будет большим. И наоборот, если «подрез» мал или давление воздуха высокое, то время движения будет небольшим.

Для того чтобы точно определить фазовое соотношение между колебаниями воздушного столба в трубе и поступлениями порций воздушной струи на внутреннюю кромку верхней губы, необходимо более подробно изучить характер воздействия этих пропорций

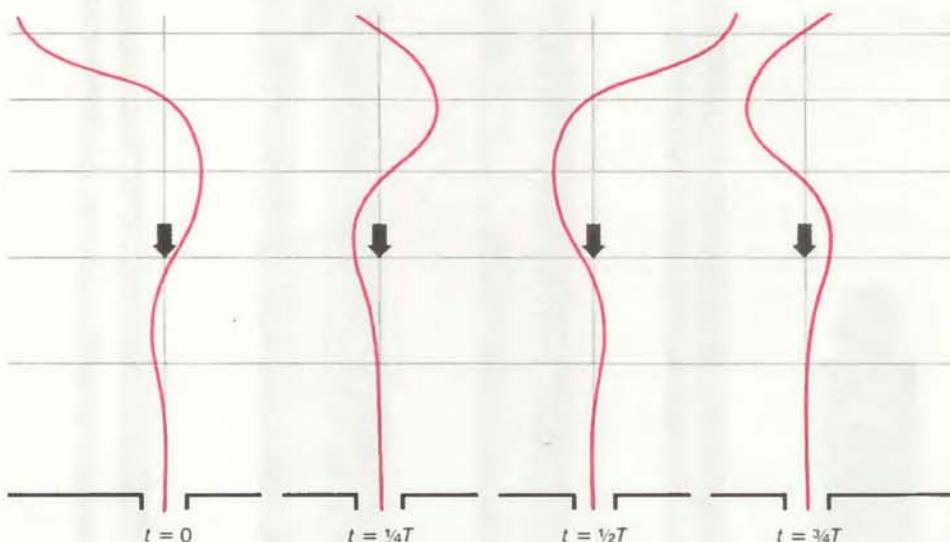
на воздушный столб. Гельмгольц считал, что главным фактором здесь является объем воздушного потока, доставляемого струей. Поэтому для того, чтобы порции струи сообщали как можно больше энергии колеблющемуся воздушному столбу, они должны поступать в тот момент, когда давление у внутренней части верхней губы достигает максимума.

Рэлей выдвигал другое положение. Он доказывал, что, поскольку прорезь

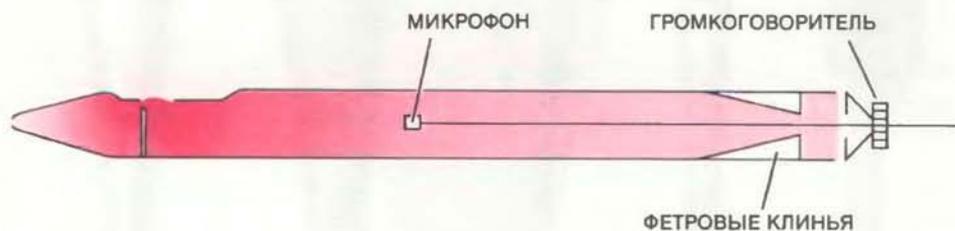
находится сравнительно недалеко от открытого конца трубы, акустические волны у прорези, на которые воздействует воздушная струя, не могут создавать большое давление. Рэлей считал, что воздушный поток, поступая в трубу, фактически наталкивается на преграду и почти останавливается, что быстро создает в нем высокое давление, которое и оказывает воздействие на его движение в трубе. Поэтому, по мнению Рэля, воздушная струя будет передавать максимальное количество энергии в том случае, если она будет поступать в трубу в момент, когда максимальным будет не давление, а сам поток акустических волн. Сдвиг между этими двумя максимумами составляет одну четверть периода колебаний воздушного столба в трубе. Если провести аналогию с качелями, то это различие выражается в толкании качелей, когда они находятся в верхней точке и обладают максимальной потенциальной энергией (по Гельмгольцу), и в момент, когда они находятся в самой нижней точке и обладают максимальной скоростью (по Рэлю).

На протяжении 80 лет задача оставалась нерешенной. Более того, новые исследования фактически не проводились. И лишь теперь она нашла удовлетворительное решение благодаря работам Л. Кремера и Х. Айзинга из Института им. Генриха Герца в Зап. Берлине, С. Элдера из Военно-морской академии США, Колтмана и нашей группы. Коротко говоря, и Гельмгольц, и Рэлей оба были отчасти правы. Соотношение между двумя механизмами воздействия определяется давлением нагнетаемого воздуха и частотой звука, причем механизм Гельмгольца оказывается основным при низких давлениях и высоких частотах, а механизм Рэля — при высоких давлениях и низких частотах. Для органной трубы стандартной конструкции механизм Гельмгольца играет обычно более важную роль.

Колтман разработал простой и эффективный способ изучения свойств воздушной струи, который был несколько модифицирован и усовершенствован в нашей лаборатории. В основе этого метода лежит изучение воздушной струи у прорези органной трубы, когда дальний конец ее закрыт фетровыми или пенопластовыми звукопоглощающими клиньями, не дающими трубе звучать. Затем из репродуктора, помещенного у дальнего конца, вниз по трубе подается звуковая волна, которая отражается от края прорези сначала при наличии нагнетаемой струи, а потом без нее. В обоих случаях падающая и отраженная волны взаимодействуют внутри трубы, создавая стоячую волну. Измеряя с помощью небольшого микрофона-зонда изменения в конфигурации волны при подаче



ФОРМА ВОЗДУШНОЙ СТРУИ показана на рисунке в виде ряда последовательных «кадров» при выходе из лабиальной щели в движущееся акустическое поле, создаваемое в «ротике» трубы воздушным столбом, который резонирует внутри трубы. Периодическое смещение воздуха в разрезе «ротика» создает извилистую волну, движущуюся со скоростью вдвое меньшей скорости движения воздуха в центральной плоскости струи и увеличивающейся по экспоненте, пока ее амплитуда не превысит ширину самой струи. Горизонтальные сечения показывают отрезки пути, которые волна в струе проходит за последовательные четверти периода колебаний T . Секущие линии сближаются с уменьшением скорости струи. В органной трубе верхняя губа расположена в месте, указанном стрелкой. Воздушная струя попеременно выходит из трубы и входит в нее.



ИЗМЕРЕНИЕ ЗВУКОПРОИЗВОДЯЩИХ СВОЙСТВ ВОЗДУШНОЙ СТРУИ можно осуществить, помещая в открытый конец трубы фетровые или пенопластовые клинья, препятствующие звучанию, и создавая звуковую волну небольшой амплитуды с помощью громкоговорителя. Отражаясь от противоположного конца трубы, звуковая волна взаимодействует у разреза «ротика» с воздушной струей. Взаимодействие струи со стоячей волной внутри трубы измеряется с помощью переносного микрофона-тестера. Таким способом удается обнаружить, увеличивает или уменьшает воздушная струя энергию отраженной волны в нижней части трубы. Для того чтобы труба звучала, струя должна увеличивать энергию. Результаты измерения выражаются в величине акустической «проводимости», определяемой как отношение акустического потока на выходе из разреза «ротика» к звуковому давлению непосредственно за резрезом. Кривая значений проводимости при различных сочетаниях давления нагнетания воздуха и частоты колебаний имеет форму спирали, как показано на следующем рисунке.

воздушной струи, можно определить, увеличивает или уменьшает струя энергию отраженной волны.

В наших экспериментах фактически измерялась «акустическая проводимость» воздушной струи, которая определяется отношением акустического потока на выходе из прорези, создаваемого присутствием струи, к акустическому давлению непосредственно внутри прорези. Акустическая проводимость характеризуется величиной и фазовым углом, которые можно представить графически в виде функции частоты или давления нагнетания. Если представить график проводимости при независимом изменении частоты и давления, то кривая будет иметь форму спирали (см. рисунок справа). Расстояние от начальной точки спирали указывает величину проводимости, а угловое положение точки на спирали соответствует запаздыванию фазы извилистой волны, возникающему в струе под воздействием акустических колебаний в трубе. Запаздывание на одну длину волны соответствует 360° по окружности спирали. Вследствие особых свойств турбулентной струи оказалось, что при умножении величины проводимости на квадратный корень из величины давления все величины, измеренные для данной органной трубы, укладываются на одной и той же спирали.

Если давление остается постоянным, а частота поступающих звуковых волн растет, то точки, указывающие величину проводимости, приближаются по спирали к ее середине по часовой стрелке. При постоянной частоте и увеличении давления эти точки удаляются от середины в противоположном направлении.

КОГДА точка величины проводимости находится в правой половине спирали, струя отбирает энергию у потока в трубе, и поэтому происходит потеря энергии. При положении точки в левой половине струя передает энергию потоку и тем самым действует как генератор звуковых колебаний. При положении значения проводимости в верхней половине спирали струя понижает собственную резонансную частоту трубы, а когда эта точка находится в нижней половине, струя повышает собственную резонансную частоту трубы. Величина угла, характеризующего отставание по фазе, зависит от того, по какой схеме — Гельмгольца или Рэлея — осуществляется основное возбуждение трубы, а это, как было показано, определяется величинами давления и частоты. Однако этот угол, отсчитываемый от правой части горизонтальной оси (правая четверть), никогда не бывает значительно больше нуля.

Поскольку 360° по окружности спирали соответствует отставанию по фа-



КРИВАЯ АКУСТИЧЕСКОЙ ПРОВОДИМОСТИ СТРУИ имеет форму спирали. Расстояние от начальной точки указывает величину проводимости, а угловое положение — сдвиг фаз между акустическим потоком на выходе из прорези и звуковым давлением за прорезью. Когда поток совпадает по фазе с давлением, значения проводимости лежат в правой половине спирали и происходит рассеяние энергии струи. Для того чтобы струя генерировала звук, значения проводимости должны находиться в левой половине спирали, что имеет место при компенсации или задержке по фазе движения струи по отношению к давлению за разрезом трубы. В этом случае длина отраженной волны выше длины падающей волны. Величина опорного угла зависит от того, какой из двух механизмов доминирует в возбуждении трубы: механизм Гельмгольца или механизм Рэлея. При проводимости, соответствующей верхней половине спирали, струя понижает собственную резонансную частоту трубы, а когда значение проводимости находится в нижней части спирали, повышает собственную резонансную частоту трубы.

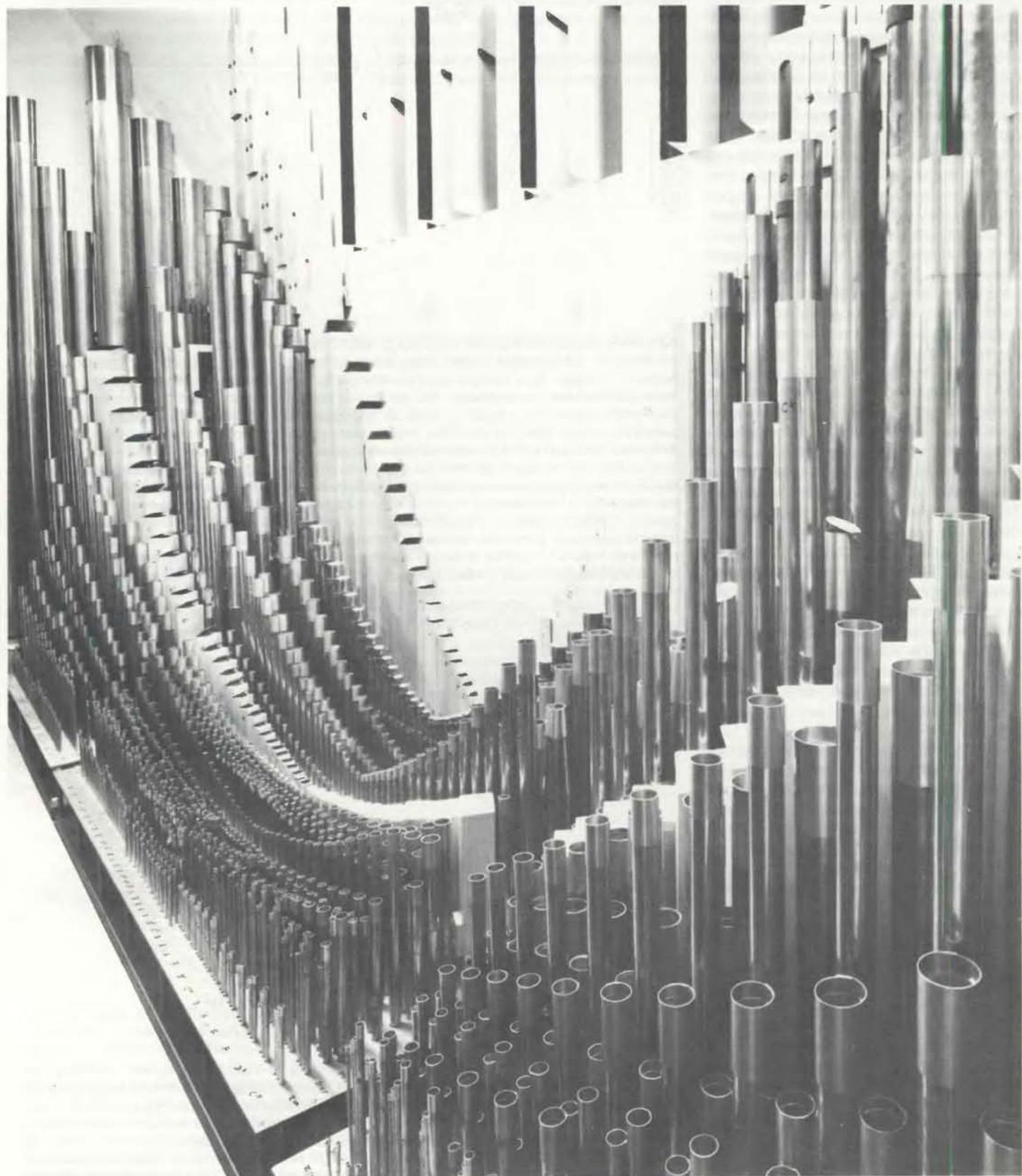


ГРАФИК ДВИЖЕНИЯ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА В ТРУБЕ (пунктирная кривая) при данном отклонении струи несимметричен по отношению к нулевой величине отклонения, поскольку губа трубы устроена так, чтобы разрезать струю не по ее центральной плоскости. Когда отклонение струи происходит по простой синусоиде с большой амплитудой (сплошная кривая черного цвета), воздушный поток, поступающий в трубу (цветная кривая), «насыщается» сначала у одной крайней точки отклонения струи, когда она полностью выходит из трубы. При еще большей амплитуде происходит насыщение воздушного потока и у другой крайней точки отклонения, когда струя полностью входит в трубу. Смещение губы придает потоку асимметричную волновую форму, обертоны которой имеют частоты, кратные частоте отклоняющей волны.

зе, равному длине извилистой волны, распространяющейся вдоль воздушной струи, величины такого отставания от значительной меньшей четверти длины волны до почти трех четвертей ее длины будут лежать на спирали от центральной линии, то есть в той части, где

струя действует как генератор звуковых колебаний. Мы также видели, что при постоянной частоте отставание по фазе является функцией давления нагнетаемого воздуха, от которой зависят как скорость самой струи, так и скорость распространения извилистой

волны вдоль струи. Поскольку скорость такой волны составляет половину скорости струи, которая в свою очередь прямо пропорциональна корню квадратному из величины давления, изменение фазы струи на половину длины волны возможно лишь при зна-



ВНУТРЕННИЙ ВИД ОРГАНА Сиднейского оперного театра. Видны некоторые трубы его 26 регистров. Большая часть труб сделана из металла, некоторые изготовлены из дерева. Длина звучащей части трубы удваивается через каждые 12

труб, а диаметр трубы удваивается примерно через каждые 16 труб. Многолетний опыт мастеров — создателей органов позволил им найти наилучшие пропорции, обеспечивающие устойчивый тембр звучания.

чительном изменении давления. Теоретически давление может меняться в девятикратном размере, прежде чем труба перестает производить звучание на своей основной частоте, если другие условия не нарушаются. На практике, однако, труба начинает звучать на более высокой частоте до достижения указанного высшего предела изменения давления.

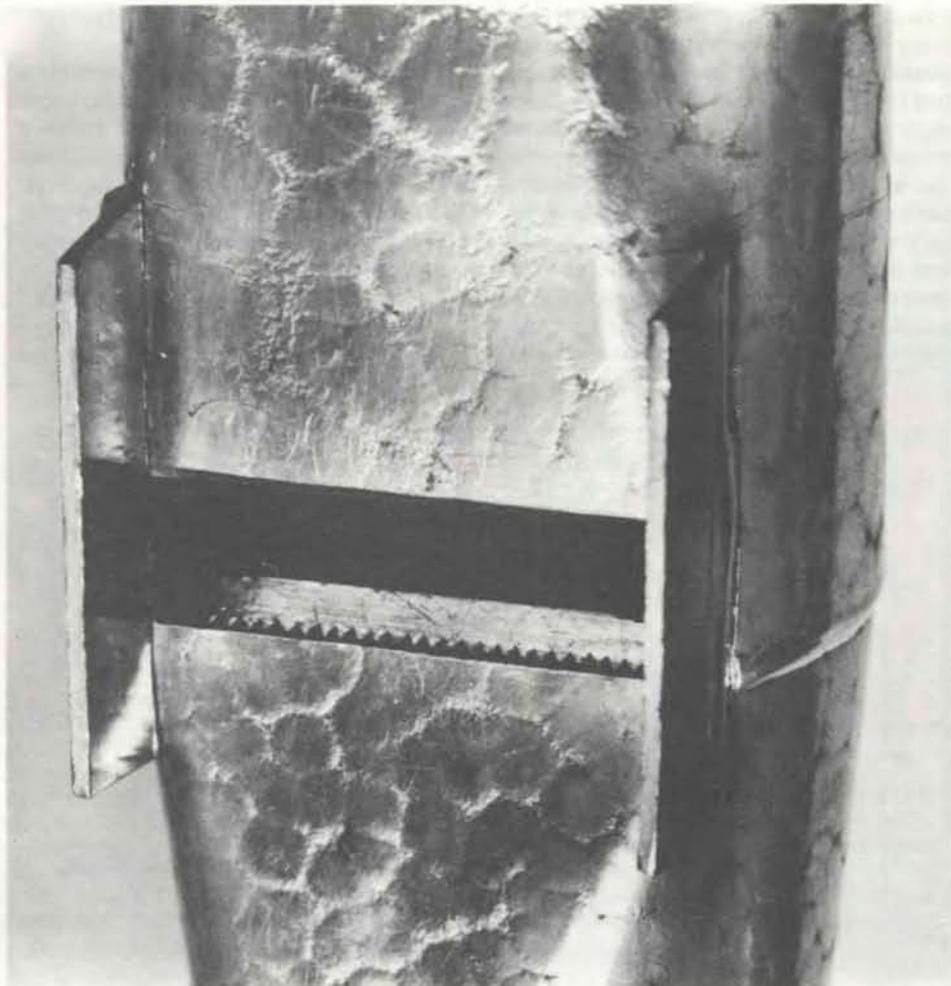
Следует отметить, что для восполнения потерь энергии в трубе и обеспечения устойчивости звука, несколько витков спирали может уйти далеко влево. Заставить трубу звучать может только еще один такой виток, местоположение которого соответствует примерно трем полуволнам в струе. Так как проводимость струи в этой точке низка, продуцируемый звук слабее любого звука, соответствующего точке на внешнем витке спирали.

Форма спирали проводимости может еще больше усложниться, если величина отклонения у верхней губы превышает ширину самой струи. При этом струя почти полностью выдувается из трубы и вдувается в нее обратно на каждом цикле перемещения, и количество энергии, которую она сообщает отраженной волне в трубе, перестает зависеть от дальнейшего увеличения амплитуды. Соответственно снижается и эффективность воздушной струи в режиме генерации акустических колебаний. В этом случае увеличение амплитуды отклонения струи приводит лишь к уменьшению спирали проводимости.

Снижение эффективности струи при увеличении амплитуды отклонения сопровождается возрастанием потерь энергии в органной трубе. Колебания в трубе быстро устанавливаются на более низком уровне, при котором энергия струи точно компенсирует потери энергии в трубе. Интересно отметить, что в большинстве случаев потери энергии вследствие турбулентности и вязкости значительно превышают потери, связанные с рассеянием звуковых волн через прорезь и открытый конец трубы.

РАЗУМЕЕТСЯ, действительное звучание трубы в органе не ограничено одной определенной частотой, но содержит и звуки более высокой частоты. Можно доказать, что эти обертоны являются точными гармониками основной частоты и отличаются от нее в целое число раз. При постоянных условиях воздухонагнетания форма звуковой волны на осциллографе остается совершенно одинаковой. Малейшее отклонение частоты гармоник от величины, строго кратной основной частоте, приводит к постепенному, но четко видимому изменению формы волны.

Это явление представляет интерес, потому что резонансные колебания



РАЗРЕЗ ОРГАННОЙ ТРУБЫ ДИАПАЗОННОГО ТИПА, на котором видно, что язычок имеет насечку для создания однородного турбулентного движения струи воздуха. Труба изготовлена из «крапленого металла» — сплава с большим содержанием олова и добавкой свинца. При изготовлении листового материала из этого сплава на нем закрепляется характерный рисунок, который хорошо виден на фотографии.

воздушного столба в органной трубе, как и в любой открытой трубе, устанавливаются на частотах, которые несколько отличаются от частот гармоник. Дело в том, что при увеличении частоты рабочая длина трубы становится немного меньше из-за изменения акустического потока у открытых концов трубы. Как будет показано, обертоны в органной трубе создаются за счет взаимодействия воздушной струи и губы прорези, а сама труба служит для обертонов более высокой частоты главным образом пассивным резонатором.

Резонансные колебания в трубе создаются при наибольшем движении воздуха у ее отверстий. Другими словами, проводимость в органной трубе должна достигать своего максимума у прорези. Отсюда следует, что резонансные колебания в трубе с открытым дальним концом возникают на частотах, при которых в длине трубы укладывается целое число полуволн звуковых колебаний. Если обозначить основную частоту как f_1 , то более высокие резонансные частоты будут $2f_1$,

$3f_1$ и т.д. (В действительности, как уже было указано, высшие резонансные частоты всегда немного превышают эти значения.)

В трубе с закрытым или заглушенным дальним концом резонансные колебания возникают на частотах, при которых в длине трубы укладывается нечетное число четвертей длины волны. Поэтому для звучания на той же самой ноте закрытая труба может быть вдвое короче открытой, и ее резонансные частоты будут $f_1, 3f_1, 5f_1$ и т.д.

ТЕПЕРЬ вернемся к воздушной струе в органной трубе. Мы видим, что волновые возмущения высокой частоты постепенно затухают по мере увеличения ширины струи. Вследствие этого конец струи у верхней губы колеблется почти по синусоиде на основной частоте звучания трубы и почти независимо от более высоких гармоник колебаний акустического поля у прорези трубы. Однако синусоидальное движение струи не создает такого же движения воздушного потока в трубе, поскольку поток «насыщается» за счет того, что

при крайнем отклонении в любую сторону он полностью течет либо с внутренней, либо с внешней стороны верхней губы. Кроме того, губа обычно несколько смещена и разрезает поток не точно по его центральной плоскости, так что насыщение оказывается несимметричным. Поэтому колебание потока в трубе имеет полный набор гармоник основной частоты со строго определенным соотношением частот и фаз, а относительные амплитуды этих высокочастотных гармоник быстро воз-

растают с увеличением амплитуды отклонения воздушной струи.

В обычной органной трубе величина отклонения струи в прорези соизмерима с шириной струи у верхней губы. В результате в воздушном потоке создается большое число обертонов. Если бы губа разделяла струю строго симметрично, четные обертоны в звучании отсутствовали бы. Поэтому обычно губе придается некоторое смещение, чтобы сохранить все обертоны.

Как и следовало ожидать, открытая

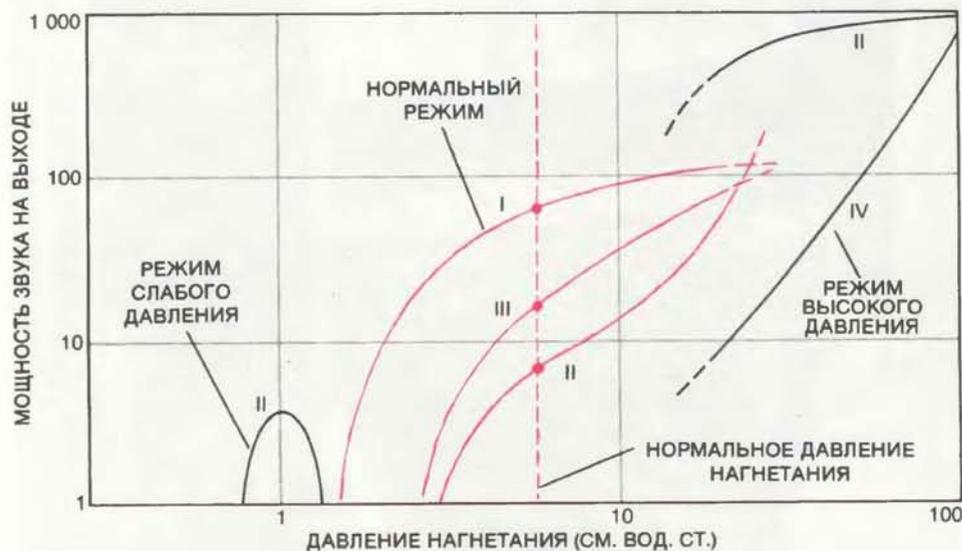
и закрытая трубы создают звук разного качества. Частоты обертонов, создаваемых струей, кратны основной частоте колебаний струи. Столб воздуха в трубе будет сильно резонировать на определенный обертон только при большой акустической проводимости трубы. При этом будет отмечаться резкое увеличение амплитуды на частоте, близкой к частоте обертона. Поэтому в закрытой трубе, где создаются лишь обертоны с нечетными номерами резонансной частоты, происходит подавление всех других обертонов. В результате получается характерный «глухой» звук, в котором четные обертоны слабы, хотя и не отсутствуют полностью. Напротив, в открытой трубе получается более «светлый» звук, поскольку он сохраняет все обертоны, производные от основной частоты.

Резонансные свойства трубы в большой степени зависят от потерь энергии. Эти потери бывают двух типов: потери на внутреннее трение и теплоотдачу и потери на излучение через прорезь и открытый конец трубы. Потери первого типа более значительны в узких трубах и при низкой частоте колебаний. Для широких труб и при высокой частоте колебаний существенными являются потери второго типа.

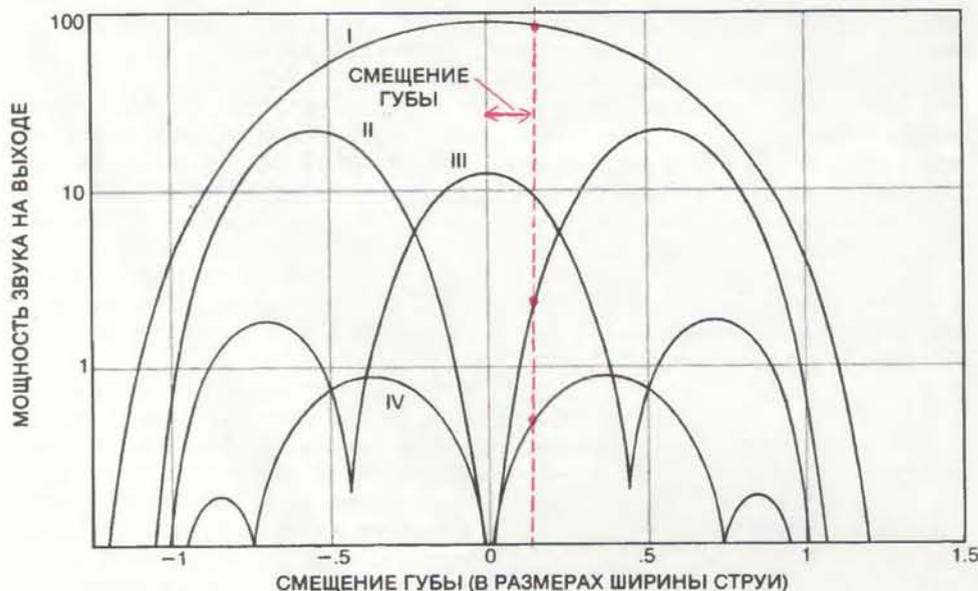
Отсюда следует, что при данной длине трубы, а следовательно, и определенной основной частоте широкие трубы могут служить хорошими резонаторами только для основного тона и ближайших нескольких обертонов, образующих приглушенный «флейтоподобный» звук. Узкие трубы служат хорошими резонаторами для широкого диапазона обертонов, и поскольку излучение на высоких частотах происходит более интенсивно, чем на низких, то образуется высокий «струнный» звук. Между этими двумя звучаниями находится звонкий сочный звук, столь характерный для хорошего органа, который создается так называемыми принципами или диапазонами.

КРОМЕ того, в большом органе могут быть ряды труб с коническим корпусом, перфорированной заглушкой или иными разновидностями геометрической формы. Такие конструкции предназначены для модификации резонансных частот трубы, а иногда для увеличения диапазона высокочастотных обертонов с целью получения тембра особой звуковой окраски. Выбор материала, из которого изготавливается труба, не имеет большого значения.

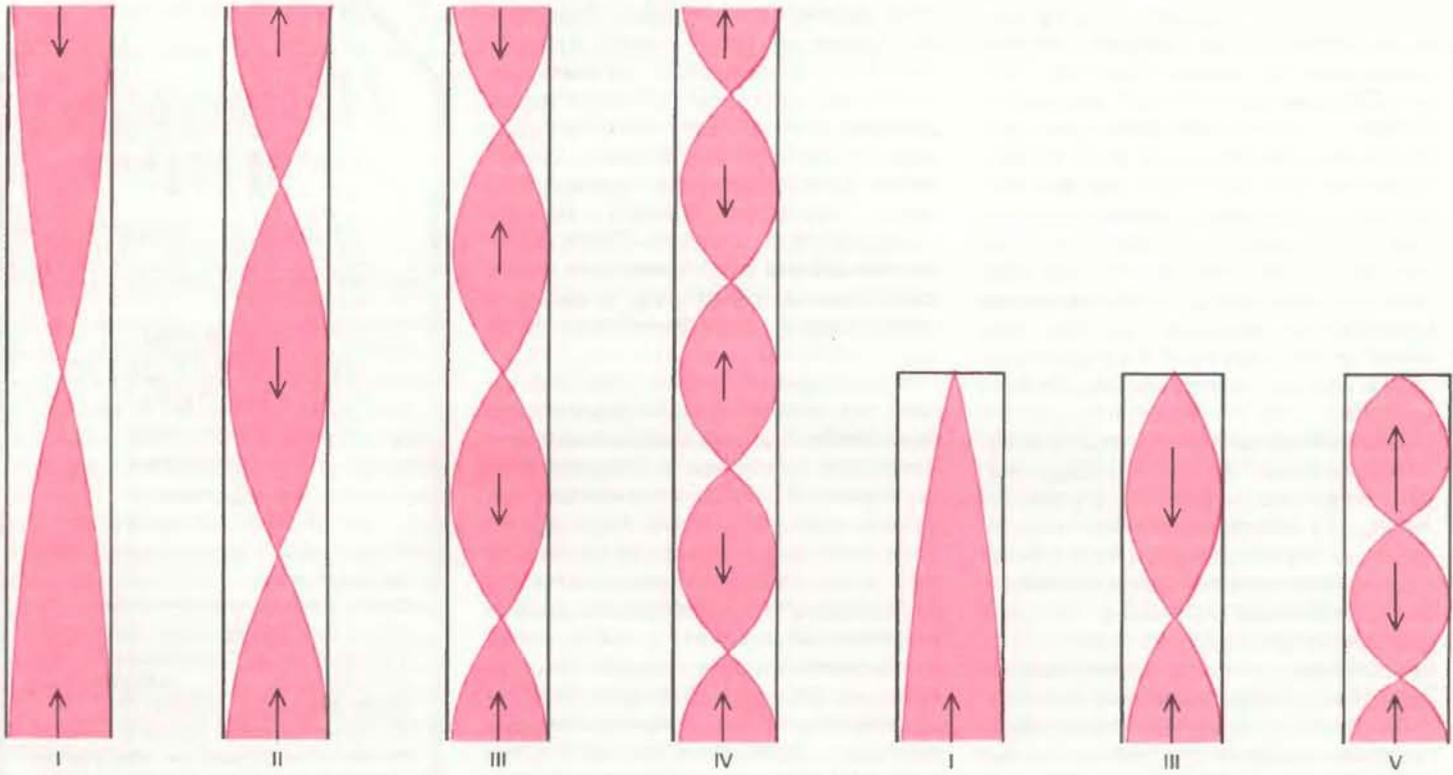
Существует большое число возможных видов колебаний воздуха в трубе, и это в еще большей степени усложняет акустические свойства трубы. Например, при увеличении давления воздуха в открытой трубе до такой степени, что в струе будет как раз создаваться



РЕЗУЛЬТАТЫ ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ НАГНЕТАЕМОГО ВОЗДУХА на звук в обычной органной трубе. Римскими цифрами обозначены первые несколько обертонов. Главный режим трубы (в цвете) охватывает диапазон хорошо сбалансированного нормального звучания при нормальном давлении. При увеличении давления звучание трубы переходит на второй обертон; при понижении давления создается ослабленный второй обертон.

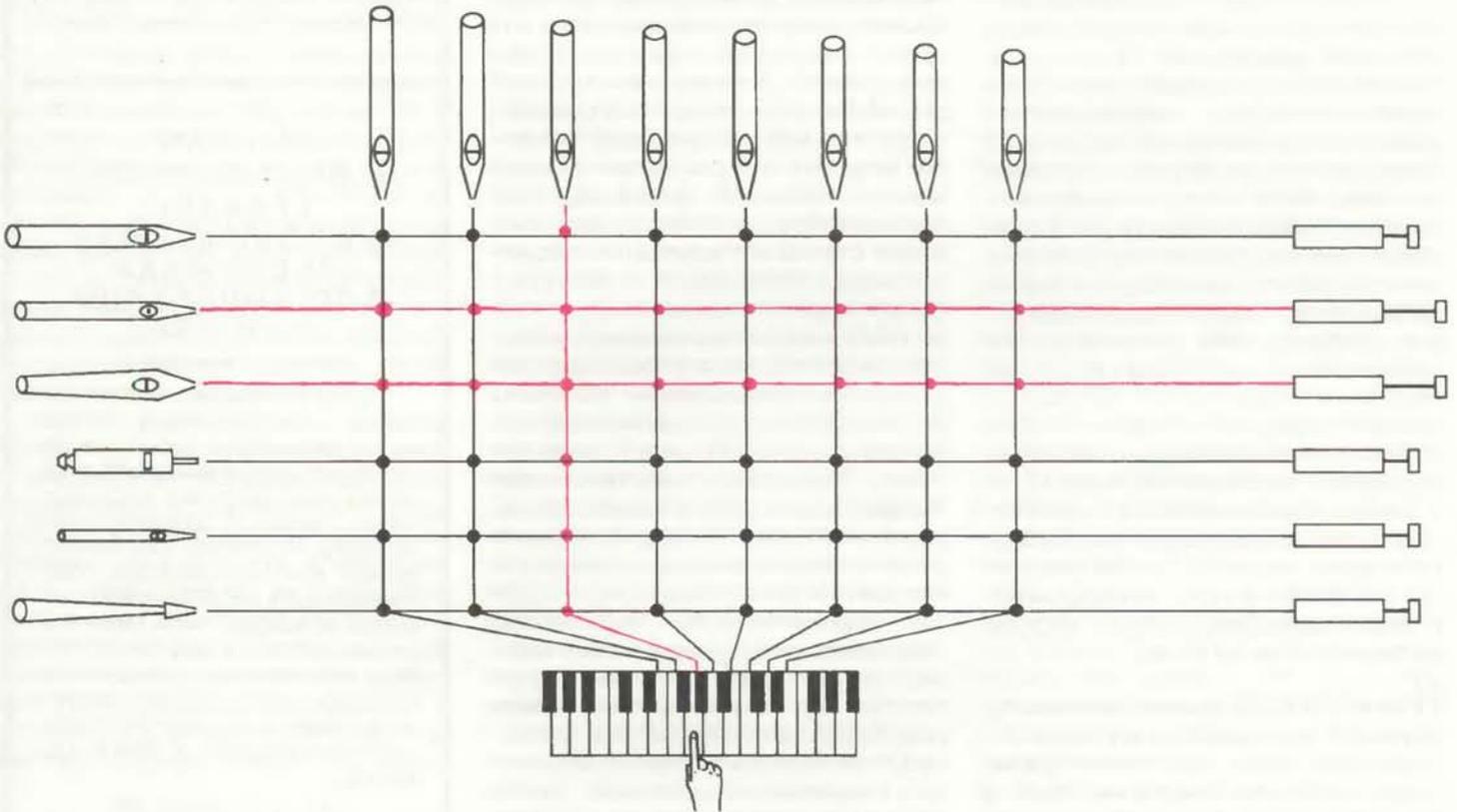


ВЛИЯНИЕ МЕСТА РАСПОЛОЖЕНИЯ ГУБЫ на создание обертонов свидетельствует о целесообразности смещения губы. Если бы губа разделяла струю строго по центральной плоскости, в трубе создавался бы только звук основной частоты (I) и третий обертон (III). При смещении губы, как показано пунктирной линией, возникают второй и четвертый обертоны, значительно обогащающие качество звука.



ВИД СТОЯЧЕЙ ВОЛНЫ ПРИ РЕЗОНАНСЕ в трубах с открытым и закрытым верхним концом. Ширина каждой цветной линии соответствует амплитуде колебаний в различных частях трубы. Стрелками указано направление движения воздуха во время одной половины колебательного цикла; во второй половине цикла направление движения меняется на обратное. Римскими цифрами обозначены номера гармо-

ник. Для открытой трубы резонансными являются все гармоники основной частоты. Закрытая труба должна быть вдвое короче для создания той же ноты, но для нее резонансными являются только нечетные гармоники. Сложная геометрия «ротика» трубы несколько искажает конфигурацию волн ближе к нижнему концу трубы, не меняя их «основного» характера.



РАЗМЕЩЕНИЕ ОРГАННЫХ ТРУБ напоминает ряды и колонки матрицы. На этой упрощенной схеме каждый ряд, именуемый регистром, состоит из однотипных труб, каждая из которых производит одну ноту (верхняя часть схемы). Каждая колонка, связанная с одной нотой на клавиатуре (нижняя часть схемы), включает трубы разных типов (левая часть

схемы). Рычажком на консоли (правая часть схемы) обеспечивается доступ воздуха ко всем трубам регистра, а нажатием клавиши на клавиатуре воздух нагнетается во все трубы данной ноты. Доступ воздуха в трубу возможен только при одновременном включении ряда и колонки.

первый обертон f_1 одной четверти длины основной волны, точка на спирали проводимости, соответствующая этому обертому, перейдет на ее правую половину и струя перестанет создавать обертон данной частоты. В то же время частота второго обертона $2f_1$ соответствует полуволне в струе, и он может быть устойчивым. Поэтому звучание трубы перейдет на этот второй обертон, почти на целую октаву выше первого, причем точная частота колебаний будет зависеть от резонансной частоты трубы и давления нагнетания воздуха.

Дальнейшее увеличение давления нагнетания может привести к образованию следующего обертона $3f_1$ при условии, что «подрез» губы не слишком велик. С другой стороны, часто бывает, что низкое давление, недостаточное для образования основного тона, постепенно создает один из обертонов на втором витке спирали проводимости. Подобные звуки, создаваемые при излишке или недостатке давления, представляют интерес для лабораторных исследований, но в самих органах применяются крайне редко, лишь для достижения какого-то особого эффекта.

После того как мастер при изготовлении органа сделал одну трубу, обладающую необходимым звучанием, основная и наиболее трудная его задача — создать весь ряд труб соответствующей громкости и гармоничности звучания по всему музыкальному диапазону клавиатуры. Этого нельзя достичь простым набором труб одинаковой геометрии, различающихся только своими размерами, поскольку у таких труб потери энергии от трения и излучения будут по-разному влиять на колебания различной частоты. Чтобы обеспечить постоянство акустических свойств по всему диапазону, необходимо варьировать целым рядом параметров. Диаметр трубы меняется при изменении ее длины и зависит от нее как степень с показателем k , где k меньше 1. Поэтому длинные басовые трубы делают более узкими. Расчетная величина k составляет $5/6$, или 0,83, но с учетом психофизических особенностей человеческого уха она должна быть уменьшена до 0,75. Это значение k очень близко к тому, которое эмпирически определили великие мастера органов XVII и XVIII вв.

В ЗАКЛЮЧЕНИЕ рассмотрим вопрос, важный с точки зрения игры на органе: каким образом осуществляется управление звучанием множества труб в большом органе. Основной механизм этого управления прост и напоминает ряды и колонки матрицы. Трубы, располагаемые по регистрам, соответствуют рядам матрицы. Все трубы одного регистра обладают одним тембром, и каждая труба соответствует одной

ноте на ручной или ножной клавиатуре. Подача воздуха к трубам каждого регистра регулируется специальным рычагом, на котором указано название регистра, а подача воздуха непосредственно к трубам, связанным с данной нотой и составляющим колонку матрицы, регулируется соответствующей клавишей на клавиатуре. Труба будет звучать лишь в том случае, если передвинут рычажок регистра, в котором она находится, и нажата нужная клавиша.

В наше время можно применять самые различные способы осуществления подобной схемы с использованием цифровых логических устройств и электрически управляемых клапанов на каждой трубе. На старых органах использовались простые механические рычажки и пластинчатые клапаны для подачи воздуха в клавишные каналы и механические ползуны с отверстиями для управления поступлением воздуха к целому регистру. Эта простая и надежная механическая система, помимо своих конструктивных достоинств, позволяла органисту самому регулировать скорость открытия всех клапанов и как бы делала ему более близким этот уж слишком механический музыкальный инструмент.

В XIX и начале XX в. строились большие органы со всевозможными электромеханическими и электропневматическими устройствами, но в последнее время предпочтение опять отдается механическим передачам от клавиш и педалей, а сложные электронные устройства используются для одновременного включения сочетаний регистров во время игры на органе. Например, самый большой орган в мире с механической передачей был установлен в концертном зале Сиднейского оперного театра в 1979 г. В нем 10 500 труб в 205 регистрах, распределенных между пятью ручными и одной ножной клавиатурами. Клавишное управление осуществляется механическим способом, но оно дублируется электрической передачей, к которой можно подключаться. Благодаря этому исполнение органиста может быть записано в кодированной цифровой форме, которую затем можно использовать для автоматического воспроизведения на органе первоначального исполнения. Управление регистрами и их сочетаниями осуществляется с помощью электрических или электропневматических устройств и микропроцессоров с памятью, что позволяет широко варьировать управляющую программу. Таким образом, великолепное богатое звучание величественного органа создается сочетанием самых передовых достижений современной техники и традиционных приемов и принципов, которые на протяжении многих столетий использовались мастерами прошлого.

Издательство МИР предлагает:

Э. Цихош СВЕРХЗВУКОВЫЕ САМОЛЕТЫ. Справочное руководство

В двух книгах
Перевод с польского

Приведены основные летно-тактические характеристики, фотографии, чертежи общих видов и компоновочных схем практически всех современных отечественных и зарубежных сверхзвуковых самолетов. Кратко излагается история их разработки. Описывается оборудование различных типов сверхзвуковых самолетов и рассматриваются научно-технические проблемы, связанные с их созданием. Для конструкторов самолетов, студентов соответствующих специальностей вузов и лиц, интересующихся авиацией.

1983, 52 л. Цена 4р. 40к. за комплект

П. Ходж, Д. Шеррингтон (ред.) РЕАКЦИИ НА ПОЛИМЕРНЫХ ПОДЛОЖКАХ В ОРГАНИЧЕСКОМ СИНТЕЗЕ

Перевод с английского

Книга посвящена важному и очень перспективному вопросу — приложению химии макромолекулярных соединений к задачам классического органического синтеза. В данном случае полимер выступает как необходимый участник реакции, обеспечивающий либо высокую скорость процесса, либо селективность, либо то и другое вместе. Соответствующие разработки процессов могут иметь прямое отношение к синтезу пептидов, олигонуклеотидов и олигосахаридов.

1983, 35 л. Цена 5р. 60к.



Дальняя дорога длинного транспозона

ЧТОБЫ изучать генетический контроль индивидуального развития живых организмов, исследователям очень нужно уметь вводить гены в животные клетки генеративного ряда* и регистрировать их экспрессию, т.е. образование белков — продуктов этих генов в организме взрослого животного. Идеально при этом было бы встраивать нужный ген в геном (геном — это весь набор генов животного), чтобы этот ген передавался последующим поколениям и экспрессировался у потомков. Метод рекомбинантных ДНК позволяет выделять отдельные гены, а также определенным образом их изменять и клонировать в бактериях, то есть получать в больших количествах. Задача состояла в том, чтобы ввести ген в клетку генеративного ряда и добиться его встраивания в геном. При этом важно было не допустить каких-либо неконтролируемых изменений гена, чтобы он правильно функционировал, устойчиво наследовался и экспрессировался в ряду поколений. Эта задача, наконец, решена. Сотрудники отделения эмбриологии Института Карнеги в Вашингтоне опубликовали в журнале «Сайенс» описание нового эффективного метода переноса генов. Этот метод позволяет вводить клонированный ген в организм эмбриона плодовой мушки *Drosophila melanogaster*. Если ген под названием *rosy* ввести эмбрионам мутантной линии мух с коричневыми глазами, плодовые мухи, развившиеся из этих эмбрионов, дают начало новой линии мух, у которых глаза ярко-красного цвета (как у нормальных, не мутантных дрозофил), причем это изменение устойчиво наследуется.

Ввести чужеродную ДНК в клетки животных пытались неоднократно. Исследователи либо вызывали «трансфекцию» клеток, выращенных вне организма в культуральной среде, добавляя к ним очищенную чужеродную ДНК, либо делали микроинъекции ДНК в ядро клетки или в оплодотворенное яйцо, либо использовали способность некоторых вирусов животных трансдуцировать сегмент ДНК в клетку. Дж. Рубин и А. Спрэдлинг из Института Карнеги прибегли к друго-

му естественному средству переноса ДНК — транспозиционному генетическому элементу, или, коротко, транспозону. Транспозон — это участок ДНК, который перемещается по геному — бактериальному или по геному высшего организма — и способен встраиваться в ДНК во многих разных сайтах, зачастую вместе с включившимися в его состав посторонними последовательностями ДНК.

Рубин и Спрэдлинг исследовали семейство транспозонов *Drosophila*, известных под названием Р-элементов. Рубин и его коллеги обнаружили необычный Р-элемент, гораздо более длинный, чем большинство Р-элементов (по-видимому, его необычная длина требуется для транспозиции). В этот Р-элемент целиком помещается ген транспозазы — фермента, который катализирует транспозицию длинного Р-элемента и более коротких «дефектных» Р-элементов. Длинный Р-элемент кодирует также белок — репрессор транспозазы. Когда длинный Р-элемент вводят в зародышевые клетки, не содержащие такого элемента, в них наблюдается необычайно высокая частота транспозиций; если же в клетках длинный Р-элемент уже имеется, в них накапливается белок-репрессор и транспозиции не происходит. В первой серии опытов Спрэдлинг и Рубин встроили длинный Р-элемент в плазмиду (плазмиды — это небольшие кольцевые молекулы ДНК; они есть у бактерий) и ввели эту плазмиду в эмбрион *Drosophila*. Им удалось показать, что Р-элемент способен катализировать транспозицию самого себя в геном клеток генеративного ряда эмбриона. Плазмиды часто используют, чтобы вводить чужеродную ДНК в бактериальные клетки. Тот факт, что длинный Р-элемент способен к «самотранспозиции», позволял надеяться, что вместе с ним в качестве «пассажира» в клетки генеративного ряда *Drosophila* можно ввести и выбранный для изучения ген. Нежелательный эффект транспозазы можно исключить, если исследуемый ген встроить в дефектный Р-элемент и снабдить эту систему таким количеством транспозазы, которого достаточно лишь для нужной транспозиции.

Рубин и Спрэдлинг попытались транспозировать ген *rosy*, который кодирует фермент, ответственный за красный цвет глаз нормальных мух. Они встроили ген *rosy* в короткий Р-элемент, а его в свою очередь в плазмиду и клонировали в бактериальных клетках. Затем они сделали микроинъекцию плазмиды в эмбрион мутантной линии мух (у этих мух глаза коричневого цвета). Чтобы обеспечить

систему транспозазой, Рубин и Спрэдлинг применяли два остроумных способа. Один из них состоял в том, что клонированный транспозон с геном *rosy* в составе плазмиды инъецировали в мутантные эмбрионы, полученные от скрещивания самцов, имеющих длинный Р-элемент, и самок, лишенных его. В геноме таких гибридов транспозиции происходят с высокой частотой: транспозицию катализирует отцовская транспозаза, которая на некоторое время дерепрессуруется в клетках генеративного ряда гибрида, поскольку в них недостаточно репрессора. Другой способ — совместная инъекция в эмбрионы, лишенные Р-элементов, большого количества плазмиды с коротким транспозоном и геном *rosy* и гораздо меньшего количества длинного Р-элемента с геном транспозазы. Поскольку при этом в клетках оказывается избыток транспозона с геном *rosy* и ограниченное количество транспозазы, следовало ожидать, что во многих клетках генеративного ряда произойдет встраивание транспозона с геном *rosy*, но не длинного Р-элемента.

Оба приема оказались эффективны. Приблизительно 8% эмбрионов, подвергшихся инъекциям, развились в плодовые взрослые мух, а из них 39% в потомстве дали хотя бы несколько мух с красными глазами; цвет глаз устойчиво передавался в последующих поколениях. Исследуя ДНК у мух с красными глазами, Рубин и Спрэдлинг установили, что транспозон с геном *rosy* действительно встроился в хромосому, что и повлияло на цвет глаз. Причем оказалось, что в геном мухи встроился только транспозон, но не бактериальный компонент ДНК плазмиды.

Рубин и Спрэдлинг полагают, что их методику можно использовать двояко. Во-первых, с ее помощью можно исследовать регуляцию генов у высших организмов, особенно у *Drosophila melanogaster*. Плодовая мушка десятилетия остается объектом интенсивных генетических исследований. Идентифицировано уже много генов, важных в развитии организма, но их белки-продукты и механизм действия неизвестны. Теперь появилась возможность детально изучать эти гены и их продукты в развивающемся организме. (Возможно, Р-элемент плодовой мушки или какие-то его варианты функционируют также и в клетках других животных; если же это не так, придется искать аналогичные транспозоны в других организмах.) Во-вторых, можно надеяться, что метод переноса генов с помощью транспозонов позволит изменять геномы животных и растений так, чтобы повышать их урожайность или устойчивость к заболеваниям.

* Клетки генеративного ряда, или эмбриональные зародышевые клетки организма, — это клетки, из которых образуются его половые клетки и, следовательно, в конечном счете все клетки потомков. — Прим. перев.

Космический рентгеновский фон и его происхождение

Как возникает диффузное рентгеновское излучение, которое, по-видимому, равномерно заполняет Вселенную?

Новые открытия позволяют предположить, что один из источников рентгеновского излучения Вселенной — множество очень далеких квазаров

БРЮС МАРГОН

ПОДЛИННО фундаментальное наблюдение, раскрывающее строение Вселенной, можно сделать невооруженным глазом в любую ясную ночь. Звезды светят на фоне черного неба! Тот факт, что основная доля света ночного неба исходит от отдельных звезд и что эти источники в свою очередь объединяются в галактики, — один из краеугольных камней космологии. При наблюдении неба в ультрафиолетовой, инфракрасной или радиочастотной областях электромагнитного спектра обнаруживается та же особенность — объединение в группы структурных элементов, из которых состоит Вселенная. Однако при наблюдении на гораздо меньших длинах волн, характерных для рентгеновского излучения, ситуация совершенно изменяется. С 1962 г. известно, что любой участок неба испускает однородное рентгеновское излучение, причем это «свечение» равномерно заполняет небо. После двух десятилетий усиленных исследований происхождение диффузного рентгеновского фона все еще остается предметом острой полемики.

Небосвод оказывается равномерно ярким при наблюдении только еще в одной области электромагнитного спектра — микроволновой. Интересно, что микроволновое фоновое излучение (его называют также реликтовым) было открыто в 1965 г., вскоре после первого наблюдения рентгеновского фонового излучения. С тех пор источник микроволнового фона был найден, и теперь общепризнано, что это явление — ключ к разгадке эволюции Вселенной. Большинство астрофизиков считают микроволновое излучение реликтом так называемого Большого взрыва, послужившего началом современной фазы расширения Вселенной.

Рентгеновское и микроволновое излучения различаются по длинам волн примерно в миллион раз, и в природе эти два вида электромагнитного излу-

чения обычно возникают в совершенно разных физических условиях. Поэтому нет оснований искать прямую связь между двумя видами космического фона. Тем не менее микроволновый фон и интригует, и разочаровывает тех, кто занимается изучением рентгеновского фона. Интригует потому, что объяснение происхождения рентгеновского фонового излучения, несомненно, приблизит нас к разгадке крупномасштабной структуры Вселенной, как и объяснение природы космического микроволнового фона. Разочарование же связано с тем, что, хотя исследование обоих явлений началось приблизительно в одно время, природа и происхождение микроволнового фона теперь стали ясны даже в деталях, тогда как природа и происхождение рентгеновского фона до сих пор вызывают горячие споры.

Создавшееся положение можно частично отнести за счет разных методов наблюдений, используемых в этих двух диапазонах. Микроволновое излучение с длинами волн в интервале 1 — 10 см легко проходит через земную атмосферу, так что его можно принимать с помощью наземных радиотелескопов. Та же область электромагнитного спектра, в которой было обнаружено космическое рентгеновское излучение — интервал длин волн от 1 до 10 Å, — полностью поглощается земной атмосферой. Поэтому приборы для астрономических наблюдений на этих длинах волн необходимо выносить за пределы земной атмосферы. С помощью немецких ракет «Фау-2» (трофеев конца второй мировой войны) американские астрономы впервые получили возможность поднять в космос астрономические инструменты. Используя довольно примитивные детекторы рентгеновских лучей, уже в ходе первых полетов исследователи обнаружили, что солнечная корона — горячая разреженная внешняя оболочка Солнца — является источником рентгеновского излучения.

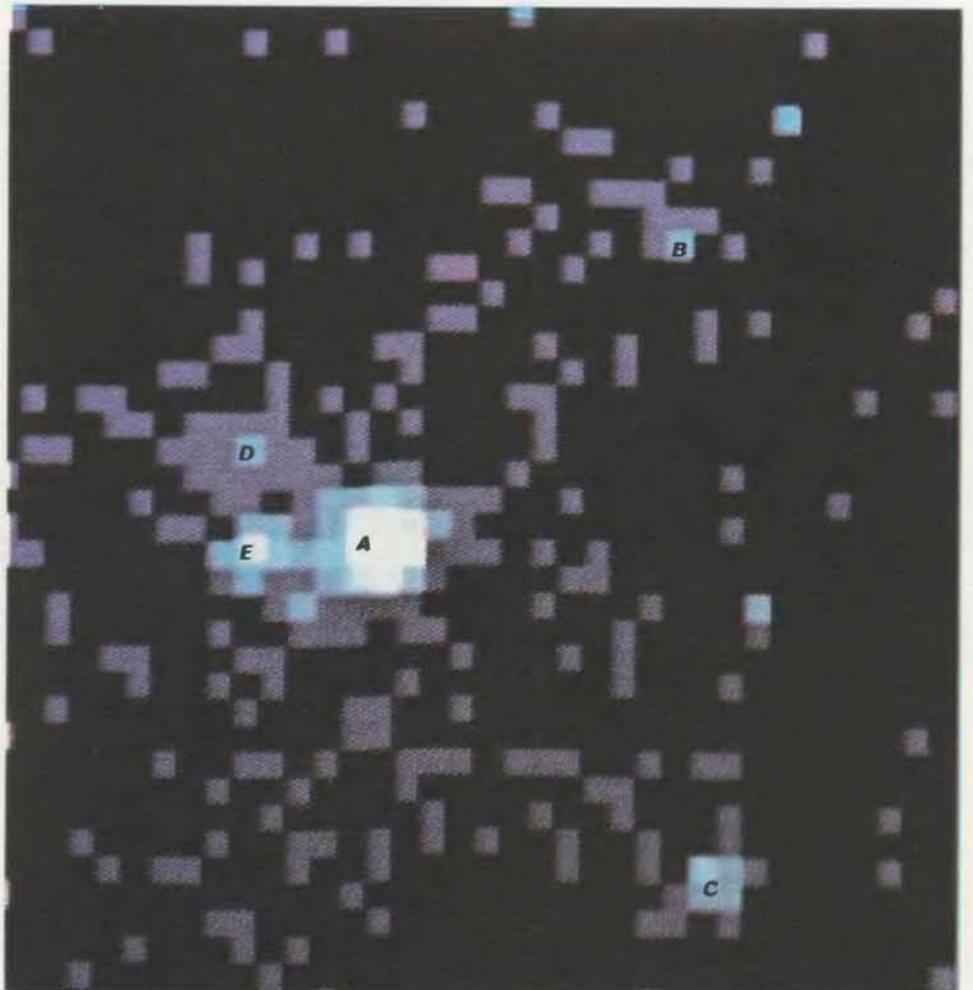
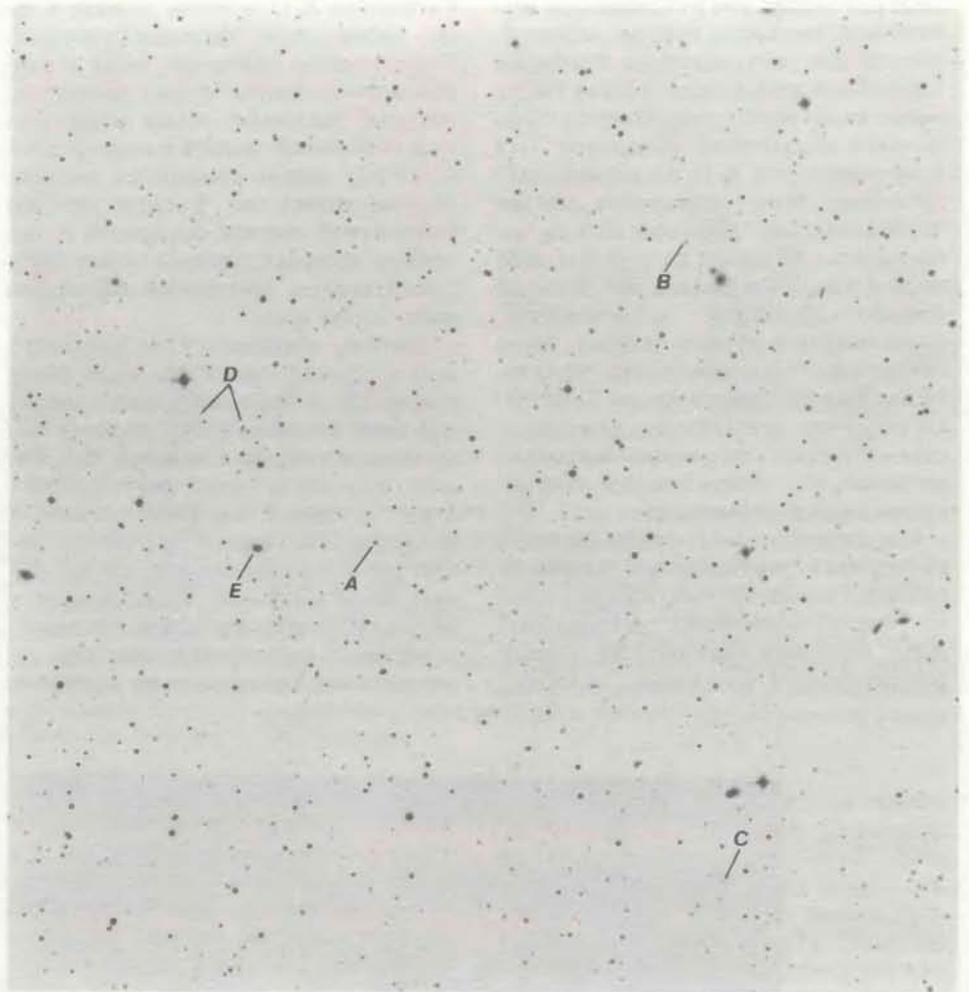
С ОДНОЙ стороны, открытие рентгеновского излучения Солнца оказалось подлинным триумфом, так как оно положило начало принципиально новым методам наблюдений в астрономии. С другой — оно стало источником глубокого разочарования. Интенсивность солнечных рентгеновских лучей поразительно низкая — она составляет всего одну миллионную долю интенсивности видимого света, испускаемого Солнцем. Учитывая это отношение и зная, что Солнце — нормальная звезда, можно рассчитать интенсивность рентгеновского излучения примерно 100 млрд. других звезд, составляющих нашу Галактику. Расчеты показали, что даже от ближайших к Солнцу звезд поток рентгеновских лучей, регистрируемый на Земле, был бы в 40 млрд. раз слабее, чем исходящий от Солнца. Другими словами, рентгеновское излучение Солнца было обнаружено не потому, что Солнце — какой-то уникальный объект, а просто потому, что это самая близкая к нам звезда. Таким образом, первое достижение рентгеновской астрономии — открытие рентгеновского излучения Солнца — свидетельствовало о том, что рентгеновское излучение практически бесполезно для звездной астрономии, по крайней мере для исследования подавляющего большинства нормальных звезд.

Однако это не помешало Р. Джиакони и его коллегам из American Science and Engineering, Inc. попытаться использовать наблюдения в рентгеновском диапазоне для изучения аномальных небесных объектов. В 1962 г. они сконструировали усовершенствованный детектор рентгеновских лучей, который на очень короткое время был поднят за пределы атмосферы на небольшой ракете. Новый детектор был гораздо чувствительнее, чем приборы, использовавшиеся для наблюдения Солнца; именно он оказался первым из поднятых на ракете инструментов, об-

ладавших достаточной чувствительностью для того, чтобы обнаружить источники рентгеновского излучения за пределами Солнечной системы (если, разумеется, такие источники существуют).

Эксперимент Джаакони привел к двум замечательным открытиям. Во-первых, был обнаружен дискретный точечный источник рентгеновских лучей, находящийся в созвездии Скорпиона. Хотя поток рентгеновского излучения от этого источника оказался в мил-

КВАЗАРЫ И НОРМАЛЬНЫЕ ЗВЕЗДЫ дают совершенно одинаковые изображения на обычных фотографиях, снятых в видимом свете (*вверху*), но их можно легко различить по рентгеновским изображениям (*внизу*). Фотография, воспроизведенная здесь в виде негатива (это помогает сохранить тонкие детали), получена при помощи 1,2-метрового телескопа Шмидта на Паломарской обсерватории. На ней снят участок неба в созвездии Геркулеса со стороной примерно полградуса (что приблизительно равно угловому диаметру полной Луны). На фотографии насчитывается около 1000 звездоподобных изображений, большая часть которых — нормальные звезды нашей Галактики. Поэтому любой метод селекции, разработанный для выявления небольшого числа квазаров, должен с очень высокой эффективностью исключать все звезды, находящиеся намного ближе к нам, чем квазары. Рентгеновское изображение в «условных» цветах того же участка неба построено по данным об интенсивности рентгеновского излучения, зарегистрированного детектором на борту спутника «Эйнштейн». Отчетливо различимы только пять рентгеновских источников, четыре из которых можно отождествить с квазарами. Отмеченный буквой *A* источник — уже известный квазар, по которому наводился детектор для получения рентгеновского изображения. Квазар имеет обозначение 3C 345; согласно оценкам, его расстояние от Земли составляет примерно 7,2 млрд. св. лет. Остальные четыре рентгеновских источника были открыты по этому изображению. На основе спектральных наблюдений при помощи больших телескопов автор и его коллеги смогли определить, что случайно открытые рентгеновские источники, обозначенные *B*, *C* и *D*, действительно являются квазарами, еще не занесенными в каталоги. Источники *B* и *C* удалены на 9,5 и 6,7 млрд. св. лет соответственно; источник *D* — наложение излучения двух отдельных квазаров, один из которых удален на 7,9 млрд. св. лет, а другой — на 7,2 млрд. св. лет. Источник *E* совпадает с относительно близкой аномальной галактикой NGC 6212; ее расстояние всего 560 млн. св. лет. На фотографии указаны также оптические двойники этих рентгеновских источников. Рентгеновское изображение получено Г. Чейнаном из Колумбийского университета.



лион раз слабее, чем от Солнца, он значительно превышал уровень, предсказанный для рентгеновского излучения ближайшей нормальной звезды. Положение вновь открытого объекта, получившего обозначение «Скорпион X-1» (сокращенно Sco X-1), по первым наблюдениям было определено только приблизительно. Поэтому нельзя было понять, связан ли он с каким-либо оптическим объектом или нет. В последующих успешных экспериментах, проведенных в разных странах, было обнаружено несколько сотен галактических (находящихся в нашей Галактике) объектов, испускающих рентгеновское излучение; они изучены настолько детально, что теперь природа этих источников достаточно ясна.

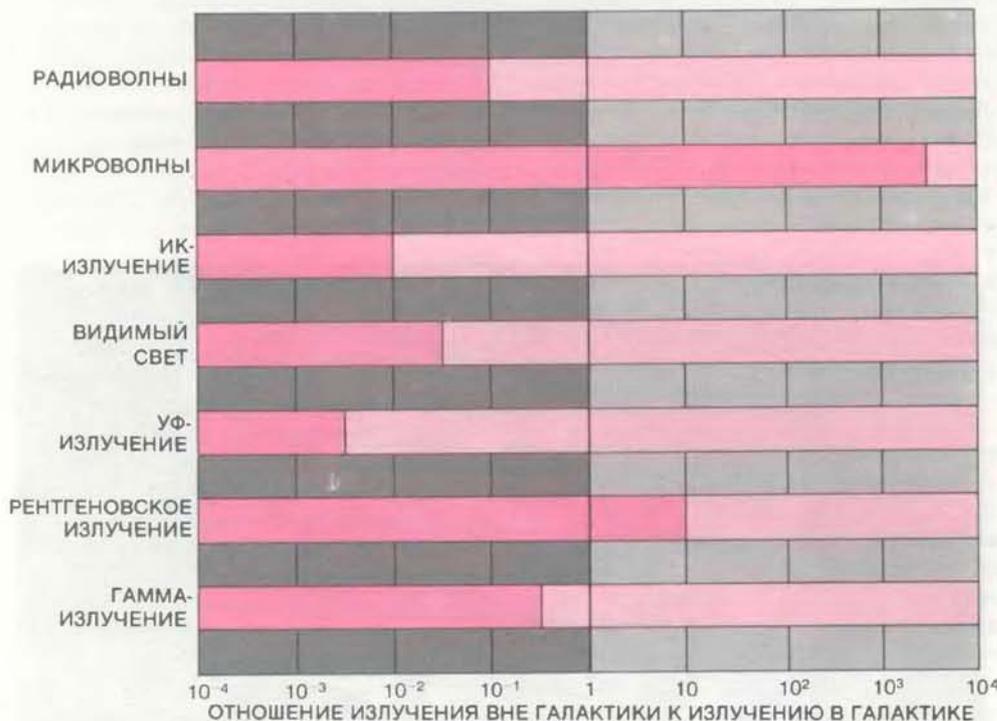
Предположение о невозможности обнаружить рентгеновское излучение небесных объектов, помимо небольшого числа ближайших нормальных звезд, оказалось неверным. Источники рентгеновского излучения, подобные

Скорпиону X-1, — очень далекие и явно аномальные звездные системы. Рентгеновское излучение таких источников генерируется за счет процессов, которые включают обмен веществом между обычной звездой и очень старой и потому сильно сжавшейся звездой, обращающейся по близкой орбите; компактной звездой-спутником в подобной двойных системах может быть белый карлик, нейтронная звезда или даже черная дыра.

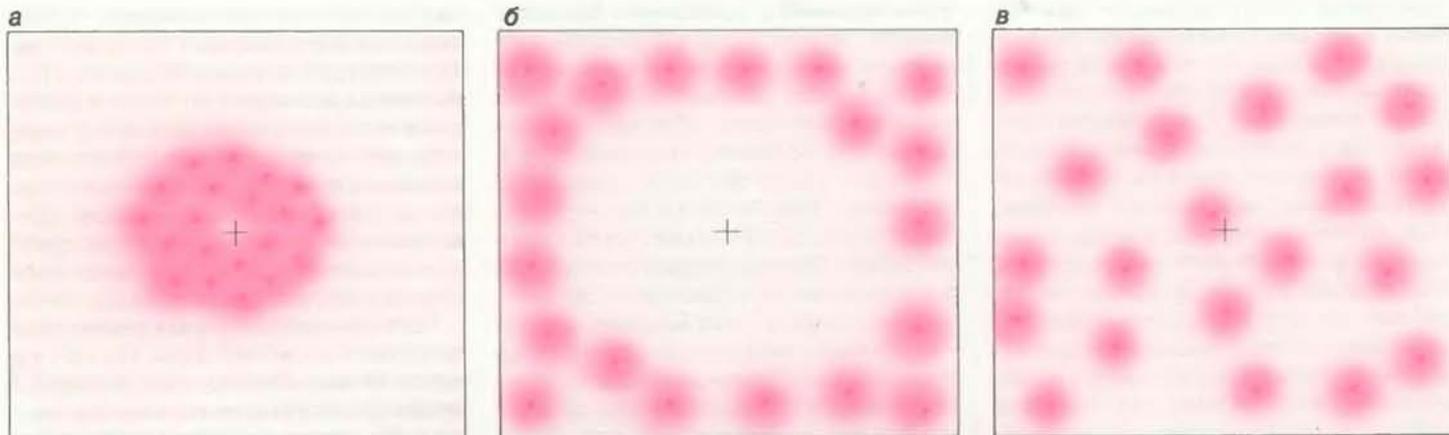
Данные, полученные за несколько минут первого «внесолнечного» рентгеновского эксперимента, преподнесли еще один сюрприз в дополнение к открытию источника Скорпион X-1. Ракета, несущая детектор рентгеновских лучей, во время быстрого подъема и последующего спуска вращалась вокруг своей оси, сканируя довольно значительную часть неба. Наперекор ожиданиям в течение всего времени внеатмосферных наблюдений детектор регистрировал рентгеновское излучение

примерно постоянной интенсивности со всех направлений. Так в первых же экспериментах, положивших начало звездной рентгеновской астрономии, было открыто диффузное рентгеновское фоновое излучение — космический рентгеновский фон.

КАК и звездные источники рентгеновских лучей, рентгеновский фон стал предметом исследования почти во всех последующих экспериментах. Для работ первого этапа потребовались дополнительные запуски ракет; в последние примерно 10 лет детекторы стали устанавливать на искусственных спутниках. Эти исследования выявили несколько примечательных особенностей рентгеновского фона. Возможно, самая интересная из них — одинаковая интенсивность излучения в различных областях неба. В пределах точности, доступной лучшим инструментам, каждая область неба характеризуется точно такой же яркостью в рентгеновских лучах, как и любая соседняя. (Современные наблюдения позволяют обнаружить изменения яркости в пределах 1% между соседними участками неба, находящимися на угловом расстоянии друг от друга, равном поперечнику диска полной Луны.) Другими словами, рентгеновский фон в высшей степени изотропен: какой бы механизм ни был ответствен за его образование, поток рентгеновского излучения одинаков для любого направления с точностью, превышающей 1/100. (Известно, что микроволновый фон также характеризуется высокой изотропностью, причем этот факт проверен с еще большей точностью, достигающей 1/3000.) Почти полная изотропность рентгеновского фона — ключ к разгадке его происхождения. Обычно изотропность излучения указывает на то, что его источник (или источники) находится либо очень близко к нам, либо очень далеко от нас; промежуточные расстояния исключаются. В первом случае наблюдатель оказывается как бы погруженным в излучение от близко расположенного источника и поэтому воспринимает свечение, близкое к идеально изотропному. Однако в случае рентгеновского фона трудно допустить возможность существования мощного источника в окрестностях Солнечной системы. Рассмотрим теперь гипотетическое распределение источников рентгеновских лучей, расположенных не очень далеко, но и не очень близко от нас — скажем, на расстояниях, сравнимых с расстояниями между звездами в нашей Галактике или даже между соседними галактиками. В этом случае в каких-либо направлениях на небе обязательно оказался бы один (или более) источник рентгеновских лучей, который был бы расположен ближе к Солнечной системе, чем остальные, и наб-



ОТНОШЕНИЕ ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ для определенного участка спектра, измеренной гипотетическим наблюдателем вне нашей Галактики, к энергии излучения для того же участка спектра, измеренной в пределах Галактики, представлено в виде цветной диаграммы. Для пяти из семи показанных на рисунке спектральных областей отношение меньше 1; это свидетельствует о том, что для указанных длин волн энергия на единицу объема в Галактике больше, чем за ее пределами. Другими словами, внешний наблюдатель придет к выводу, что источник основной части излучения на этих длинах волн сконцентрирован в пределах Галактики и лишь небольшая его часть испускается межгалактической средой. Однако для двух областей спектра справедливо обратное: энергия излучения, заполняющего Вселенную, оказывается больше, чем энергия излучения в пределах Галактики на тех же длинах волн. В последнем случае внешнему наблюдателю было бы трудно различать отдельные галактики, поскольку они «тонули» бы в диффузном излучении фона. В противоположность микроволновому фону, который интерпретируется как реликт Большого взрыва, рентгеновский фон до сих пор остается загадкой. Основой для приведенной на рисунке диаграммы послужила диаграмма, составленная Дж. Силком из Калифорнийского университета в Беркли.



ПРЕДЕЛЬНАЯ ИЗОТРОПНОСТЬ, или однородность, рентгеновского фона свидетельствует о том, что он возникает либо очень близко от Земли, либо очень далеко, но не на промежуточных расстояниях. Если источники этого излучения близки к нам (а), то наблюдатель был бы полностью погружен в излучение и потому видел бы однородное свечение. Если же источники очень удалены от нас (б), то их расстояния от наблюдателя могут несколько отличаться, но это различие окажется малым по сравнению с огромным средним расстоянием до них; поэтому на небе не наблюдалось

бы никаких ярких пятен. Если излучение образуется на промежуточных расстояниях (в), то легко выявились бы различия между близкими и далекими источниками; в результате участок неба, в котором находится близкий источник, казался бы ярким пятном. Разные данные указывают на то, что образование диффузного рентгеновского фона происходит на колоссальных расстояниях от Земли, хотя пока мы твердо не знаем, является ли источником этого излучения разреженный газ, ансамбль дискретных источников или их комбинация.

людатель зарегистрировал бы яркое пятно.

Но этот вывод противоречит исходным наблюдениям, согласно которым рентгеновский фон характеризуется высокой изотропностью. Другими словами, сгустки вещества, испускающие рентгеновское излучение, в любых участках неба заведомо отсутствуют. Единственное приемлемое объяснение состоит в том, что большая часть излучения приходит к нам с огромных расстояний, сравнимых с расстояниями до самых далеких из известных объектов в наблюдаемой Вселенной. Как и в случае микроволнового фона, объяснение природы диффузного рентгеновского фона, по-видимому, связано с проблемой космологии — крупномасштабной структурой и эволюцией Вселенной.

ЕЩЕ ОДИН ключ к разгадке происхождения рентгеновского фона — тот факт, что генерируется именно рентгеновское излучение, а не излучение с большими длинами волн. Рентгеновские лучи — вид электромагнитного излучения, для которого характерна очень высокая энергия; следовательно, его источником должен быть процесс, которому присущи огромные энергии. Больше того, процесс должен «работать» в условиях, преобладающих в наблюдаемой Вселенной.

Один из возможных механизмов генерирования рентгеновских лучей знаком физикам уже несколько десятилетий. Это излучение очень горячего разреженного газа, который называют плазмой. В таком газе электроны и протоны, обычно объединенные в атомы, существуют в виде не связанных

между собой быстро движущихся частиц. Поскольку электрон и протон имеют противоположные по знаку электрические заряды, между соседними парами электронов и протонов в плазме возникает сила притяжения, и близкие прохождения свободных электронов мимо притягивающих их свободных протонов (но без столкновений между этими частицами) — самые обычные события. С появлением квантовой механики в начале нашего столетия стало известно, что свободные электроны при прохождении вблизи свободных протонов теряют энергию, которая выделяется определенными порциями — квантами электромагнитного излучения, или фотонами; образующееся при этом излучение называют «тормозным».

Точная длина волны (или интервал длин волн) фотонов, рожденных в процессе тормозного излучения, определяется в основном температурой плазмы. Для плазмы с температурой от 10 до 500 млн. К при тормозном излучении генерируются рентгеновские лучи с длинами волн преимущественно от 1 до 10 Å. Можно же ожидать, что Вселенная более или менее равномерно заполнена очень горячей плазмой, которая за счет тормозного излучения испускает электромагнитную радиацию, наблюдаемую в настоящее время как рентгеновское фоновое излучение? Да, для такого предположения имеется ряд причин.

Пространство между звездами в Галактике, хотя и представляет собой высокий вакуум по земным стандартам, содержит заметное количество сильно разреженного газа. Межзвездная среда составляет лишь около 10% массы всех

звезд Галактики, но она играет важнейшую роль в эволюции Галактики: именно эта среда представляет собой «сырье», из которого, как теперь считают, рождаются новые звезды. Астрономы стремятся понять, подходит ли такой же путь для образования громадных конгломератов вещества, из которых в конце концов формируются отдельные галактики. Похоже (хотя окончательной уверенности нет), что галактики конденсировались вскоре после Большого взрыва из разреженного газа, который заполняет всю Вселенную, т.е. из межгалактической среды.

Необходимо отдавать себе отчет в гипотетическом характере этого сценария: хотя межзвездную среду можно наблюдать непосредственно и известно, что образование звезд происходит в нашей Галактике непрерывно, межгалактическая среда непосредственно не наблюдается и образование галактик, по-видимому, уже прекратилось за те миллиарды лет, которые прошли с начала расширения Вселенной. Тем не менее какое-то межгалактическое вещество все же могло сохраниться. В природе только некоторые процессы имеют эффективность 100%, и было бы очень удивительно, если бы в процесс формирования галактик был вовлечен каждый атом исходной среды.

ЕСЛИ диффузный рентгеновский фон объяснять тормозным излучением в межгалактической среде, то возникает вопрос, может ли эта плазма иметь ту крайне высокую температуру, которая требуется для генерации рентгеновского излучения. Два соображения наводят нас на мысль, что это предположение может оказаться верным. Первое

получается рассуждением от противного. Если межгалактическая среда существует и если газ там такой же холодный, как и в межзвездной среде, то газ, заполняющий пространство между нашей Галактикой и очень удаленными объектами, давал бы хорошо заметные линии (или полосы) поглощения, которые имели бы весьма характерную форму; поиски подобных линий по всему спектру не увенчались успехом, так что они скорее всего отсутствуют. Если и существует «холодный» межгалактический газ, то его, несомненно, недостаточно для того, чтобы равномерно заполнить Вселенную. Это ведет нас к предположению о присутствии «горячего» межгалактического газа, а именно: если межгалактический газ существует в сколько-нибудь заметных количествах, то данные наблюдений свидетельствуют в пользу того, что этот газ не может быть холодным.

Второй довод в пользу концепции горячего межгалактического газа основан на расчете времени, в течение которого газ мог бы оставаться горячим. Если принять, что межгалактическая среда остывает быстро по сравнению с современными оценками возраста Вселенной, то придется столкнуться с неприятной необходимостью объяснить не только то, как газ первоначально достиг такой удивительно высокой температуры, но и природу механизма, за счет которого происходит его повторное нагревание за время жизни известной нам части Вселенной, обеспечивая тем самым существование наблюдаемого в настоящее время космического рентгеновского фона. Нетрудно подсчитать, что для такой высокоэнергетической плазмы время охлаждения должно быть сравнимым с возрастом Вселенной или даже превышать его.

Таким образом, тормозное излучение оказывается недостаточно эффективным способом извлечения энергии из столь разреженной среды, а других подходящих механизмов ее охлаждения нет. Если предположить, что на ранней стадии эволюции Вселенной осуществлялся какой-то процесс нагревания межгалактической среды, то придется считать, что газ остается горячим до сих пор. Можно предположить много возможных источников нагрева, которые существовали бы в бурную начальную эпоху эволюции Вселенной. Хотя температура межгалактического газа очень высока, расчеты показывают, что в любом достаточно малом объеме Вселенной количество этого газа отнюдь не бесконечно мало. Поэтому полная энергия газа (а следовательно, и энергия, которую должен обеспечить этот древний механизм нагрева) очень велика.

Существует даже своеобразный «наблюдательный прецедент», свиде-

тельствующий о достаточно большом количестве очень горячей космической плазмы, хотя и не в форме всепроникающего агента, как требуется для межгалактической среды. Как правило, галактики во Вселенной объединяются в большие гравитационно связанные скопления. Самые богатые скопления могут насчитывать сотни и даже тысячи членов. Одно из первых открытий в рентгеновской астрономии — обнаружение того факта, что богатые скопления обычно оказываются источниками рентгеновского излучения. Детальные исследования этого излучения показали, что оно не равно сумме вкладов от отдельных галактик — членов скопления. Излучение оказывается диффузным и охватывает протяженную область на небе, заполняя пространство между галактиками скопления, причем часто оно охватывает все пространство, занимаемое скоплением. В настоящее время это явление интерпретируют как тормозное излучение горячей плазмы (обычно с температурой 20 — 60 млн. К), заполняющей объем скопления и сосуществующей с галактиками — членами скопления.

КОЛИЧЕСТВО вещества в межгалактической среде можно оценить по наблюдаемой яркости рентгеновского излучения; оно сравнимо с полной массой всех галактик скопления. Поэтому в подобных богатых скоплениях горячая плазма отнюдь не является каким-то необычным состоянием вещества; скорее это одна из господствующих форм. За последние несколько лет рентгеновские наблюдения газа в скоплениях убедительно подтвердили, что его источником являются сами галактики: в этом газе были обнаружены такие химические элементы, как железо; по существующим представлениям, оно образуется только в недрах звезд.

По-видимому, среда между галактиками в скоплении появляется после формирования галактик, а не существует до их возникновения. Поэтому вряд ли среда в скоплении галактик правильно отражает свойства горячей межгалактической среды. Тем не менее описанный факт — конкретный пример того, что во Вселенной имеется (по крайней мере в определенных областях) большие количества очень горячей плазмы, испускающей рентгеновское излучение.

Представим себе, что диффузный рентгеновский фон объясняется тормозным излучением в горячей межгалактической среде. Не ссылаясь на наблюдения, ведущиеся в течение уже двух десятилетий, поставим вопрос: может ли межгалактическая плазма иметь еще какие-либо интересные свойства? Ответ будет положительным. В конце 20-х годов Э. Хаббл с сотрудниками на обсерватории Маунт-Вилсон устано-

вил по наблюдениям спектров галактик, что все галактики за пределами Местной группы удаляются от нас, т.е. Вселенная расширяется! Это открытие привело к выводу, что по крайней мере текущий этап эволюции Вселенной имел начало в прошлом и эволюция началась с плотной, исключительно бурной фазы; в дальнейшем эта мысль получила подтверждение по данным наблюдения микроволнового фона.

Будет ли нынешняя фаза расширения продолжаться вечно? Если это так, то через 10 или 20 млрд. лет Вселенная окажется достаточно пустынным местом. Не только все галактики далеко отодвинутся друг от друга; поскольку эволюция звезд занимает конечное время, направленный в одну сторону процесс эволюции в конце концов преобразует все галактическое вещество в слабые по блеску компактные звезды типа белых карликов, нейтронных звезд, а возможно, и черных дыр. Поэтому отдельные галактики в итоге потеряют внутренние источники своей светимости и будут медленно исчезать из виду. Впрочем, это мрачное предсказание существенно зависит от предположения, что расширение Вселенной будет продолжаться безостановочно. Наличие межгалактической среды в принципе может изменить судьбу расширяющейся Вселенной.

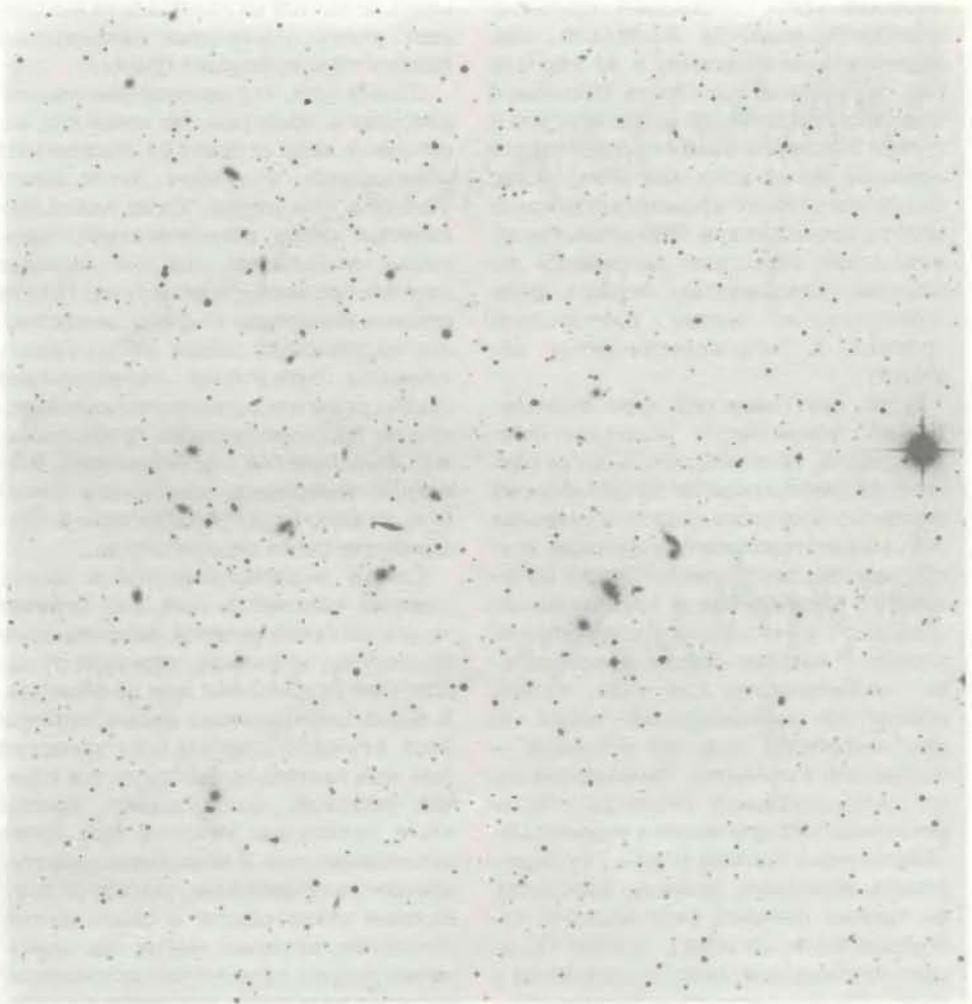
В природе существует сила, действующая против всеобщего расширения, — тяготение любого атома Вселенной к каждому из остальных атомов. Если «самопритяжение» Вселенной окажется достаточно сильным, то расширение в конце концов остановится и под действием всемирного тяготения сменится сжатием. Как можно решить эту важнейшую дилемму о судьбе Вселенной? Из наблюдений астрономам в настоящее время известно только то, что Хаббл понял полвека назад: современная фаза, в которой пребывает Вселенная, — это расширение. Примечательно, что предсказание ее судьбы в будущем — непрерывно продолжающееся расширение или предстоящее сжатие — само по себе не слишком сложная процедура. Поскольку величина силы тяготения зависит только от количества имеющегося вещества и расстояния между отдельными частями, а скорость расширения и масштаб современной Вселенной можно вывести (по крайней мере в принципе) из наблюдений разбегания галактик, то вопрос о том, сменится ли когда-нибудь расширение сжатием, по существу эквивалентен расчету полного количества вещества во Вселенной.

Более строго, средняя плотность Вселенной (т.е. количество вещества в данном произвольно малом объеме) — вот та величина, которую нужно оценить. При плотности выше определенного порогового значения — оно назы-

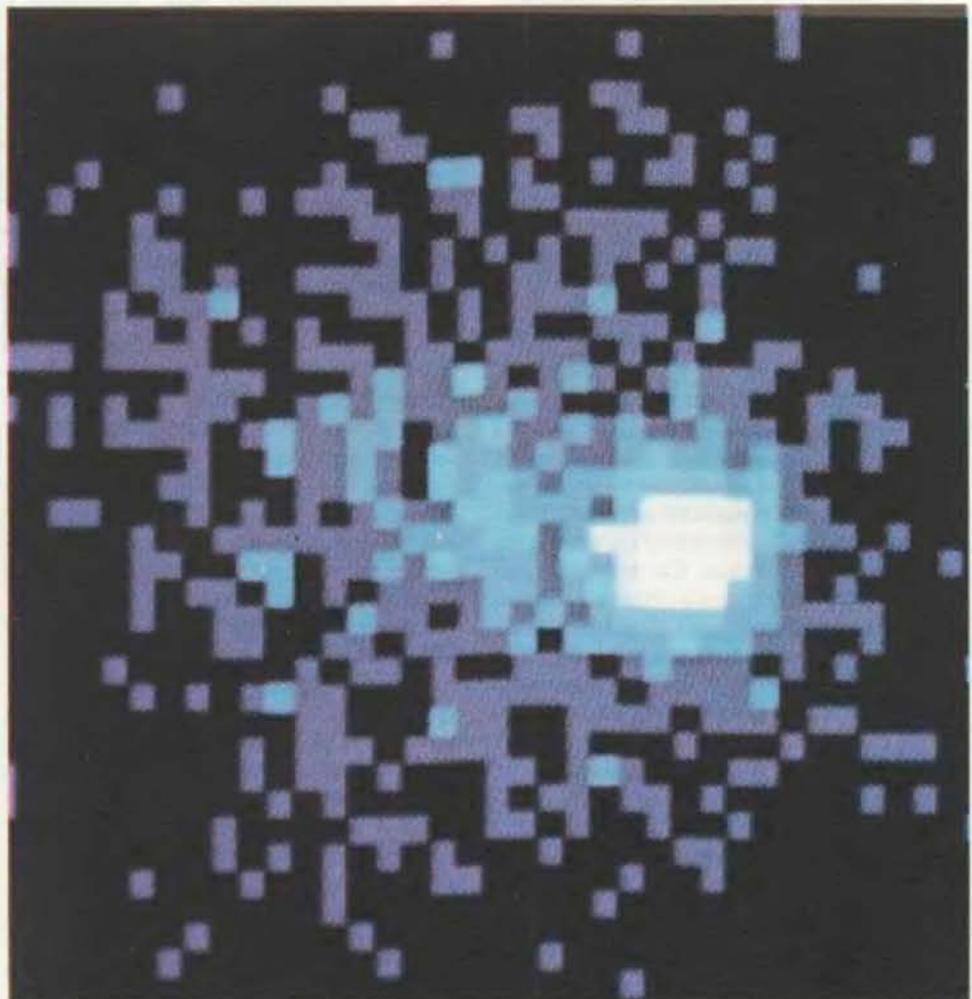
вается критической плотностью — расширение будет постепенно замедляться и в конце концов начнется сжатие. В противном случае, когда средняя плотность Вселенной окажется ниже критической, расширение будет продолжаться вечно. Лучшие из современных оценок критической плотности очень малы, частично потому что объем Вселенной очень велик; это значение эквивалентно в среднем по всей Вселенной одному атому водорода на 1 м^3 .

НЕЗАВИСИМО от возможности существования межгалактической среды существует мнение, что большая часть вещества Вселенной находится в галактиках в виде звезд, а меньшая — в виде газа и пыли. Оценка массы представляет собой трудоемкую процедуру; результат же в рамках нашего обсуждения настолько поразителен, что неточности, вероятно, не играют решающей роли. Результат состоит в том, что вклад галактик в целом составляет всего 1 или 2% значения критической плотности! Тогда даже с учетом неопределенности при расчете массы галактического вещества нормальные галактики вряд ли могут содержать количество вещества, достаточное для прекращения расширения Вселенной.

Однако существование диффузного рентгеновского фона и его возможное образование в межгалактической плазме требует пересмотра этого расчета. Если плотность вещества в межгалак-



БОГАТЫЕ СКОПЛЕНИЯ ГАЛАКТИК — наглядные доказательства существования во Вселенной плазмы (т.е. горячего газа заряженных частиц), испускающей космические лучи. Фотография в видимом свете (в виде негатива *вверху*) изображает скопление Эйбелл 2151, снятое при помощи телескопа Шмидта на Паломарской обсерватории. Это скопление, расположенное в созвездии Геркулеса, находится на расстоянии 670 млн. св. лет от Земли. Рентгеновское изображение в условных цветах (*внизу*), также полученное Г. Чейнаном, относится к той же области неба, наблюдавшейся со спутника «Эйнштейн». Если на оптическом снимке наблюдаются отдельные галактики, то на рентгеновском изображении появляется протяженное облако горячего газа с поперечным размером ~3 млн. св. лет; его существование поддерживается совместным притяжением всего ансамбля галактик. Среда, заполняющая пространство между членами скопления, охватывает на небе участок с угловым диаметром 0,25 град, что соответствует половине диска полной Луны. Плазма такого типа, температура которой по оценкам интенсивности рентгеновского излучения составляет около 20 млн. К, обнаружена во многих скоплениях галактик.



тической среде превышает среднюю плотность вещества Вселенной, связанного с галактиками, в 50 или 100 раз, то средняя плотность Вселенной окажется критической и наш прогноз о судьбе Вселенной изменится коренным образом. Более того, мы обнаружим, что до настоящего времени астрономы просто пренебрегали 99% вещества во Вселенной; известные светящиеся галактики, оказывается, играют роль пренебрежимо малой посторонней примеси к межгалактическому веществу!

Если рентгеновский фон действительно порождается межгалактической средой, то ее плотность легко оценить по наблюдаемой интенсивности фонового излучения (путем измерения потока рентгеновского излучения, т.е. его энергии, достигающей Земли из заданного направления за 1 с) и из последующего теоретического расчета числа атомов в единице объема пространства, необходимого для того, чтобы обеспечить наблюдаемый поток (в предположении, что его источник — тормозное излучение). Вычисления дают поразительный результат. Если рентгеновский фон вызван тормозным излучением в горячей плазме, то выведенная плотность (правда, зависящая от точных значений ряда величин, измерения которых пока содержат большие ошибки) оказывается сравнимой с критической плотностью Вселенной!

Не ведет ли открытие рентгеновского фонового излучения к радикальному изменению представлений о будущем расширении Вселенной? К сожалению, фоновое излучение — лишь свидетельство в пользу существования межгалактической среды с критической плотностью, но никак не прямое доказательство. Три основные неопределенности имеются в этой цепи аргументов. Во-первых, значение критической плотности зависит от скорости расширения Вселенной: чем быстрее галактики удаляются друг от друга, тем больше вещества необходимо для того, чтобы приостановить расширение. Оценка скорости по величине, называемой постоянной Хаббла, выводится из сложной последовательности астрономических измерений, связанных с разными неопределенностями. Со времени работ Хаббла имевшаяся оценка этой величины значительно изменилась. Только для определенного (и в настоящее время далеко не общепринятого) значения постоянной Хаббла количество вещества межгалактической среды обеспечило бы критическую плотность.

ВТОРАЯ неопределенность связана с тем, что приведенная выше оценка плотности плазмы опиралась на наблюдаемую интенсивность рентгеновских лучей: для перехода от наблюдае-

мой к истинной интенсивности необходимо учитывать среднее значение дискретности излучающей среды.

Дело в том, что равномерно распределенная в пространстве среда или вещество в виде отдельных дискретных образований излучают по-разному. Только в том случае, когда межгалактическая среда исключительно однородна, выведенное для нее значение плотности равно критическому. И хотя прямые измерения степени дискретности излучающей среды отсутствуют, идеально однородное распределение такой среды представляется маловероятным по теоретическим соображениям: большинство составляющих Вселенной (например, светящееся вещество в галактиках) распределено в пространстве очень неравномерно.

Третья неопределенность в наших выводах состоит в том, что горячая межгалактическая среда, заполняющая Вселенную, возможно, спрятана от наших глаз глубже, чем другие объекты. В самом деле, прямые доказательства того, что наблюдаемый рентгеновский фон действительно генерируется горячей плазмой, отсутствуют; просто иные механизмы кажутся еще менее обоснованными. К сожалению, рентгеновское излучение само по себе не дает никаких свидетельств о своем происхождении, которые могли бы однозначно указать нам, что его источником является тормозное излучение от горячего разреженного газа. Имеются и другие, знакомые физикам по лабораторным исследованиям процессы, при которых также генерируются рентгеновские лучи. Объяснение рентгеновского фонового излучения как радиации горячей плазмы согласуется с данными современных наблюдений, и, возможно, оно даже красиво (ибо достаточно просто), но является ли это объяснение единственным? Учитывая все значение для космологии наличия межгалактической плазмы (по крайней мере в том случае, когда ее плотность близка к критической), для уверенности в надежности наших выводов необходимо не только согласие с наблюдениями. Например, полезно было бы убедиться в том, что не существует других объяснений природы рентгеновского фона, которые также согласуются с наблюдениями.

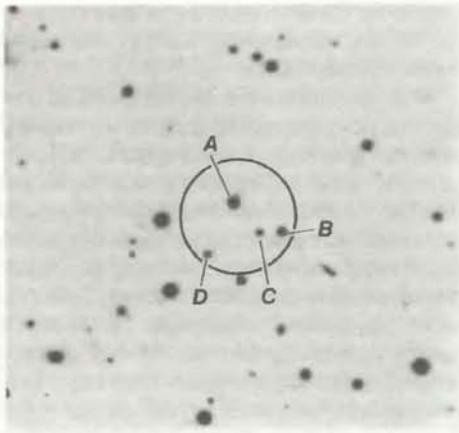
Однако есть принципиально иное объяснение диффузного рентгеновского фона, которое не зависит от того, существует ли межгалактическая среда или нет. Оно было предложено в последние несколько лет. Тот факт, что наблюдаемый рентгеновский фон в высшей степени изотропен, не только характеризует источник его излучения, но и отражает особенности применяемых инструментов. Рассмотрим возможность существования большого числа дискретных объектов, каждый из

которых испускает рентгеновское излучение. Если они достаточно удалены от наблюдателя и достаточно многочисленны, так что любая область неба содержит много таких объектов, то наблюдатель может ошибочно интерпретировать дискретные источники как однородное диффузное свечение. Неважно, насколько точен будет используемый при этом инструмент. Всегда может существовать такая гипотетическая концентрация индивидуальных объектов, что инструмент не сможет разрешить их как дискретные источники и выявить, что наблюдается набор отдельных точек, а не непрерывная диффузная среда.

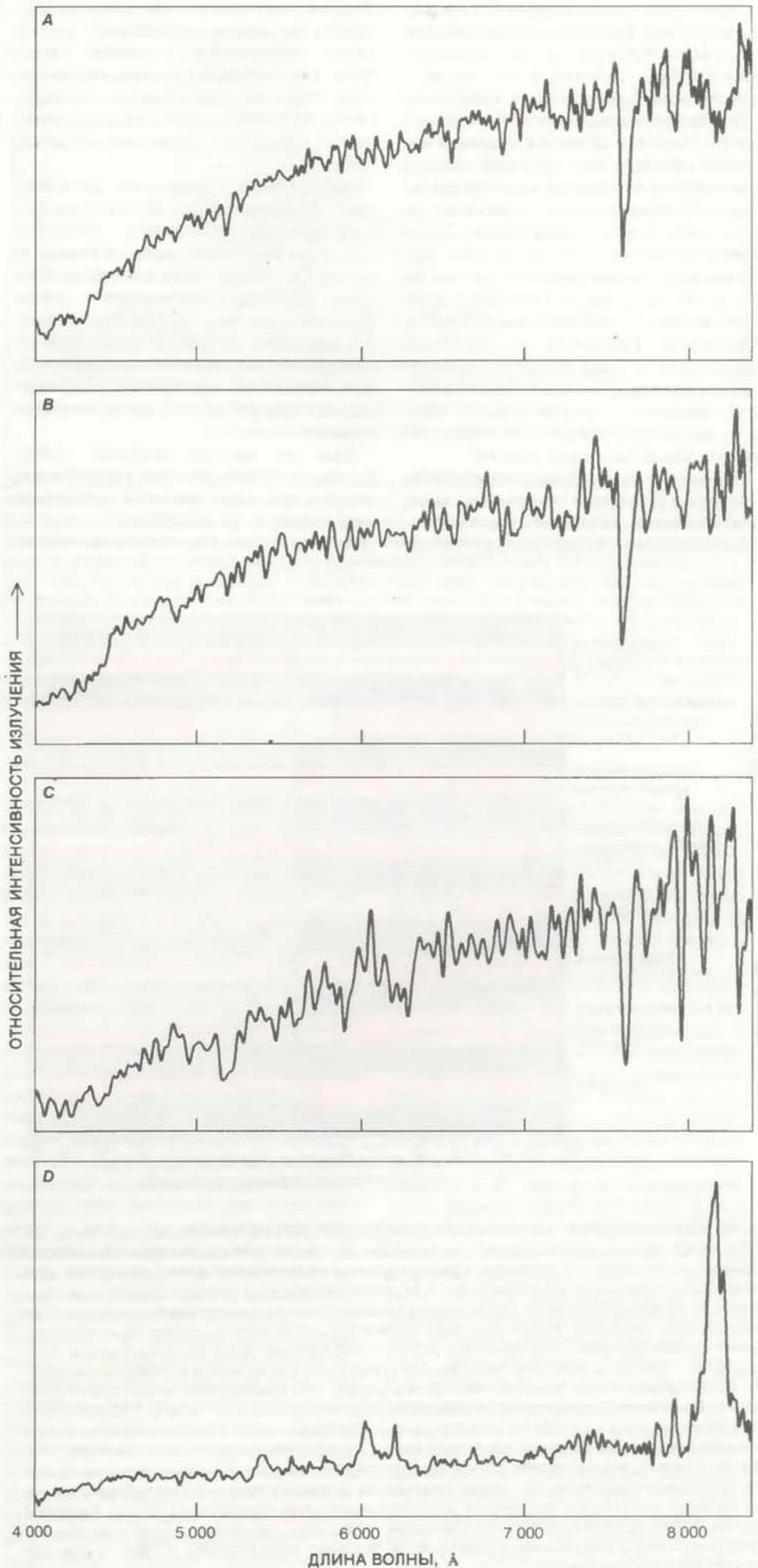
Исходит ли реальный диффузный рентгеновский фон от диффузного по своей природе источника? Или он образуется большим числом очень далеких, но отдельных источников рентгеновского излучения, никак не связанных с разреженным межгалактическим газом? Первый шаг к новой гипотезе мы сделаем, задав вопрос: имеется ли какая-либо известная составляющая Вселенной, которая и очень широко распространена, и способна интенсивно излучать рентгеновские лучи? Галактики, основные строительные кирпичики Вселенной, не удовлетворяют этим требованиям. Хотя галактики достаточно многочисленны, их суммарная радиация не может дать наблюдаемую интенсивность рентгеновского фона. Это заключение — следствие вывода, сделанного после первого наблюдения рентгеновского излучения Солнца, а именно: нормальные звезды не способны излучать сколько-нибудь существенную долю своей энергии в виде рентгеновских лучей. Поэтому суммарное рентгеновское излучение всех звезд в галактике должно быть очень слабым по сравнению с видимым излучением. Я упоминал о второй составляющей Вселенной, которая служит мощным источником рентгеновских лучей, — газе в богатых скоплениях галактик. Этот источник на первый взгляд кажется подходящим для наших целей, поскольку скопления галактик достаточно многочисленны во Вселенной. Однако последние рентгеновские наблюдения, позволившие дать оценку концентрации скоплений галактик во Вселенной, показывают, что вклад скоплений в наблюдаемый рентгеновский фон может составлять только несколько процентов.

ЗА ПОСЛЕДНИЕ три года рентгеновские наблюдения со спутника «Эйнштейн» позволили обнаружить другой тип объектов — источников рентгеновского фона. Было найдено, что квазизвездные объекты, или квазары, являются сильными источниками рентгеновского излучения. Природа квазаров до сих пор остается загадкой. На фото-

графиях в оптических лучах они кажутся точками, не отличимыми от изображений нормальных звезд и галактик. Однако два десятилетия назад выяснилось, что в отличие от нормальных звезд многие из этих объектов оказываются мощными источниками радиоизлучения.



НЕОЖИДАННОЕ ОТКРЫТИЕ рентгеновских квазаров, не занесенных в существующие каталоги. В ходе исследования рентгеновского излучения системы двойной звезды в созвездии Водолея вблизи источника рентгеновских лучей, зафиксированном на рентгеновском изображении со спутника «Эйнштейн», был замечен второй рентгеновский источник. На основании рентгеновских данных положение нового источника можно определить лишь приблизительно. На фотографии в видимых лучах той же области неба (вверху), полученной при помощи телескопа Шмидта на Паломарской обсерватории, тот район, где, по-видимому, должен находиться рентгеновский источник, выделен окружностью. В пределах этой области видны четыре звездоподобных объекта; все они рассматривались как кандидаты для отождествления с источником рентгеновских лучей. Спектры каждого из этих крайне слабых объектов были получены автором и его коллегами на 3-метровом рефлекторе Шейна Ликской обсерватории (кривые справа). Первые три спектра имеют характерные «провалы», связанные с тем, что холодные атомы внешних слоев объектов поглощают излучение, исходящее изнутри. Такие спектры поглощения характерны для нормальных звезд; следовательно, эти три объекта никак не связаны с источником рентгеновских лучей. Четвертый спектр имеет совершенно иной характер: видны четко выраженные пики, которые соответствуют избыточному излучению на определенных длинах волн — характерный признак квазаров. По результатам изучения этого спектра квазар находится от нас на расстоянии 3,8 млрд. св. лет. Новый квазар, получивший с учетом его небесных координат обозначение 2216—043, — оптический двойник неожиданно открытого рентгеновского источника.



Детальные исследования оптического излучения квазаров, последовавшие за этим открытием, вскоре показали, что квазары удаляются от Земли с огромными скоростями, в некоторых случаях превышающими 90% скорости света. Если эти скорости удаления интерпретировать как следствие общего расширения Вселенной, которое вызывает наблюдаемое разбегание галактик (эту точку зрения поддерживают большинство специалистов, но не все), тогда мы вынуждены признать, что квазары не звезды в нашей Галактике, а самые далекие из наблюдаемых объектов Вселенной. Расстояния до наиболее удаленных из этих объектов намного превышают расстояния до самых далеких галактик, и они испускают свет, который начал свое путешествие к нам вскоре после Большого взрыва.

Несмотря на громадные расстояния, многие из квазаров настолько ярки, что их можно наблюдать в любительский телескоп. Отсюда следует, что ис-

тинная светимость квазаров колоссальна и далеко превосходит светимость нормальных галактик; механизм, посредством которого генерируется столь огромная энергия, по-видимому, не похож на термоядерные реакции — источник энергии нормальных звезд.

Исследование тщательно отобранных образцов слабых объектов на фотографических пластинках доказало, что, хотя несколько квазаров близко к нашей Галактике, они в основном являются обычным «населением» очень удаленных от нас областей Вселенной. По-видимому, в результате каких-то эволюционных эффектов на протяжении нескольких прошедших миллиардов лет квазары вблизи нас в основном угасли.

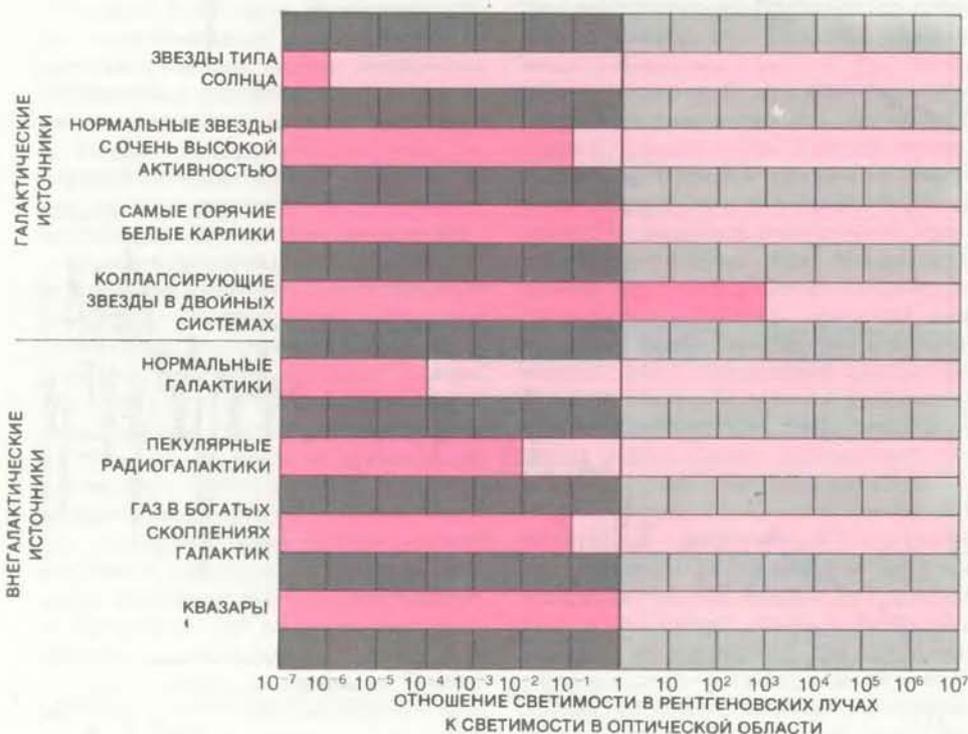
Еще до запуска спутника «Эйнштейн» изучение близких квазаров показало, что они являются мощными источниками рентгеновского излучения; этот вывод был сделан на основе

наблюдений с ракет и первых спутников. Выяснилось, что один квазар генерирует в 1000 раз больше энергии в форме рентгеновского излучения, чем суммарное излучение в видимой области спектра всех 100 млрд. звезд нашей Галактики! И все же из-за колоссальных расстояний до большинства квазаров даже эта громадная энергия так уменьшается за время, пока она достигнет Земли, что большая часть квазаров не была обнаружена при рентгеновских наблюдениях до запуска спутника «Эйнштейн».

С помощью этого спутника было открыто рентгеновское излучение, интенсивность которого примерно в 1000 раз слабее, чем регистрируемая в более ранних экспериментах. Кроме того, в противоположность прежним детекторам типа счетчиков Гейгера, которые только грубо оценивали интенсивность рентгеновского излучения, детекторы на спутнике «Эйнштейн» имели специальную фокусирующую систему, позволявшую строить изображения неба в рентгеновских лучах, которые затем передавались по телеметрии на Землю в виде двоичного кода. За двухлетнее пребывание спутника на орбите получены и переданы рентгеновские изображения большого числа интересных объектов, в том числе нескольких сотен квазаров. Обнаружилось, что большинство квазаров оказалось мощными источниками рентгеновского излучения.

ИСПОЛЬЗУЯ в качестве исходных данные рентгеновских наблюдений сравнительно ограниченного числа квазаров, а также данные гораздо более детальных оптических наблюдений о числе квазаров на единице площади неба, в принципе можно оценить вклад квазаров в диффузный рентгеновский фон. Такие расчеты приводят к поразительному выводу — значительная доля рентгеновского фона (а возможно, и весь целиком) исходит от далеких и потому неразличимых квазаров. Однако, поскольку любой обзор, который охватывает свойства лишь малой части объектов определенного типа, приходится экстраполировать на гораздо большие по численности группы, эта операция связана с большой неопределенностью.

В случае квазаров, излучающих рентгеновские лучи и обнаруженных со спутника «Эйнштейн», интерпретация данных еще более усложняется. Во-первых, оптические данные, позволяющие определить число квазаров на единице площади неба, до сих пор противоречивы, а они необходимы для того, чтобы перейти от излучательной способности в рентгеновских лучах небольшого числа обнаруженных объектов к оценке полного вклада всего ансамбля. Во-вторых, со времени откры-



Для большинства астрономических объектов рентгеновские лучи составляют лишь малую долю их излучения. Если источник рентгеновского фона — огромное число очень далеких дискретных объектов, то последние должны быть мощными источниками и в то же время широко распространены во Вселенной, чтобы обеспечить наблюдаемую изотропность рентгеновского фона. Как показывает рисунок, этому условию нелегко удовлетворить: мощные источники рентгеновских лучей, как правило, достаточно редкие объекты. Отдельные звезды, для которых отношение энергии рентгеновского излучения к энергии видимого света равно 1 или больше, настолько редки, что суммарный поток рентгеновского излучения нормальной галактики обычно составляет всего 1/10 000 долю энергии видимого света. Поэтому нормальные галактики, хотя они и весьма многочисленны, не могут дать заметный вклад в диффузный рентгеновский фон. Горячая плазма, заключенная в богатых скоплениях галактик, интенсивно испускает рентгеновские лучи, но такие скопления слишком редки и способны обеспечить лишь несколько процентов интенсивности рентгеновского фона. Квазары лучше всего удовлетворяют комбинации требуемых свойств: выход энергии их рентгеновского излучения огромен, и на больших расстояниях от Земли они достаточно многочисленны.

тия квазаров астрономы обнаружили, что свойства этих загадочных объектов изменяются во времени. Данные рентгеновских наблюдений также подтверждают факт эволюции квазаров. Согласно наблюдениям, проведенным в Астрономическом центре обсерватории Гарвардского колледжа и Смитсоновской астрофизической обсерватории (США), отношение энергии квазара, испускаемой в рентгеновских лучах, к энергии его видимого излучения, по видимому, зависит еще от одной (или нескольких) характеристики, в том числе и от расстояния квазара до нашей Галактики.

Выводы, полученные на основе явно изменяющихся во времени характеристик рентгеновского излучения квазаров, трудно использовать, особенно потому что вклад квазаров в рентгеновский фон определяется полным излучением от квазаров, разбросанных по всей Вселенной, а они находятся на разных стадиях эволюции. Поэтому необходимо знать, как именно меняются квазары в ходе эволюции, чтобы правильно учесть их вклад в фоновое излучение.

Последняя трудность хорошо знакома специалистам, проводящим опросы населения: насколько правильно ответы на вопросы, заданные небольшому числу людей, передают общественное мнение. В программу спутника «Эйнштейн» входило исследование квазаров, открытых в предшествующие годы; все они обладают огромной светимостью либо в радиодиапазоне, либо в видимой области, благодаря чему и были обнаружены. Трудность состоит в следующем: правильно ли передают эти объекты свойства квазаров, открытых по их рентгеновскому излучению?

В НАЧАЛЕ осуществления программы спутника «Эйнштейн» не было иной возможности, чем проведение наблюдений уже известных квазаров, но высокая чувствительность используемых детекторов рентгеновского излучения неожиданно открыла перед исследователями и другую возможность. Типичное наблюдение включало ориентирование спутника таким образом, что интересующий нас астрономический объект до экспозиции оказывался в центре сфокусированного рентгеновского изображения. Как и в любой камере, на изображение снимаемого объекта налагалась часть окружающей области. Изучение рентгеновских изображений со спутника показало, что на них часто появляются один или более дополнительных слабых источников рентгеновского излучения на краю изображения, не соответствующих первоначальному объекту экспозиции.

Чем больше экспозиция в рентгеновских лучах, тем больше таких источников накапливается на данном изобра-

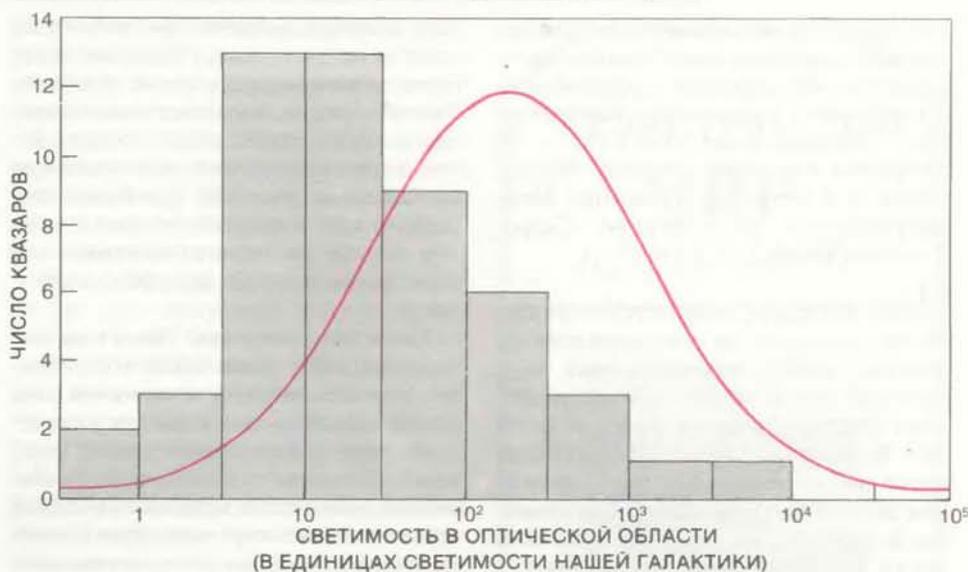


ДИАГРАММА ДЛЯ 51 КВАЗАРА показывает распределение энергии их излучения в видимой области; квазары открыты автором и его коллегами в качестве оптических двойников новых источников рентгеновского излучения, выявленных на изображениях, переданных со спутника «Эйнштейн». До этой работы практически все известные квазары были открыты по их необычному оптическому излучению или радиоизлучению, но не по рентгеновскому излучению. Цветная кривая указывает распределение по оптической светимости 51 квазара, выделенного по их оптическому излучению или радиоизлучению. Методика рентгеновских наблюдений приводит к отбору квазаров с более низкой оптической светимостью, чем у квазаров, открытых ранее. Различие светимости рентгеновских квазаров и ранее открытых квазаров позволяет оценить энергию рентгеновского излучения типичного квазара и определить вклад квазаров в диффузный рентгеновский фон.

жении со спутника. Это открытие подтвердило заключение о том, что, если точечные источники любого типа действительно дают существенный вклад в рентгеновский фон, то новые источники — хороший пример объектов подобного типа: они появились в данных наблюдений непредвиденно, без какого-либо вмешательства со стороны наблюдателя.

Какова же природа этих новых источников? В частности, соответствуют ли они другим объектам, уже хорошо изученным, например с помощью оптических методов, или представляют собой новую составляющую Вселенной? Ответить на этот вопрос нелегко, поскольку ограниченные возможности фокусировки рентгеновских лучей приводят к тому, что рентгеновские изображения оказываются сильно размытыми по стандартам оптической астрономии. Очень трудно точно измерить характеристики размытого изображения на обычной фотографии; столь же трудно определить точное положение на небе любого из новых источников рентгеновского излучения. Вместо точного положения удается определить лишь небольшую область поперечным размером примерно 1/30 градуса, в пределах которой можно вести поиск источника. Такая точность недостаточна для однозначного отождествления объекта с любым извест-

ным оптическим источником. На фотографии в видимых лучах той же области, в которой находится неотжествленный источник рентгеновских лучей, обычно имеются 4 — 6 слабых объектов, любой из которых (или ни один из них) мог бы соответствовать интересующему нас источнику.

Необходимы дальнейшие наблюдения, чтобы выявить природу новых источников рентгеновского излучения и установить, имеют ли они какое-либо отношение к проблеме диффузного рентгеновского фона. Ученые разных стран проводят такие эксперименты; одна из групп исследователей включала Г. Чейнана из Колумбийского университета, Р. Даунса из Калифорнийского университета в Лос-Анджелесе и меня. Наш метод заключался в исследовании обычных фотографий небольших участков неба, которые соответствуют области неопределенности положения каждого из новых источников. Я уже отмечал, что эта процедура в общем дает несколько слабых объектов — кандидатов в оптические двойники рентгеновскому источнику. Затем мы тщательно изучаем такие оптические объекты, пытаемся найти аномальные свойства. (При этом учитывается, что нормальные звезды редко оказываются источниками рентгеновских лучей.) Поскольку их светимость, как правило, в 100 тыс. раз слабее объек-

тов, видимых невооруженным глазом, для наблюдений нужны большие инструменты. Мы работали в основном на 2,1-метровом рефлекторе Национальной обсерватории Китт-Пик, 3-метровом телескопе Ликской обсерватории и 4-метровом телескопе Межамериканской обсерватории Серро-Тололо (Чили).

НАШ МЕТОД основывается на разложении излучения на составляющие по длинам волн. Спектрограммы нормальных звезд имеют темные линии при характерных длинах волн, на которых более холодные атомы в верхних слоях звезды поглощают свет, прежде чем он попадает в детектор. Как правило, в спектрах, которые мы получили почти для каждого звездного объекта вблизи положения нового рентгеновского источника, не проявляются никакие особенности: по-видимому, все эти объекты оказываются нормальными, сравнительно близкими к нам звездами, совершенно неподходящими для роли источников рентгеновского излучения.

Однако в большинстве случаев мы находили в этой же области другой объект, который имел совершенно иной спектр — с дискретным набором длин волн, для которых наблюдался избыток излучения. Эта картина эмиссионных линий, расположенных так же, как линии в спектрах нормальных звезд, указывает на необычный объект с большим количеством горячего газа. Более того, точные длины волн, при которых проявляются эмиссионные линии, соответствуют таким известным элементам, как водород, гелий и углерод, однако имеют место большие систематические смещения спектральных линий к красному концу спектра. Красное смещение указывает на то, что источник света удаляется от наблюдателя. Эта редкая комбинация спектральных характеристик — сильных эмиссионных линий с красным смещением, связанных с распространенными химическими элементами — характерный признак квазара. Мы обнаружили — наряду с другими группами исследователей, работающих над той же проблемой, — что значительная часть новых рентгеновских источников представляет собой неизвестные ранее квазары.

Это открытие имеет большое значение для проблемы происхождения диффузного рентгеновского фона, и особенно для тех предположений, в которых фон объясняется излучением ансамбля удаленных точечных объектов.

Предположим, что мы смотрим сквозь туман на светящиеся объекты, находящиеся на разных расстояниях от нас. Если нам удастся, хотя бы грубо, оценить природу самого яркого объекта, то представляется вполне разум-

ным предположение о том, что аналогичную природу имеет большая часть более далеких неразличимых объектов. Таким образом, отождествление большого числа новых рентгеновских источников с квазарами (в настоящее время известно уже 150 подобных случаев) — шаг к предположению о том, что именно квазары ответственны за значительную долю фонового излучения.

Как велика эта доля? Вносят ли квазары основной вклад в фоновое излучение или они оказываются малой примесью к фону, порождаемому в основном горячей межгалактической плазмой? Поскольку у нас отсутствуют оценки количества межгалактического вещества (если оно существует), которые выводились бы не из интенсивности рентгеновского фонового излучения, то вполне реально, что оба типа источников дают вклад в наблюдаемый поток рентгеновских лучей.

СВОЙСТВА ансамбля неожиданно открытых квазаров — ключ к разгадке этой проблемы. Изучение свойств первых квазаров, открытых по их рентгеновскому излучению, а не по излучению в оптическом или радиодиапазоне, позволяет выявить новые особенности рентгеновского излучения этих загадочных объектов. Сравнение характеристик выборки таких объектов и характеристик прежних выборок квазаров, отобранных по оптическому или радиоионизации, выявляет интересные различия. Энергия излучения для группы объектов, открытых по рентгеновскому излучению, систематически оказывается меньше (и притом значительно, примерно в 10 раз), чем для ансамбля ранее известных квазаров.

Однако точная интерпретация этого различия в данный момент затруднительна. Некоторые исследователи считают, что для ансамбля квазаров характерен широкий диапазон возможных светимостей в рентгеновских и видимых лучах. Тогда в оптические обзоры будут попадать квазары с более интенсивным оптическим излучением, но с нормальным рентгеновским излучением, а в рентгеновские обзоры — объекты с противоположными свойствами. Это существенно усложняет сравнение двух выборок. Помимо того, эволюционные эффекты, о которых упоминалось выше, могут привести к подавлению рентгеновского излучения определенной части квазаров, что порождает еще одно различие между квазарами, открытыми по рентгеновскому и по оптическому излучению. Оба упомянутых эффекта могут действовать одновременно.

Вызывают опасения возможные эволюционные эффекты. Хотя изотропность излучения определяется суммой вкладов источников на различных рас-

стояниях от наблюдателя, можно доказать, что основной вклад дают самые далекие объекты. Однако если свойства объектов непостоянны и меняются с расстоянием, то наиболее далекие и потому очень слабые источники, для которых имеется наименьшее количество надежных данных, могут иметь совершенно иные свойства, чем более яркие, близкие к нам объекты. Для последней группы мы располагаем хорошими данными, но эти данные могут быть не типичны для интересующих нас далеких объектов. Подобные эффекты, по-видимому, сказываются начиная с некоторого (достаточно низкого) уровня интенсивности рентгеновского излучения квазаров. Даже исключительно высокая чувствительность детекторов на спутнике «Эйнштейн» недостаточна для исследования тех объектов, которые должны быть ответственны за основную часть рентгеновского фона, если квазары — действительно основные источники фонового излучения. Поэтому приходится экстраполировать свойства квазаров, отобранных по рентгеновскому излучению, чтобы оценить их полный вклад в диффузный фон. В настоящее время точность такой экстраполяции неизвестна. В зависимости от характера процедуры экстраполяции можно прийти как к выводу, что квазары — основная составляющая фонового излучения, так и к заключению, что их роль пренебрежимо мала.

Хотя неожиданное открытие рентгеновских квазаров привело нас к новым предположениям о вкладе квазаров в фоновое излучение, точная интерпретация новых данных — сложное дело, и в настоящее время она не однозначна. Как часто случается в наблюдательной астрономии, большое увеличение чувствительности инструментов дает не только новые ответы на поставленные вопросы, но и приводит к другим проблемам. Есть ли в настоящее время независимые критерии, для того чтобы разделить вклады в рентгеновский фон от квазаров и от межгалактической плазмы? Одна из возможностей связана с точным измерением спектра наблюдаемого рентгеновского излучения. Потенциальные возможности этого метода очень велики, поскольку различные фундаментальные физические процессы, при которых генерируется рентгеновское излучение, нередко приводят к отчетливо различающимся спектрам.

МЕТОДЫ и аппаратура, применяемые для рентгеновской спектроскопии, более сложные, чем используемые для видимой области спектра. Тем не менее за последние несколько лет при помощи инструментов, размещаемых на спутниках, спектр рентгеновского фона исследуется со все возрастающей

точностью. Многие работы в этой области были выполнены группой ученых из Центра космических полетов им. Годдарда Национального управления по авиации и исследованию космического пространства США. Эти ученые обратили внимание на то, что наблюдаемый спектр фонового излучения очень похож на тот, который может быть характерен для тормозного излучения горячей плазмы с температурой около 500 млн. К. Полученный результат можно рассматривать как веский довод в пользу предположения, согласно которому горячая плазма играет основную роль как источник рентгеновского фонового излучения и вклад квазаров (или других далеких дискретных источников) достаточно мал. Однако, как обычно, в интерпретации результатов наблюдений имеются сложности.

Одна из них связана с тем, что ожидаемый спектр ансамбля квазаров (а не горячей плазмы) связан с основной частью фонового излучения. В этом случае наблюдаемый спектр должен быть суммой индивидуальных спектров большого числа объектов. Однако рентгеновские спектры определены индивидуально только для нескольких самых ярких квазаров, и все они мало похожи на наблюдаемый спектр фонового излучения. Впрочем, не исключено, что рентгеновские спектры далеких квазаров отличаются от спектров близких квазаров из-за эволюционных эффектов. Более того, спектр диффузного фона точнее всего определен в области длин волн, которая немного отличается от той, в которой были получены рентгеновские изображения с помощью спутника «Эйнштейн». Если природа достаточно коварна, чтобы изменить с одного режима на другой механизм излучения, ответственного за основную часть фонового излучения, то те исследователи, которые занимаются изучением его спектральных свойств, и те, которые работают над получением рентгеновских изображений, могут, сами того не зная, решать две разные проблемы.

Существует один метод, который позволяет однозначно выявить вклады далеких дискретных рентгеновских источников и горячей плазмы. Я уже упоминал, что чем больше была экспозиция при измерениях со спутника «Эйнштейн», тем большее число новых рентгеновских источников обнаруживалось. Поэтому доля вклада в рентгеновское излучение этих источников, отнесенная к полному потоку рентгеновского излучения, соответствующего целому изображению, заведомо оказывается нижним пределом для доли фонового излучения, порожденного дискретными источниками. Для самой большой экспозиции эта доля составляет примерно $\frac{1}{4}$. Несомненно, объек-

ты, подобные квазарам, должны обязательно давать какой-то (пусть неизвестный) вклад в фоновое излучение. Однако описанные выше измерения не охватывают даже 50% исследованных областей неба, так что на вопрос, ответственны ли дискретные источники за основной вклад в фоновое излучение, пока уверенно ответить нельзя.

Таким образом, более мощная аппаратура для получения рентгеновских изображений, чем установленная на спутнике «Эйнштейн», — потенциальное средство для преодоления этих трудностей наиболее простым способом, путем разрешения каждого из достаточно слабых источников. Это даст реальную возможность для точной оценки вклада дискретных источников в полное излучение любого участка неба или, напротив, позволит обнаружить, что при очень низких уровнях яркости рентгеновское фоновое излучение остается диффузным и не распадается на вклады от отдельных источников. Необходимая для этого мощная аппаратура уже существует, и НАСА предполагает установить ее на спутник. Для осуществления этого проекта, названного Advanced X-Ray Astrophysics Facility (AXAF) потребуются примерно 10 лет после выделения соответствующих средств. Комитет астрономов, возглавляемый Дж. Филдом из Гарвардского университета, недавно подготовил план работ для следующего десятилетия, и указанный проект оказался в нем первым.

В НАСТОЯЩЕЕ время неясно, позволят ли дальнейшие исследования случайно открытых рентгеновских источников лучше понять эволюционные изменения квазаров. Если бы это оказалось возможным, то с учетом более детальных оптических данных по большому числу квазаров, как правило обнаруживаемых в любом малом участке неба, можно было бы провести точный расчет вклада квазаров в фоновое излучение и последующую оценку вклада горячей межгалактической плазмы. Необходимые оптические данные должны быть обеспечены космическим телескопом, который готовится к запуску в 1985 г. Либо к этому времени, либо в начале 90-х годов, когда начнется осуществление упомянутого выше проекта AXAF, можно будет узнать, действительно ли космический рентгеновский фон и квазары (независимо открытые 20 лет назад) связаны между собой.

Издательство
МИР
предлагает:

Э. ФРИД /
**ЭЛЕМЕНТАРНОЕ
ВВЕДЕНИЕ
В АБСТРАКТНУЮ
АЛГЕБРУ**



Эрвин Фрид
**ЭЛЕМЕНТАРНОЕ
ВВЕДЕНИЕ
В АБСТРАКТНУЮ
АЛГЕБРУ**

Перевод с английского

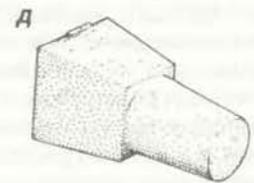
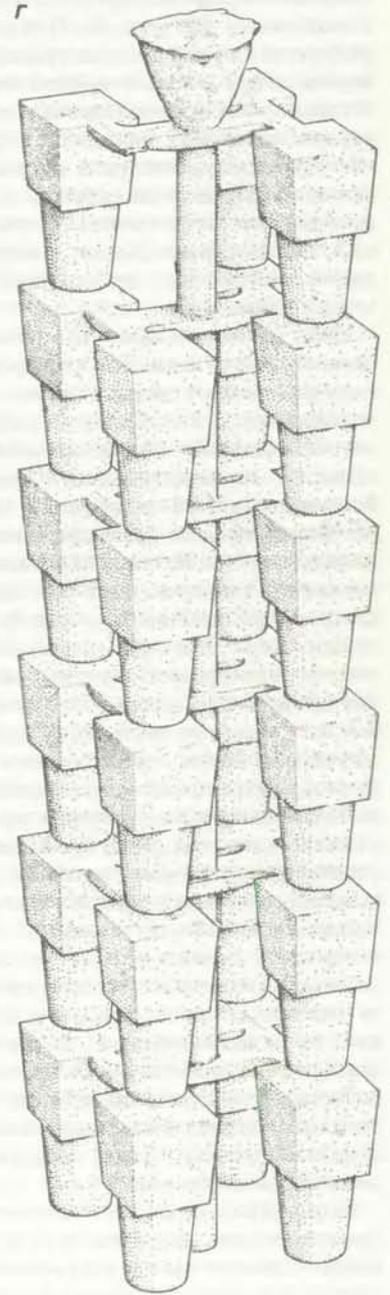
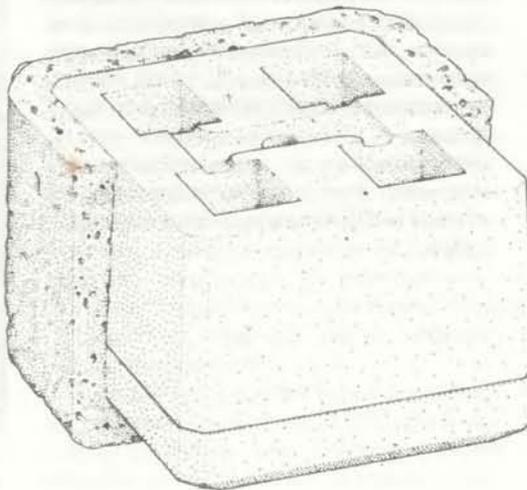
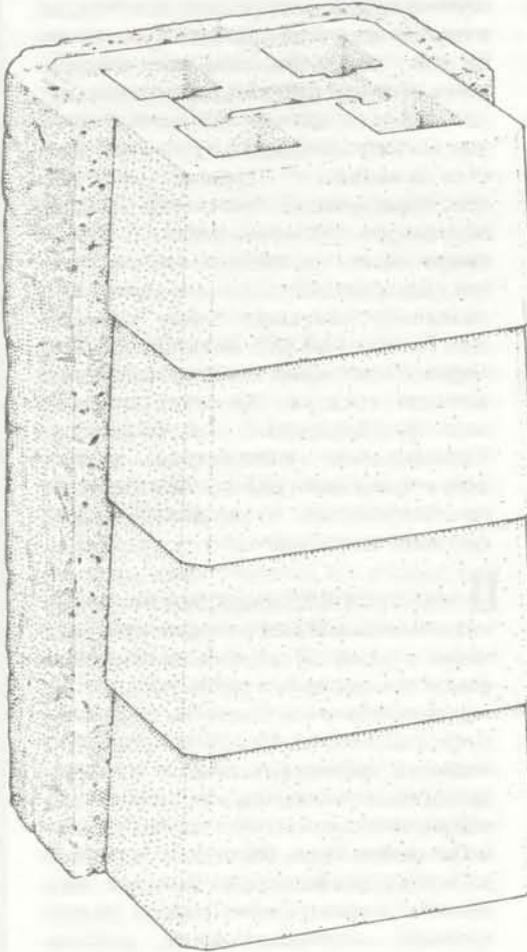
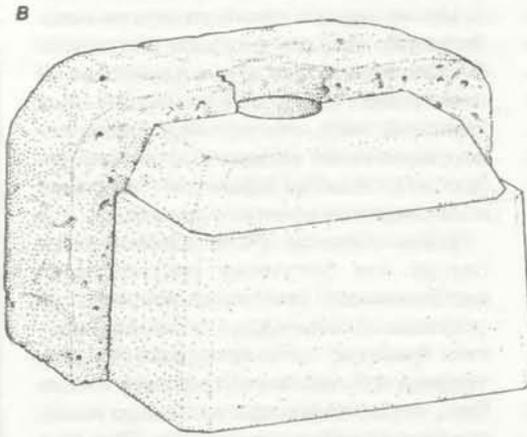
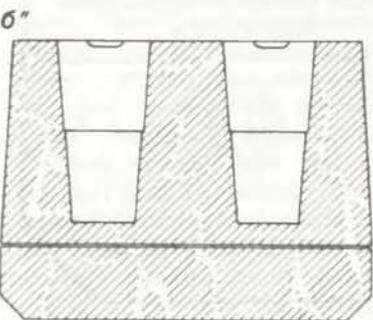
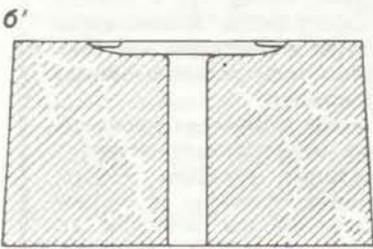
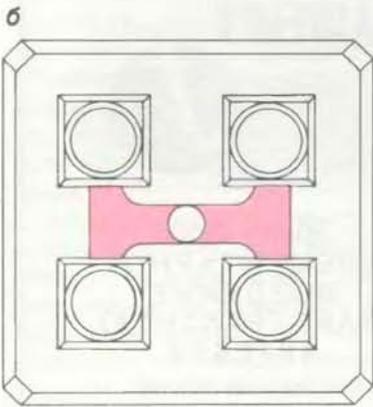
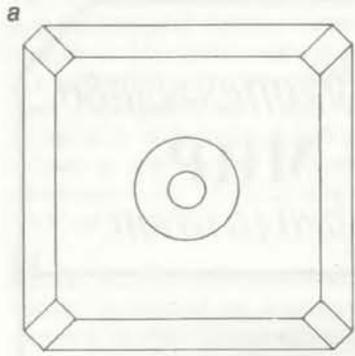
Книга известного венгерского математика Эрвина Фрида содержит популярное, но достаточно строгое изложение основ абстрактной алгебры. В доступной, яркой и убедительной форме представлены теория групп и полугрупп, колец, тел и векторных пространств, рассмотрены структуры и операции над множествами, соотношения 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.





Производство металлических отливок в древнем Китае

К 500 году до н.э. в Китае уже существовал технологически совершенный способ стопочного литья: одновременной заливкой металлом многоярусных форм получалось большое количество одинаковых изделий

ХУА ЦЗЮЕМИН

ОДНОЙ ИЗ наиболее распространенных технологий древности, восходящей по крайней мере к династии Ся (с XXI по XVI в. до н.э.), является бронзовое литье в Китае. Менее известно за пределами Китая достижение первого тысячелетия до нашей эры — массовое производство железных* отливок. Китайские литейщики отливали монеты, пряжки для конских сбруй, детали упряжи, повозок и другие мелкие изделия способом стопочного литья, что позволяло производить их в больших количествах. Суть метода состояла в том, что формы ставились одна на другую стопкой и заливались расплавленным металлом через общий стояк. Одновременно можно было заливать десятки форм, экономя при этом и металл и топливо. Метод стопочного литья, возникший в Китае между 800 и 500 гг. до н.э., применяется и по сей день.

Остатки литейных производств, использовавших указанную технологию, были обнаружены в провинциях: Хэнань, Шаньдун, Шэньси и Цзянсу во время недавних археологических раскопок. Пожалуй, самой значительной находкой, сделанной около десяти лет назад, явилась обжиговая печь, которую обнаружили западнее г. Вэньсяня сотрудники Хэнаньского провинциального музея Ли Цзинхуа и Тан Вэнсин. Печь была основной частью крупного литейного производства периода Восточной Ханьской династии (с 24 по

220 г. н.э.). В печи нашли несколько сотен не пострадавших от времени комплектов форм, конструкция которых позволяла за один цикл получать более 80 отливок. Многие формы так хорошо сохранились, что исследователям удалось отлить в них металлические изделия точно так же, как это делалось почти 2000 лет назад.

Прежде чем рассказать о результатах работы археологов в районе Вэньсяня, уместно познакомить читателя с основными этапами технологии литья металла: изготовлением форм, плавкой металла, заливкой его в формы и затвердеванием. Наиболее трудоемкая операция — изготовление форм. Как в древности, так и в сравнительно недавние времена идеальным материалом для литейных форм была глина. Она в избытке есть повсюду, ее надо лишь растереть, просеять и промыть.

Когда сухая глина смешивается с водой, ее мельчайшие пластинчатые частицы покрываются пленкой, позволяющей им скользить относительно друг друга при малейшем нажиме. В то же время из-за поверхностного натяжения пленки воды частицы глины трудно отделить друг от друга. В зависимости от пропорции воды и глины можно получить смесь любой консистенции — от жидкой до густой массы. Высыхая, глина приобретает относительную прочность, которую можно существенно повысить путем обжига в печи. Подобно большинству народов мира, китайцы хорошо знали эти свойства глины благодаря развитию гончарного дела за десятки веков до возникновения металлургии.

ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА литейных форм использовалась как жидкая масса, так и густая пластичная глина. Форму нужной конфигурации можно получить, вдавливая в кусок густой глины деревянную или металлическую модель либо обмазывая ее жидкой глиной и слой за слоем просушивая. В этом случае модель извлекается из точно повторяющей ее конфигурацию затвердевшей оболочки. Полученные формы использовались многократно.

Для удаления из глины остатков влаги, уменьшения возможности образования паровых пузырьков, вызывающих дефекты на поверхности отливок, и повышения прочности литейных форм их просушивали и подвергали обжигу. Обжиг необходим еще и потому, что расплавленный металл, залитый в вынутые из печи горячие формы — как это делалось в вэньсяньской литейной, — затвердевает медленно, заполняя все полости формы.

Замедленное остывание расплава было чрезвычайно важно, так как многоярусные формы вэньсяньской литейной имели очень узкие литниковые каналы, соединяющиеся со стояком, а преждевременное затвердевание металла в этих каналах могло привести к дефектам в отливках. Вместе с тем увеличение диаметра каналов не упростило бы само производство. В то время китайцы применяли не обычный серый чугун, известный на Западе, а белый, твердость которого значительно выше, и, чем шире были бы каналы, тем больше литники, которые необходимо срезать с отливок, приложив в этом случае больше усилий для обработки изделий, что в свою очередь снизило бы производительность труда.

Бронза — первый сплав, литье которого осуществлялось в Китае в больших масштабах, в основном состоит из меди. Но поскольку залежи медных руд значительно уступают залежам железных, неудивительно, что постепenно в Китае, как и во всем мире, ос-

*То есть из сплавов на основе железа. — Прим. ред.

СТОПКА ИЗ ШЕСТИ ФОРМ для одновременного производства 24 запорных клиньев из высокоуглеродистого белого чугуна: а — воронкообразное отверстие стояка, через которое заливается расплав (вид сверху); б — четырехместная форма (цветом выделены литниковые каналы); б' — литниковые каналы, соединяющиеся со стояком; б'' — две из четырех литейных полостей; в — стопочный комплект с отделенными верхней и нижней формами; покрыт слоем глины (темный цвет); г — отливка после затвердевания металла и разрушения формы; д — запорный клин (литник удален).

новным «рабочим» металлом становится железо. В Европе и в Азии, вплоть до Индии, первые железные изделия производились с помощью плавки и последующейковки. В результате плавки получали пористую, наполненную шлаками заготовку, из которой во времяковки «выбивали» большую часть вязкого шлака. Затем железо нагревалось в горне и обрабатывалось молотом на наковальне, превращаясь в орудия труда, оружие, украшения.

Иным было производство железа в Китае. В отличие от европейцев и народов Западной Азии китайцы, используя больше топлива и нагнетая больше воздуха в плавильные печи, создавали условия для полного расплавления железной руды и получали металл, богатый углеродом и свободный от шлака. Углерод — важный компонент, так как с повышением его содержания в сплаве снижается точка плавления металла. Так, чистое железо начинает плавиться только при температуре 1535 °С, и вплоть до XIX в. не удавалось получить такую температуру плавления. Если же сплав на основе же-

леза содержит 4,3% углерода, то он полностью переходит в жидкое состояние при температуре 1130 °С, что лишь примерно на 80 °С выше температуры плавления бронзы. Обнаружив это свойство, китайские литейщики, в совершенстве владевшие искусством бронзового литья, применили уже существующую технологию к обогащенному углеродом металлу, используя при этом сырье, имевшееся в изобилии.

К СЕРЕДИНЕ первого тысячелетия до нашей эры производство отливок из железоуглеродистых сплавов получило широкое распространение в Китае. Из них делали орудия труда — топоры, молотки, лопаты, мотыги, лемехи плугов; украшения — пряжки, кольца; предметы домашнего обихода — горшки, жаровни; детали упряжи, повозок, оружие. Примерно с 300 г. до н.э. до 1100 г. н.э. — период значительного технического прогресса. Скорее всего это был и период роста народонаселения. Связующим фактором этих процессов может служить железный плуг. Человеку стало под силу не только об-

рабатывать освоенные участки земли, но и распахивать целину. Именно плугом с железным лемехом поднимались в XIX в., к примеру, девственные прерии в Северной Америке. В Китае, как и в других странах, сначала плуг был деревянным. Поэтому нетрудно представить себе, что появление железного плуга к концу первого тысячелетия до нашей эры произвело революцию в расширении площади пахотных земель, увеличении производства продуктов питания, что в свою очередь способствовало резкому росту населения страны. С развитием сельского хозяйства и ремесел стала возрастать потребность в транспортных средствах, в металлических изделиях для повозок и экипажей. В это время и появилась литейная в районе Вэньсяня.

В обжиговой печи этой литейной получали в основном металлические отливки для транспортных средств на конной тяге. С помощью 500 наборов форм, найденных археологами, можно было изготовить 16 видов различных изделий 36 размеров. Среди них — мундштуки для удил, кольца и пряжки для сбруй, а также арматура для повозок: подшипники и осевые втулки. Кроме того, здесь были формы для литья гирек к безменам — простейшим рычажным весам, которые и по сей день можно встретить на рынках.

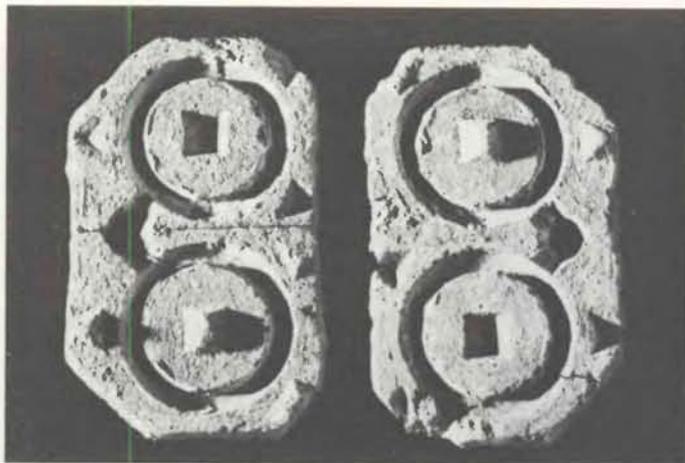
Полная идентичность контуров каждого набора литейных форм приводит к мысли об изготовлении их с помощью стандартных моделей, сделанных из металла. Преимущество таких моделей заключалось в том, что любые две изготовленные с их помощью полуформы образовывали при составлении полную форму. Это особенно удобно при производстве мелких деталей, например пряжек. Так, использование стопки шестиместных форм из 14 ярусов позволяло одновременно получать по 84 отливки пряжек. При наличии же множества формовочных моделей одновременно в процессе изготовления литейных форм могло принимать участие большое число рабочих, что существенно увеличивало производство продукции.

АНАЛИЗ растительных остатков в вэньсяньской литейной показывает, что до нанесения слоя глиняной пасты на металлические модели последние обсыпались измельченными отрубями, которые способствовали отделению полученной глиняной формы от модели. Затем формы высушивались в течение примерно недели в подвале или другом затененном месте.

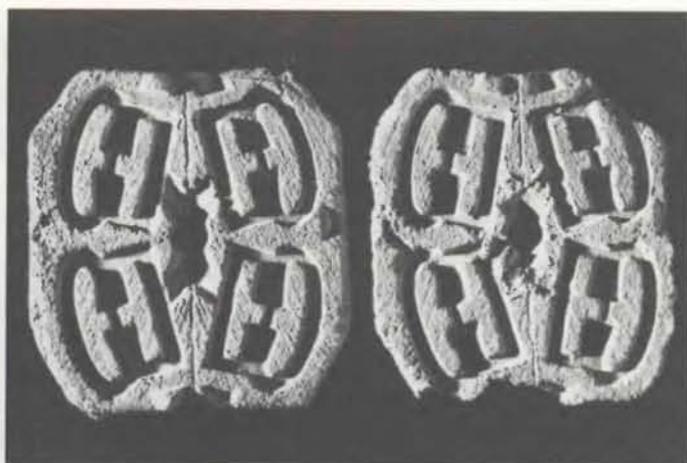
При накоплении достаточного для загрузки в печь количества высушенных на воздухе форм их собирали вертикальной стопкой, следя за тем, чтобы отверстие стояка каждой последующей формы находилось строго над



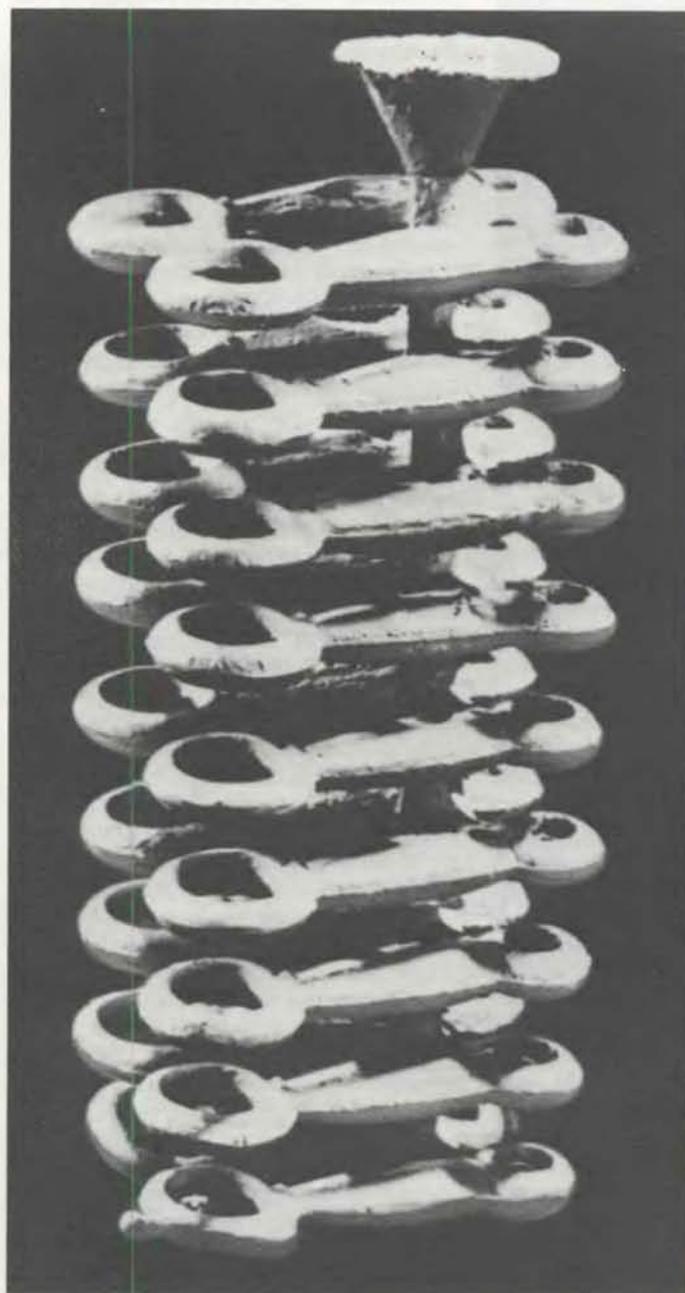
АРХЕОЛОГАМИ НАЙДЕНЫ формы для стопочного литья около Цзыбо в Шаньдуне, вблизи Наньцзина и в местечке Цзюрун в Цзяньсу (светлые кружки). Литейные формы и печи обнаружены около Сианя в Шэньси и вблизи Наньяна и Вэньсяня в Хэнане (темные кружки).



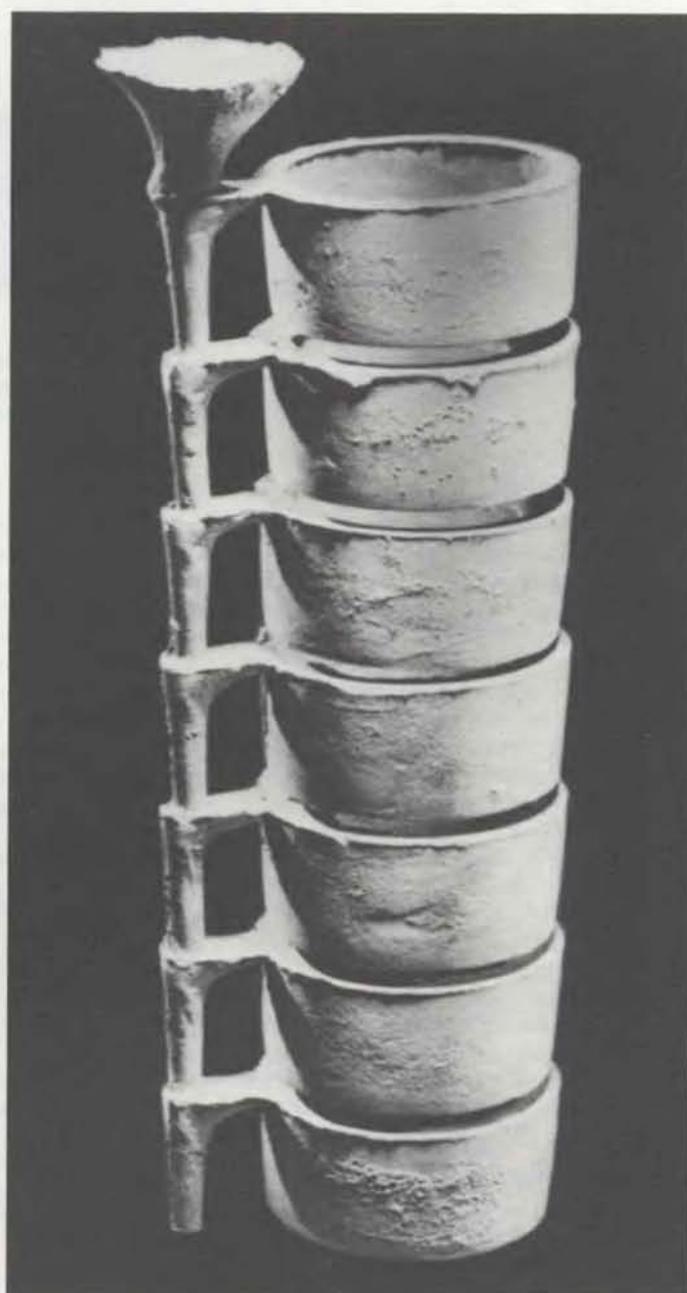
ДВА ТИПА ПОЛУФОРМ. Слева — для производства двух колец, справа — для производства четырех пряжек. Так как



формы небольшие, их можно было составлять в стопку по 10 и более штук.



ФОРМЫ, ИЗГОТОВЛЕННЫЕ 2000 ЛЕТ НАЗАД, составили стопкой, соединили и залили расплавленным металлом. В результате археологи получили 18 конских мундштуков (сле-



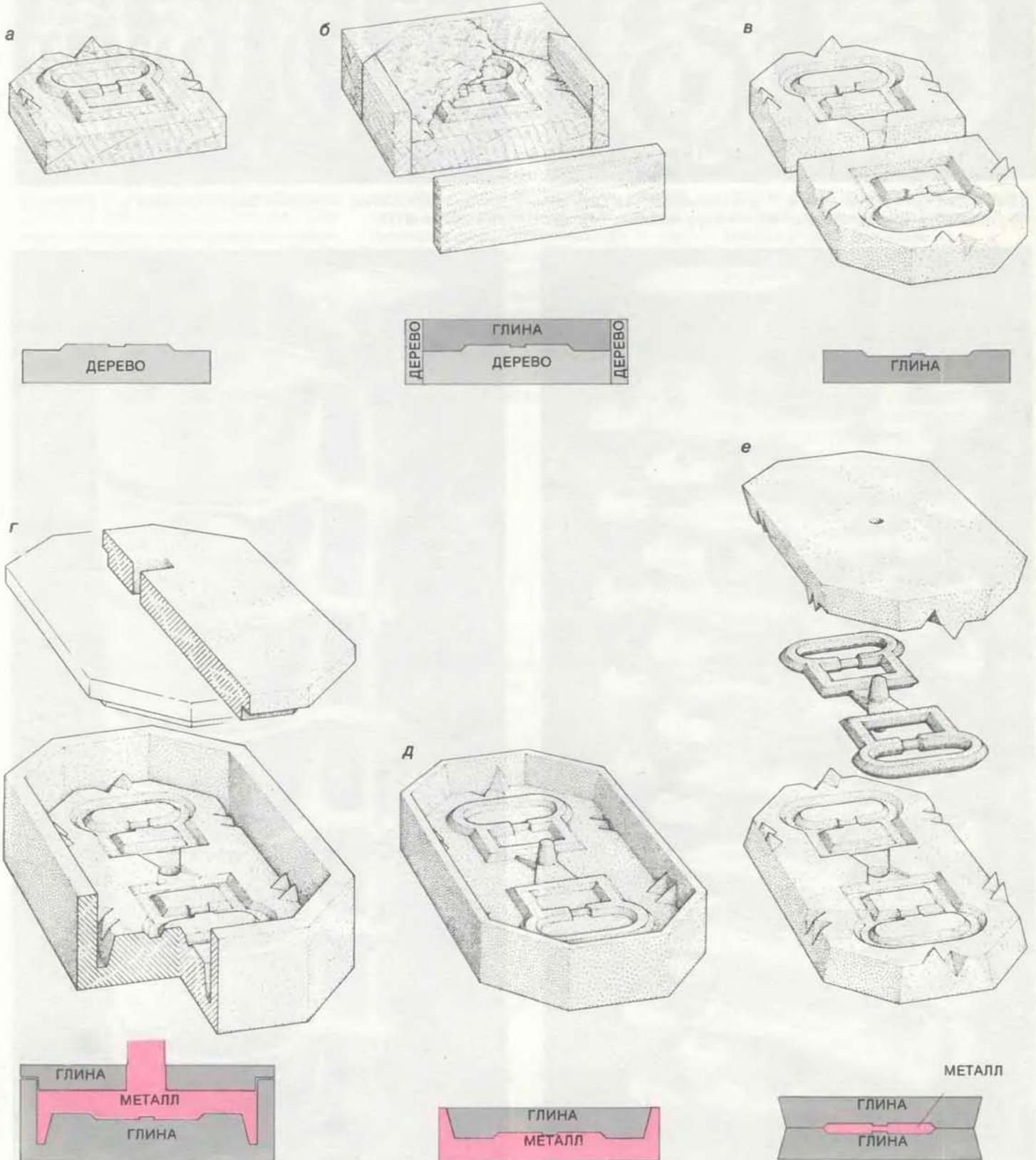
ва) и семь осевых втулок (справа). Втулок меньше, так как их высота больше.

нижним. Одни формы соединялись с помощью шпунтов и пазов, другие крепились единым штырем, проходящим через все ярусы. Собранный таким образом стопок обмазывался глиной, перемешанной с резаной соломой (традиционный материал для изготовле-

ния сырцового кирпича), и снова оставлялась для просушки. Благодаря такому покрытию многоярусная форма становилась единым целым. Теперь она была готова для обжига в печи.

Вэнсяньская печь, как показали раскопки, имела 3 м в ширину и 7,4 м в

длину. Вдоль передней стенки проходила неглубокая канавка, в которой разводили огонь. Основание печи было выложено кирпичом; три трубы в задней стенке служили для выхода горячих газов. Равномерное распределение жара в печи достигалось точной рас-



МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ обеспечивали массовое изготовление глиняных форм: *а* — вырезанная из дерева копия половины металлической пряжки; *б* — воспроизведение негативного оттиска в ящике с глиной; *в* — две негативные

копии из глины; *г* — форма из двух глиняных половинок для получения металлической модели; *д* — готовая металлическая модель, использовалась для производства сотен глиняных форм для пряжек *е*.

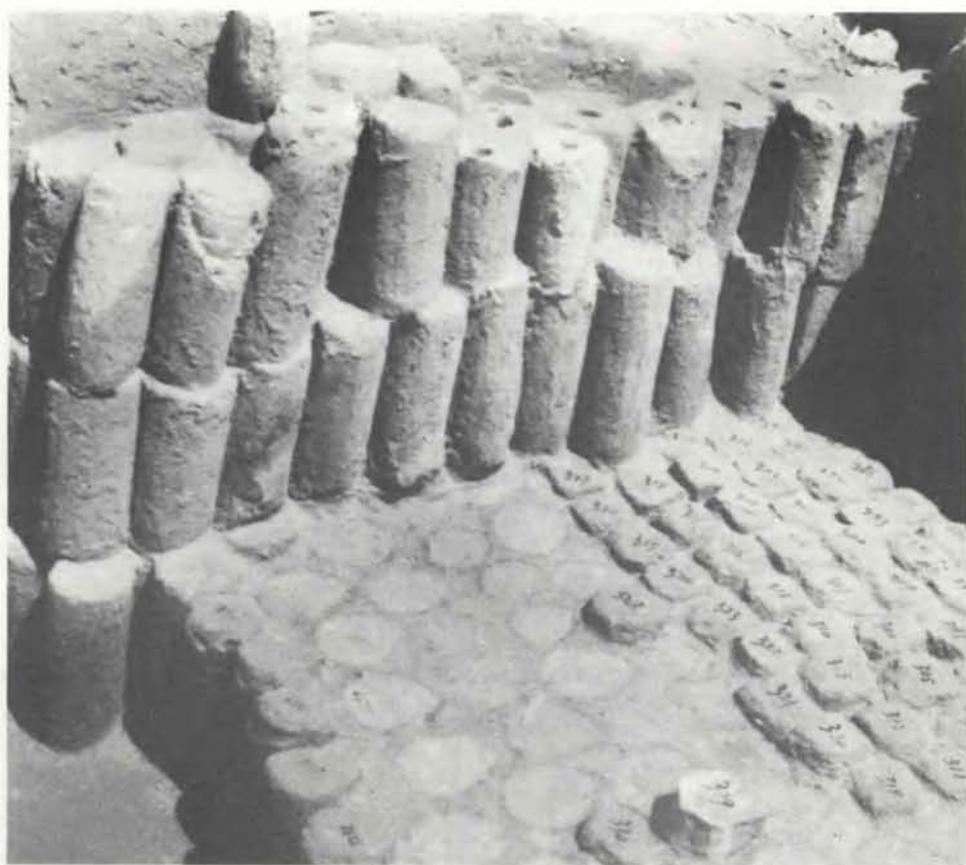
становкой обжигаемых форм. Судя по цвету обожженной глины, температура в печи превышала 700 °С.

Во времена Ханьской династии и в течение многих последующих веков топливом в литейном производстве служила древесина: щепы и поленья для обжиговых печей и древесный уголь для плавильных. Использование древесины в конечном счете привело к поредению лесных массивов на территории страны (равно как и в Европе). И к концу первого тысячелетия нашей эры в Китае началась разработка месторождений каменного угля, ставшего основным промышленным топливом.

УЧИТЫВАЯ, что литейщики Ханьского периода заливали расплав в горячие формы, чтобы он успел заполнить все полости, можно предположить, что в Вэньсяне рядом с обжиговой печью находилась плавильная, и тигли с жидким металлом стояли наготове в ожидании момента, когда формы будут вынуты из печи. Исследователи доказали, что, хотя эта процедура и означала экономию топлива, возможен был и повторный разогрев уже остывших многоярусных форм, некоторое время спустя после их первого разогрева. И исследователи нагрели стопки форм через 2000 лет! При этом им удалось получить много ценных сведений о методах, которыми, возможно, пользовались литейщики эпохи Хань.

Для этого исследователям пришлось воспроизвести весь процесс стопочного литья. Формы были очищены, собраны ярусами, обмазаны глиняной смесью и просушены. Во время первого эксперимента формы выдерживались при температуре 300 °С в течение примерно пяти часов, а затем были залиты расплавленным металлом. После охлаждения стало ясно, что отливки получились низкого качества: они имели большие пустоты и чрезмерную усадку. Очевидно, формы были недостаточно разогреты. Во время второго эксперимента температуру довели до 600 °С и выдержали формы в течение 6 часов. Затем прямо в печи формы охладили до 300 °С и залили металлом. Все отливки, за исключением одной, получились высокого качества.

Стопочное литье как технология массового производства изделий возникло в Китае уже к середине первого тысячелетия до нашей эры. Сложные литейные формы, найденные во время раскопок в районе Вэньсяня, являют собой вершину более чем пятитысячелетнего опыта в развитии металлургии железа. Количество форм, устанавливаемых стопкой, находилось в строгой зависимости от конструкции отливаемых деталей и площади основания самих форм. Тщательно выверяя оптимальную высоту каждой формы, вэньсяньские литейщики могли, например, за



ТРИ ЯРУСА СТОПОЧНЫХ ФОРМ открылись взору археологов во время раскопок около Вэньсяня. С помощью 500 найденных форм можно было изготовить 16 видов изделий 36 размеров.

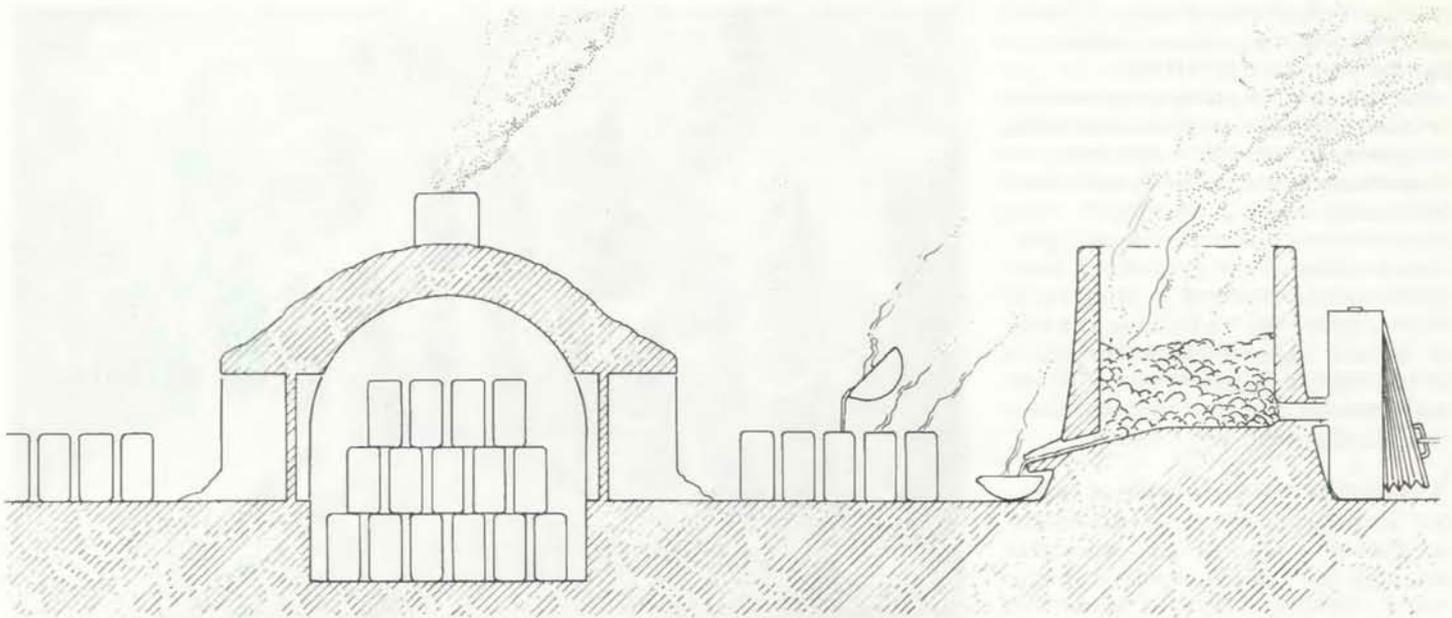
одну заливку 6-ярусной стопки из четырехместных форм получить сразу 24 отливки запорных клиньев. Конечно, для изготовления таких предметов, как пряжки, высота которых намного меньше их длины и ширины, в стопку можно было складывать гораздо больше форм. Одна такая форма, найденная во время раскопок, имела шесть полостей для производства пряжек, причем ее высота равнялась лишь десятой части длины. Так что стопка, составленная из 20 таких форм, позволяла получить 120 пряжек за одну заливку.

Среди вэньсяньских находок была одна форма весьма сложной конфигурации, которая предназначалась, очевидно, для изготовления металлической модели, с помощью которой делали глиняные формы для отливки пряжек. Изготовление таких моделей было делом трудоемким, тем не менее оправданным — по оценке ученых одна такая модель могла быть использована для производства примерно 10 000 глиняных форм.

В ЭТОТ ЖЕ ПЕРИОД в других районах Китая для производства отливок применялись металлические формы (кокили). Правда, их использование ограничивалось литьем изделий несложной конфигурации: лемехов для плугов, то-

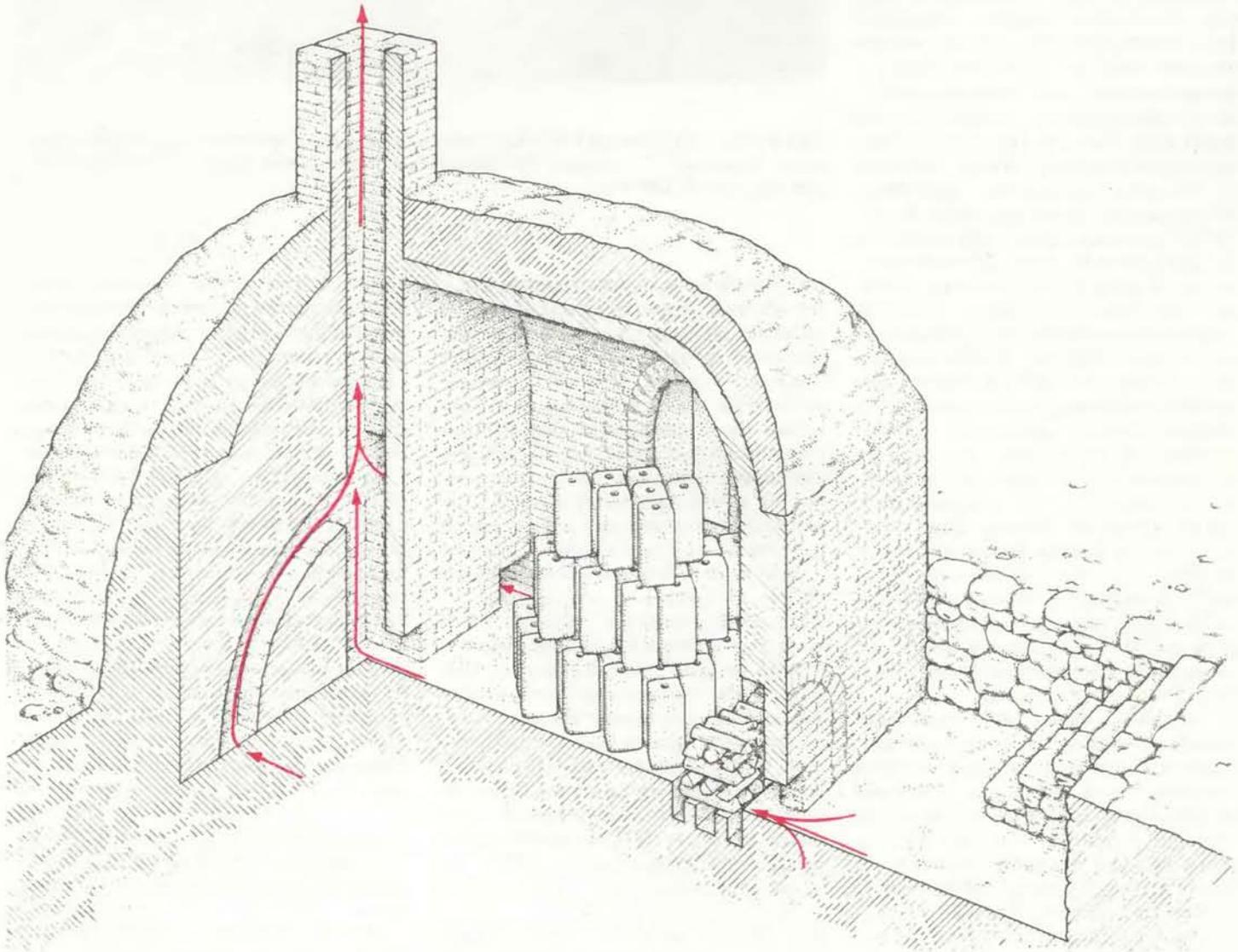
поров, мотыг и т.п. Соединяя полужесткие формы кокилей, получали готовую литейную полость для заливки расплавленного металла. Подобные формы «постоянного пользования» отличались прочностью, имели толстые стенки, а их теплопроводность была значительно выше, чем у глиняных форм. Сборка кокиля, заливка расплавленным металлом, его затвердевание и извлечение горячей отливки занимали считанные минуты — и кокиль вновь был готов для следующей заливки. По сравнению с методом стопочного литья использование кокилей увеличивало производительность труда и уменьшало себестоимость продукции, но сводилось лишь к изготовлению несложных отливок. И хотя подобные формы не были обнаружены в районе Вэньсяня, сам факт, что около двух тысячелетий назад в Китае применялись как металлические, так и глиняные формы, говорит о том, что любой метод, дающий увеличение выпуска продукции, внедрялся в литейное производство.

Чем же объясняется столь ранний расцвет технологически сложного литейного дела в Китае? Археологические раскопки подтверждают, что мастера прошлого обладали и незаурядными способностями и известной изо-



ВОЗМОЖНАЯ СХЕМА ВЭНЬСЯНЬСКОЙ ЛИТЕЙНОЙ. Печь для обжига стопочных форм (слева); открытый горн для расплавления металла с нагнетающими воздух мехами

(справа). В Вэньсяне, однако, открытый горн не был обнаружен.



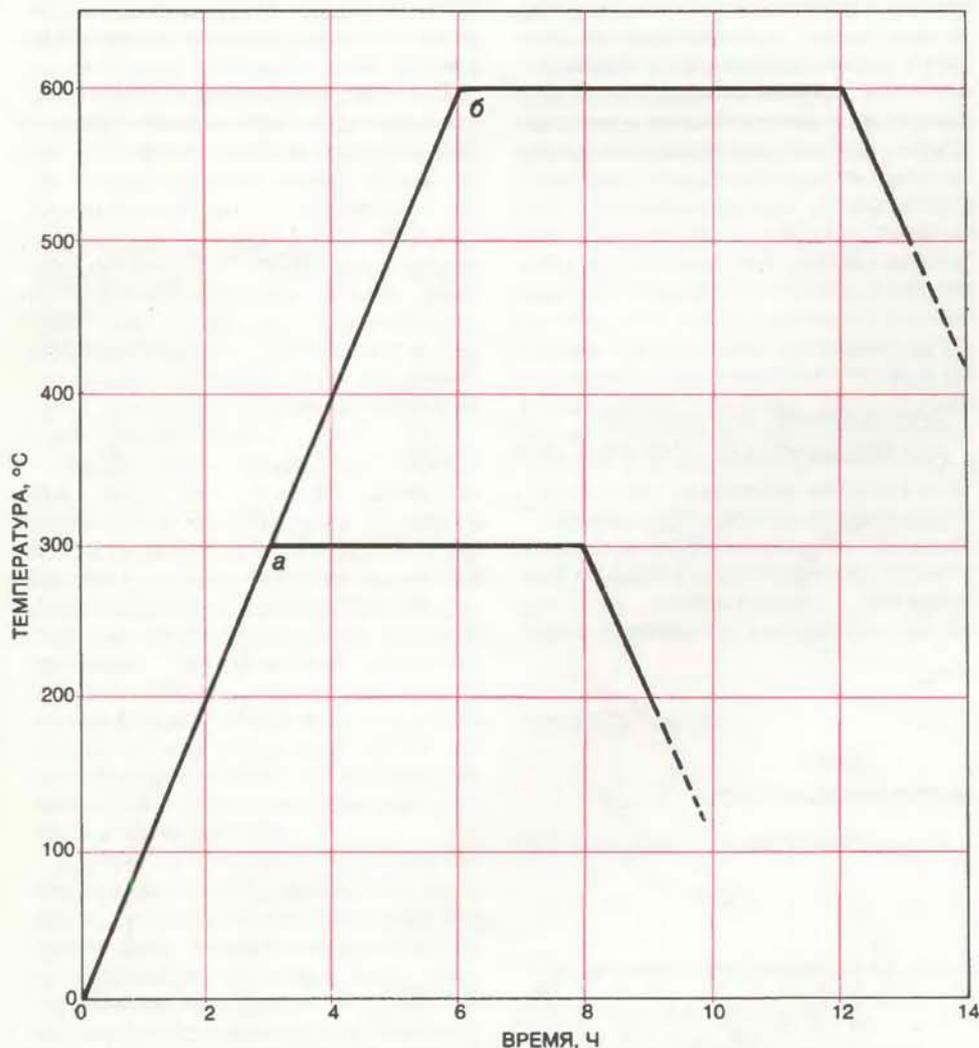
ОБЖИГОВАЯ ПЕЧЬ со сложенными стопкой формами в том виде, в каком она была воссоздана исследователями. Цветными стрелками показан путь горячих газов. Вэньсянская

печь имела 3 м в ширину и 7,4 м в длину. Температура в печи, очевидно, превышала 700 °С.

братательностью. Но при соответствующих условиях любой литейщик в любой стране и в любое время мог бы изобрести стопочное литье. Каковы же тогда были условия для этого в Китае? Во-первых, наличие базовой технологии: задолго до возникновения черной металлургии в Китае процветало литье бронзы и гончарное производство. Во-вторых, социальные условия, служившие предпосылкой для технического развития страны. Представляются очевидными технологические и экономические преимущества в первом тысячелетии до нашей эры именно массового производства орудий труда, деталей упряжи, украшений и прочего из доступного и дешевого сырья. Действительно, чем меньше стоил товар, тем больше был на него спрос. Поэтому значение факта появления стопочного литья, интересного самого по себе, неизмеримо возрастает в свете изучения социальных условий, в которых такое

техническое новшество могло возникнуть.

Стопочное литье явилось важной ступенью в развитии литейного производства на заре китайской металлургии. Оно продолжает использоваться и по сей день. Например, на современном литейном заводе в Фошане в провинции Гуандун с помощью стопочного литья производятся шестерни и другие точные отливки, требующие строгого соблюдения размеров и хорошей подгонки. Находки, сделанные в Вэньсяне и других районах Китая, не только дают китайцам возможность понять и оценить наследие, но и способствуют дальнейшему прогрессу. Как писал Уайлдер, историк и эксперт в области технологии: «Мы изучаем прошлое, потому что наше настоящее и будущее есть его продолжение. Оглядываясь назад, мы лучше видим то, что впереди».



ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ ПРОЦЕССА ЛИТЬЯ Ханьского периода: первая проба (а) — формы нагрели до температуры примерно 300 °C и сушили меньше 6 ч. Отливки получились со многими дефектами. Вторая проба (б) — температура была доведена до 600 °C, и формы сушились в течение 6 ч. По охлаждению их до 300 °C был залит металл. За одним исключением, качество отливок во второй партии было отличным.

Издательство
МИР
предлагает:

И. Экланд, Р. Темам
ВЫПУКЛЫЙ АНАЛИЗ
И ВАРИАЦИОННЫЕ
ПРОБЛЕМЫ

Перевод с английского

Книга молодых и активно работающих французских математиков — первая монография по данной тематике. Авторами рассмотрены два круга вопросов. С одной стороны, они применяют методы двойственности к многомерным вариационным задачам, обсуждают численные методы, доказывают теоремы существования решений многомерных задач, с другой — обсуждают проблемы квазирегуляризации, связанные с выпуклыми расширениями многомерных вариационных задач.

Книга представит несомненный интерес для математиков широкого профиля, интересующихся вопросами оптимизации, вариационного исчисления и оптимального управления.

Содержание: I. Основы выпуклого анализа. II. Двойственность и выпуклые вариационные задачи. III. Невыпуклые вариационные задачи и релаксация.

1979, 20 л., Цена 1 р. 80 к.

Эту книгу вы можете приобрести в магазинах книготоргов, распространяющих научно-техническую литературу. Если в ближайшем от вас магазине этих книг не окажется, заказ можно направить по адресу:

121019 Москва, просп. Калинина, 26, п/я 42, магазин № 200 «Московский Дом Книги»

117334 Москва, Ленинский проспект, 40, магазин № 115, «Дом научно-технической книги»

191040 Ленинград, Пушкинская ул., 2, магазин № 5 «Техническая книга»

Книга будет выслана наложенным платежом (без задатка)



Наука вокруг нас

Простая и наглядная демонстрация фундаментальных явлений физики

ДЖИРЛ УОЛКЕР

МОЖЕТ показаться, что непрофессиональный физик-экспериментатор не в состоянии осуществить опыты, подтверждающие классические положения физики. Однако именно такие три эксперимента поставил Р. Э. Крендалл из Колледжа Рида. Один из его опытов демонстрирует доплеровское смещение света путем преобразования этого явления в звук. Во втором измеряется постоянная Планка, которая играет исключительно важную роль в квантовой механике. Третий эксперимент служит для определения универсальной гравитационной постоянной, той самой, которая хорошо известна в ньютоновской теории тяготения. Все три эксперимента Крендалла отличаются исключительной простотой.

Световые интерферогаммы не сложно воспроизвести в любом школьном кабинете физики, и о них знает

практически каждый неспециалист. Как правило, интерферограмму наблюдают непосредственно либо осуществляют разветку с помощью фотозлемента. Крендалл и его студент Э. Вишнау разработали метод, который позволяет «услышать» интерференцию света.

Луч гелий-неонового лазера мощностью 2 мВт пропускается через стеклянную пластинку. Часть луча отражается от пластинки на фототранзистор (типа Моторола MRD 3052 NPN), который служит фотозлементам. Остальная часть луча проходит через пластинку, попадает на зеркало (или какую-либо другую отражающую поверхность), установленное на диффузоре небольшого громкоговорителя, и отражается. Часть отраженного света попадает на тот же фототранзистор и интерферирует со светом, падающим непо-

средственно от стеклянной пластинки.

На транзистор подается смещение (опорное напряжение) от источника напряжением 15 В через сопротивление 30 кОм. Когда свет от пластинки падает на транзистор, он генерирует сигнал, который подается на вход обычного стереоусилителя. Усиленный сигнал поступает на второй громкоговоритель, который преобразует его в звук. На выходе второго канала усилителя подключен громкоговоритель, от которого отражается часть лазерного луча.

При перемещении зеркала сигнал на транзисторе меняется, что приводит к изменению звука во втором громкоговорителе. Даже при небольших возмущениях воздуха в комнате возникают колебания зеркала, которые заметно меняют силу звука. Чтобы этими изменениями можно было управлять, на вход второго канала усилителя подается синусоидальный сигнал. Этот же сигнал подводится к отражающему громкоговорителю, что обеспечивает большую стабильность колебаний зеркала. Звуковой сигнал на выходе устройства меняется в этом случае более плавно.

Интерференцию света на транзисторе можно объяснить двояко. Одна из точек зрения заключается в том, что



Установка Ричарда Э Крендалла для преобразования доплеровского смещения в звук.

основную роль здесь играет разница в расстояниях, которые свет проходит от пластинки и от зеркала. Испускаемые лазером световые волны приблизительно совпадают по фазе. Часть волн отражается от пластинки и попадает на транзистор. Другая часть проходит иной путь, попадая на зеркало и затем на транзистор.

Разница в расстояниях, которые проходят эти два световых луча, и вызывает интерференцию на транзисторе. Если эти расстояния таковы, что лучи попадают на транзистор не смещенными по фазе, то имеет место усиливающая (конструктивная) интерференция: освещенность транзистора максимальна, и транзистор посылает в усилитель большой по мощности сигнал. Если лучи проходят такие расстояния, что они попадают на транзистор в противофазе, то наблюдается ослабляющая (деструктивная) интерференция: освещенность мала, и в усилитель подается слабый сигнал.

Предположим сначала, что световые лучи попадают на транзистор в фазе, а зеркало смещается в направлении от лазера на расстояние, равное четверти длины волны лазерного луча. В этом случае луч света, отраженный от громкоговорителя, пройдет дополнительное расстояние, равное половине длины волны (четверть длины волны до громкоговорителя и четверть — до транзистора). В результате световые лучи попадают на транзистор с противоположными фазами. Таким образом, если диффузор отражающего громкоговорителя перемещается параллельно световому лучу, это приводит к изменению величины сигнала на выходе транзистора.

Можно также «услышать» и случайные отклонения зеркала, вызванные небольшими колебаниями воздуха в комнате. Когда с помощью синусоидального сигнала колебания зеркала становятся более упорядоченными, изменение интерференционной картины принимает периодический характер. Так как зеркало отклоняется значительно больше, чем на четверть длины волны, то при каждом колебании на транзисторе наблюдается интерференционная картина со многими максимумами и минимумами.

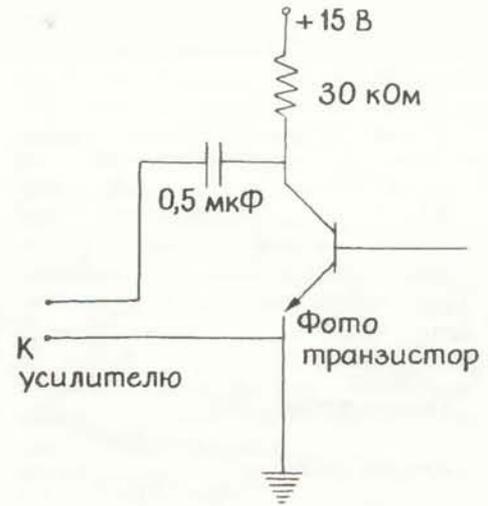
Другое, но сходное объяснение интерференции, наблюдаемой в эксперименте, основано на доплеровском смещении света. Длина волны связана с частотой; частота численно равна количеству волн, проходящих за 1 с. Частота света, воспринимаемого наблюдателем, может зависеть в определенной степени от его движения относительно источника света. Допустим, что наблюдатель неподвижен по отношению к источнику. В этом случае он воспринимает свет определенной частоты. Если источник перемещается по направле-

нию к наблюдателю, частота воспринимаемого наблюдателем света сдвигается в сторону более высоких частот. Это смещение обычно называют «фиолетовым смещением», потому что сдвиг происходит в направлении более высоких частот, а следовательно, в сторону фиолетовой части светового спектра. Если источник удаляется от наблюдателя, частота воспринимаемого им света сдвигается в сторону более низких частот. Это смещение часто называют «красным смещением». И фиолетовое и красное смещения являются доплеровскими смещениями.

Разумеется, что доплеровское смещение частоты происходит и в том случае, когда сам наблюдатель движется к источнику света или от него. Величина смещения зависит от относительной скорости источника света и наблюдателя. Чем ближе эта скорость к скорости света, тем больше доплеровское смещение. Этот факт имеет решающее значение в астрономии. По величине доплеровского смещения можно рассчитать скорость и направление движения удаленных космических объектов относительно Земли.

В опыте Крендалла и Вишнау зеркало перемещается относительно транзистора со скоростью, которая мала по сравнению со скоростью света. В результате и смещение частоты оказывается незначительным. Практически свет смещается по частоте дважды: один раз потому, что зеркало перемещается относительно лазера, и еще раз потому, что зеркало движется относительно транзистора. В первом случае источником света является лазер, а наблюдателем — зеркало. Во втором случае зеркало выступает в качестве источника (так как оно отражает свет), а транзистор — в качестве наблюдателя.

Обычно для расчета доплеровского смещения света пользуются специальной теорией относительности. Однако скорость колебательных движений громкоговорителя настолько мала по



Экспериментальная измерительная схема.

сравнению со скоростью света, что приближенные расчеты могут быть выполнены на основе классической физики. Смещение частоты равно удвоенной несмещенной частоте, умноженной на отношение скорости перемещения зеркала к скорости света.

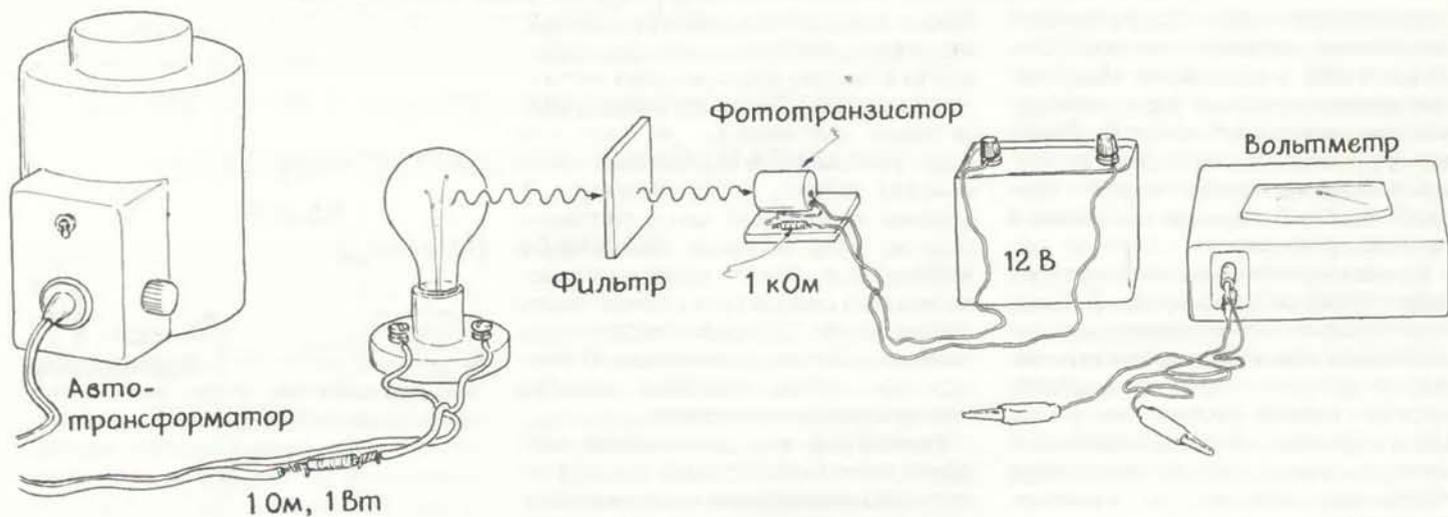
Свет, попадающий на транзистор от стеклянной пластинки, не смещен по частоте. Частота света, отраженного колеблющимся зеркалом, сдвинута вверх или вниз по шкале частот в зависимости от того, в какую сторону перемещается зеркало, когда свет попадает на него. Эти два сигнала интерферируют на транзисторе, и в результате возникают так называемые биения, которые характеризуются определенной частотой. Результирующая освещенность транзистора меняется от максимальной до минимальной при усиливающей и ослабляющей интерференции с частотой биений, которая равна разности между несмещенной и смещенной частотами. Экспериментатор слышит эти биения как изменение звука в громкоговорителе. Другими словами, он

Закон Стефана ————— $P = \epsilon A \sigma T^4$

Постоянная Стефана ————— $\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15h^3c^2}$

Уравнение Планка ————— $I = \frac{Nf^3}{\exp(hf/kT) - 1}$

Уравнение аппроксимации
постоянной Планка ————— $h \approx \frac{15c^2}{2\pi^5 A f^4} \cdot \frac{P_1 P_2}{(P_1^4 - P_2^4)^4} \cdot \text{Log}^4 \left(\frac{I_1}{I_2} \right)$



Так Крендалл измеряет постоянную Планка.

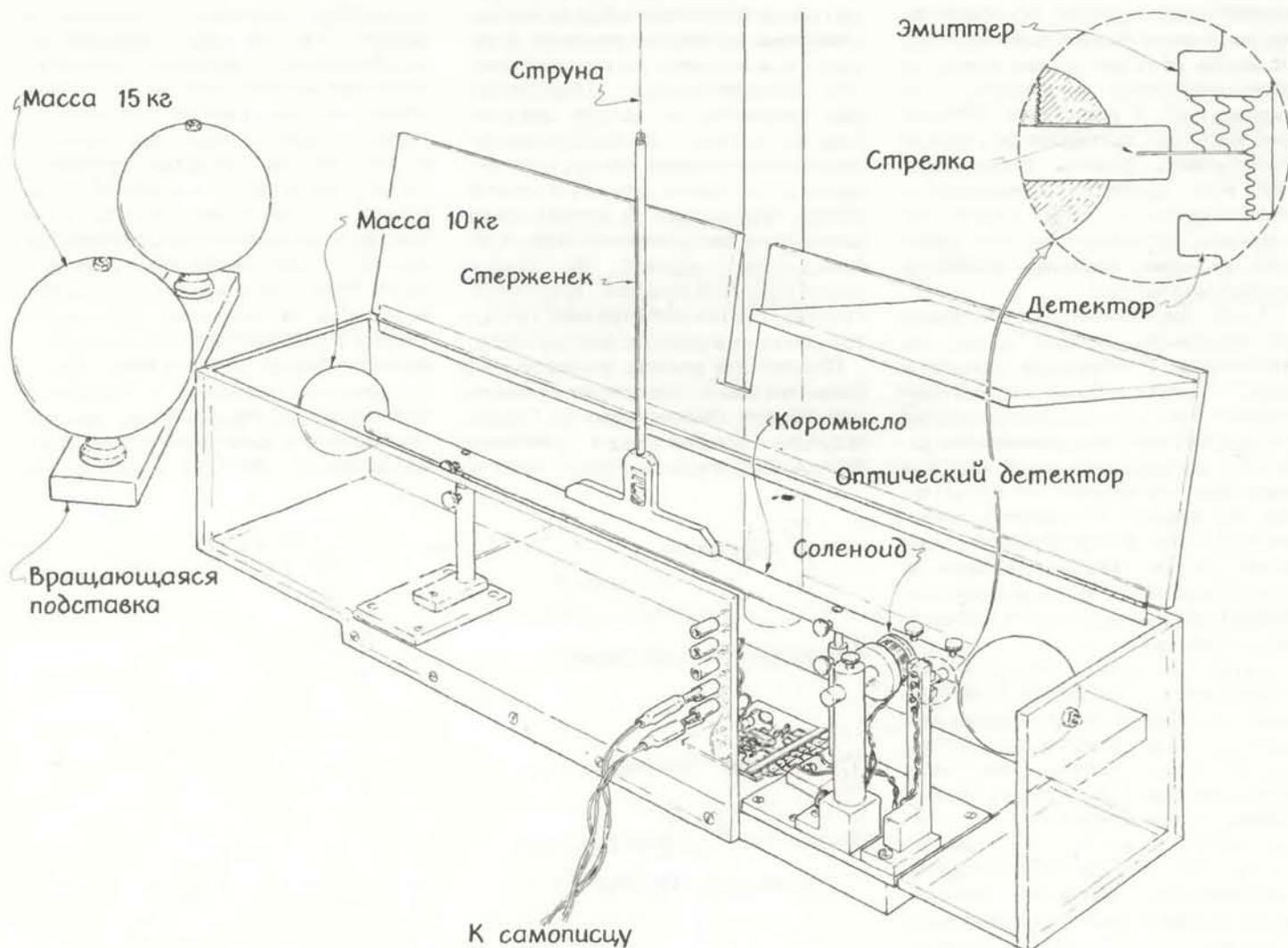
«слышит» интерферограмму, которая связана с доплеровским смещением света.

В КОНЦЕ XIX в. вопрос о тепловом излучении представлял собой серьезную проблему в физике. Каждое тело

испускает электромагнитное излучение, интенсивность которого зависит от температуры поверхности тела. Тепловое излучение имеет сплошной спектр; часть этого излучения приходится на видимую область, и поэтому его можно наблюдать. Так, кочерга,

нагретая в камине, испускает инфракрасное излучение, которое можно ощутить еще задолго до того, как поверхность нагреется до свечения в видимом диапазоне.

Вооруженные законами классической термодинамики и новыми блестя-



Установка Крендалла для измерения гравитационной постоянной.

щими идеями теории электромагнитного излучения Дж. К. Максвелла, физики пытались вывести выражение для интенсивности теплового излучения на определенной частоте. Неоднократные попытки увенчались лишь приближенными результатами. Математическое выражение, полученное Рэлеем, давало достаточно хорошее совпадение с результатами экспериментов только для низких частот, для излучения на высоких частотах оно оказалось непригодным. Действительно, из его выражения следовало, что энергия, излучаемая с высокой частотой, могла быть бесконечно большой, что безусловно неверно. Этот математический тупик был назван «ультрафиолетовой катастрофой». Уравнение, ранее предложенное В. Вином, давало хорошие результаты при подсчете интенсивности излучения на высоких частотах, но приводило к совершенно неверным данным для низких температур.

Проблема была решена в 1900 г., когда М. Планк получил выражение, которое давало хорошее совпадение с экспериментальными данными при любых частотах. Вывод этой формулы можно считать счастливой случайностью, так как спустя лишь несколько недель Планку стало до конца ясно, почему его формула позволяла получать верные результаты. В своей теоретической модели излучающей поверхности он предположил, что излучение испускается большим числом элементарных осцилляторов. Интенсивность излучения на данной частоте представляла собой не что иное, как суммарную излучаемую энергию, вычисляемую из распределения осцилляторов. Удивительным в этой модели было то, что эти элементарные осцилляторы просто не могли обладать какой-либо энергией. В то же время энергия каждого осциллятора находилась в определенном диапазоне значений, которые были кратными фундаментальной величине, получаемой умножением константы (называемой постоянной Планка h) на частоту f осциллятора.

Планк не знал об атомной природе излучающей поверхности, и его воображаемые осцилляторы в действительности не существовали. Однако сделанное им фундаментальное открытие позволило ему вывести закон для теплового излучения как функции частоты. Еще более важным было то, что работа Планка возвестила о начале эры квантовой механики. На микроскопическом уровне элементарные значения энергии находились в некотором заданном диапазоне и были кратными hf .

Хотя постоянная Планка является одной из наиболее важных в современной квантовой механике атомов и элементарных частиц, она может быть найдена с помощью удивительно простого эксперимента, предложенного

Крендаллом и его коллегой Ж. Делордом. Прибор состоит из светофильтра, фотоэлемента и нематированной лампочки накаливания мощностью 60 Вт с вольфрамовой нитью. Свет от раскаленной нити лампочки пропускается через фильтр, и поэтому фотоэлемент облучается в узком диапазоне частот. Интенсивность света в этом диапазоне измеряется для двух уровней мощности накала лампочки, и результаты подставляются в уравнение, решая которое находят величину постоянной Планка.

При прохождении электрического тока нить накаливания лампочки нагревается и излучает свет в широком диапазоне частот в видимой и инфракрасной областях. Общая энергия, излучаемая поверхностью, была вычислена Й. Стефаном в 1879 г.; она оказалась равной произведению четырех величин: площади поверхности, константы, известной как постоянная Стефана, абсолютной температуры поверхности, возведенной в четвертую степень, и величины, известной как излучательная способность материала.

При данных значениях площади поверхности и температуры материал может теоретически излучать определенное максимальное количество энергии. Излучательная способность такого материала принимается за 1, и его называют абсолютно черным телом. В действительности такого идеального материала не существует; все реальные поверхности излучают меньшую энергию, их излучательная способность оценивается коэффициентом излучения, который всегда меньше 1. Нить лампочки, которая используется в эксперименте, нагревается до такого состояния, что ее можно считать почти черным телом. Поэтому Крендалл и Делорд с некоторым допущением приняли излучательную способность нити равной 1.

Постоянная Планка входит в выражение для постоянной Стефана в его современном виде, и поэтому она связана с полной энергией, излучаемой нитью. Она же входит и в уравнение, полученное Планком для расчета интенсивности света, излучаемого при любой данной частоте. Для определения постоянной Планка Крендалл и Делорд проводят две серии измерений. В каждой серии они находят общую энергию излучения нити накаливания, измеряя электрическую мощность, подводимую к лампочке, а также определяют интенсивность света, прошедшего через светофильтр. Затем подводимая к лампочке мощность изменяется, и измерения повторяются. Полученные данные подставляются в уравнение, которое представляет собой комбинацию закона Стефана (для общей энергии излучения) и формулы Планка (для интенсивности света определен-

ной частоты).

Эта объединенная формула приведена на с. 94. Формула для упрощения математических выкладок дана в приближенном виде, но точность окончательного значения постоянной Планка от этого практически не меняется. Символами I и P обозначаются интенсивность и энергия, значения которых Крендалл и Делорд находят экспериментально. В уравнение входит также скорость света c , которая равна $3 \cdot 10^8$ м/с, и f — частота света, проходящего через фильтр. Поскольку фильтр пропускает лишь узкий диапазон частот, выбирается частота, соответствующая середине диапазона. Чем уже этот диапазон, тем меньше ошибка, допускаемая при таком приближении.

Символ A в формуле обозначает площадь поверхности нити накаливания. Для ее измерения Крендалл и Делорд проецируют тень нити на стену. Масштаб полученного изображения уменьшается пропорционально увеличению при проецировании. Степень увеличения легко определить, поместив прозрачную линейку около лампочки и измерив ее изображение на стене. Значение A в опыте Крендалла и Делорда было равно $5,2 \cdot 10^{-5}$ м².

Мощность, подводимая к лампе, регулируется автотрансформатором. Для расчета мощности Крендалл и Делорд измеряют напряжение на сопротивлении 0,1 Ом, которое включено последовательно с лампочкой. Чтобы определить значение тока, протекающего через сопротивление и через нить накаливания, величину напряжения делят на сопротивление. Затем Крендалл и Делорд измеряют напряжение на лампочке и, умножая его на ток, получают значение мощности на лампочке. Если нет автотрансформатора, ток можно регулировать сменой сопротивления, оставляя постоянным напряжение батареи 12 В. Частота пропускания фильтра при расчете постоянной Планка принималась равной $5,3 \times 10^{14}$ Гц. Можно использовать фильтры и другой частоты. Желательно, чтобы полоса пропускания фильтра была как можно уже.

Измерительная схема состоит из фототранзистора (типа Моторола MRD3052), сопротивления 1 кОм и батареи напряжением 12 В. Спектральная чувствительность фототранзистора не имеет существенного значения, поскольку частота света, падающего на транзистор, не меняется. Ток в цепи определяется измерением падения напряжения на сопротивлении. Поскольку в уравнении используется отношение двух интенсивностей, то их можно заменить значениями тока.

В опыте Крендалла мощность на лампочке была равна 19,3 Вт, а ток в измерительной цепи составлял 0,81

мА. При увеличении мощности до 36,5 Вт ток изменился до 7,57 мА. По этим данным Крендалл и Делорд и рассчитали постоянную Планка; полученная ими величина $4,9 \cdot 10^{-34}$ Дж·с достаточно хорошо совпадает с принятой в настоящее время $6,6 \cdot 10^{-34}$ Дж·с. Некоторое расхождение обусловлено конечной шириной полосы пропускания фильтра, а также тем, что излучательная способность нити накаливания отличается от 1.

ИЗ НЕСКОЛЬКИХ фундаментальных сил, существующих в природе, наиболее заметную роль в повседневной жизни играет гравитационная сила. Притяжение, которое испытывают тела, находящиеся вблизи поверхности Земли, заметно лишь благодаря большой массе нашей планеты. Гравитационное притяжение между двумя обычными предметами в окружающей нас среде настолько мало, что оно практически незаметно. Эта сила незаметна еще и потому, что действует она на фоне других сил много большей величины, в частности силы трения.

Как в таком случае в лабораторных условиях продемонстрировать и измерить силу взаимного тяготения, действующую между двумя массами? Впервые ответить на этот вопрос попытался Г. Кавендиш в 1798 г. Его прибор состоял из деревянного коромысла длиной ~1,8 м, подвешенного горизонтально на тонкой нити. На концах коромысла он укрепил свинцовые шарики диаметром около 5 см. Подвеска была исключительно чувствительна к любой силе, стремящейся повернуть коромысло вокруг нити подвеса. Для создания такой силы вблизи одного из подвешенных шариков был установлен третий свинцовый шар. Возникающая между этим шаром и шариком на подвеске сила тяготения стремится повернуть коромысло вокруг нити подвеса. Чтобы увеличить эту силу, у шарика на противоположном конце коромысла

был установлен четвертый свинцовый шар.

Кавендиш тщательно экранировал установку от воздушных потоков. Чтобы масса его собственного тела не оказывала влияния на результаты эксперимента, положением дополнительных шаров можно было управлять на расстоянии. Угол поворота коромысла измерялся с помощью светового луча, который отражался от маленького зеркала, закрепленного на нити подвеса.

После установки третьего и четвертого шаров в исходное положение коромысло слегка поворачивалось до тех пор, пока силы тяготения и закручивающая сила нити не уравновесивали друг друга. При этом положении равновесия измерялся угол поворота. Затем третий и четвертый шары ставились с другой стороны от коромысла, так что действующие силы были направлены в противоположную сторону. Вновь измерялся угол поворота в положении равновесия. Угол между двумя положениями равновесия после деления на два давал точное значение величины поворота.

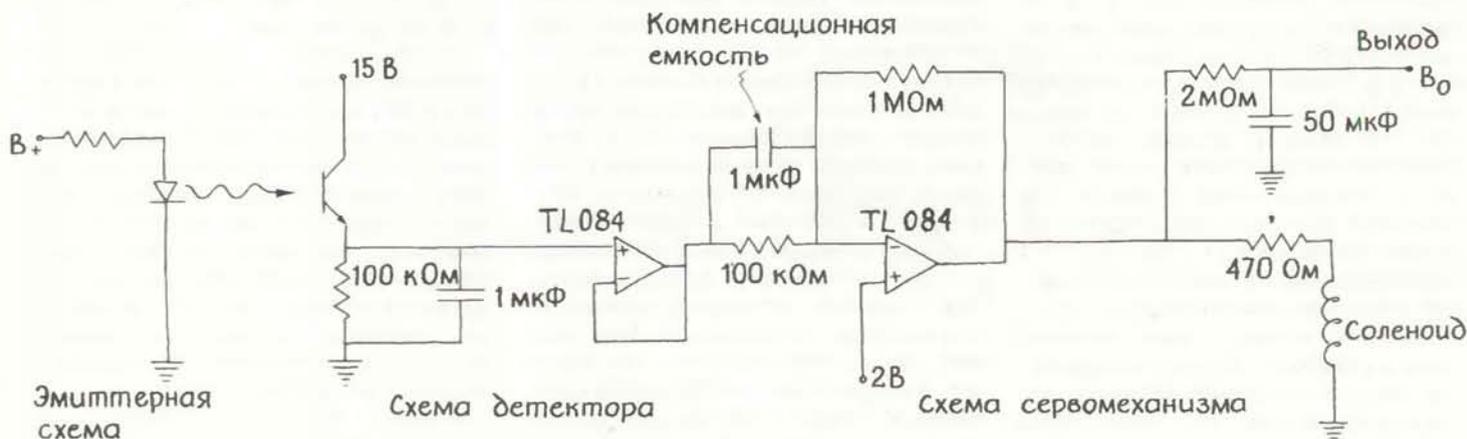
Получив эти данные, Кавендиш смог рассчитать величину гравитационной силы для каждой пары шаров на каждом конце коромысла. Из работ И. Ньютона уже было известно математическое выражение для гравитационной силы, действующей между двумя массами. Ее величина прямо пропорциональна каждой из двух масс, которые притягиваются друг к другу, и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними. Она зависит также от коэффициента, называемого гравитационной постоянной. Ньютону не удалось ответить на вопрос, как рассчитать эту постоянную, так как в его единственном опыте, демонстрирующем тяготение, участвовало по крайней мере одно очень большое тело (Земля), масса которого точно не была известна. Опыт Кавендиша позволял

это осуществить, так как массы взаимодействующих в этом опыте тел были малы и могли быть легко измерены. Рассчитанная Кавендишем величина гравитационной постоянной оказалась равной $6,754 \cdot 10^{-11}$ Н·м²/кг², и она близка к принятой в настоящее время $(6,668 \pm 0,005) \cdot 10^{-11}$ Н·м²/кг².

Эксперимент Кавендиша — это не простой физический опыт; осуществить его довольно сложно. Много времени требуется, в частности, чтобы установить в положение равновесия коромысло. При любом возмущении в окружающем пространстве (например, при перемещении экспериментатора в лаборатории) время установления равновесия еще более возрастает. В результате на проведение такого опыта требуются многие часы. Используя оригинальный прибор, созданный Г. Айблом из колледжа Рида, и применив электронные устройства, Крендалл остроумно модифицировал эксперимент Кавендиша. В результате время, необходимое для проведения опыта, составило всего лишь несколько минут; полученная при этом величина гравитационной постоянной оказалась равной $(7,5 \pm 1,5) \cdot 10^{-11}$ Н·м²/кг².

Если классический эксперимент Кавендиша основан на повороте коромысла, то в установке, предложенной Крендаллом, главное — как предотвратить этот поворот. При этом величина тяготения определяется путем измерения силы, действующей со стороны магнитного поля, которое препятствует повороту подвески, когда вблизи нее помещают дополнительную массу. Положение подвески контролируется оптическим датчиком.

Когда вблизи одной из масс, закрепленных на коромысле, устанавливают дополнительную массу и коромысло начинает вращаться, запускается сервомеханизм, который включает магнитное поле, действующее с силой, достаточной чтобы остановить вращение коромысла. Прокалибровав сервоме-



Электрическая схема, применяемая в эксперименте по исследованию силы гравитации.

ханизм, Крендалл получил некоторую единицу измерения для силы притяжения, действующей на массу, установленную на стержне. Весь эксперимент может быть выполнен за 20 минут.

Коромысло подвешивается на верхней струне, которая тянется от верхнего держателя вниз к жесткому стерженьку, прикрепленному к середине коромысла. В стерженьке нет особой необходимости, но он помогает погасить колебания струны. Массы по 10 кг каждая, как и в классическом случае, закрепляются на обоих концах коромысла. Вблизи одного из концов в специальном отверстии крепится на клею магнит. Когда коромысло начинает поворачиваться, магнитное поле соленоида воздействует на этот магнит и вращение прекращается.

Оптический датчик состоит из инфракрасного излучателя и инфракрасного детектора, которые располагаются вблизи конца коромысла с магнитом. Электрическая схема устройства показана на рисунке. Излучатель представляет собой простой диод, который испускает небольшое количество тепла, когда через него протекает ток от источника постоянного напряжения. В качестве детектора используется транзистор, электрические характеристики которого меняются под воздействием теплового излучения (можно использовать оптический прерыватель, в котором объединены излучатель и детектор).

Между излучателем и детектором на коромысле крепится небольшой экран, который в начальном положении закрывает половину детектора от излучения. Когда коромысло начинает поворачиваться в одном направлении, детектор приоткрывается, и сервомеханизм, срабатывая, возвращает коромысло в исходное положение. При повороте в другую сторону степень экранирования детектора растет и опять приводится в действие сервомеханизм.

Выходной сигнал с детектора подается на схему, состоящую из двух операционных усилителей и других устройств. В схеме выходной сигнал с детектора непрерывно сравнивается с опорным напряжением, равным 2 В. Если коромысло находится в своем обычном положении и экран заслоняет половину детектора от попадания излучения с инфракрасного излучателя, выходной сигнал согласуется с опорным напряжением. Если же коромысло поворачивается, приоткрывая инфракрасный детектор, согласование нарушается и система вырабатывает электрический ток, который проходит через соленоид, создавая магнитное поле, воздействующее на магнит, закрепленный на коромысле.

Калибровку прибора следует начинать с расчета постоянной кручения для струны, на которой подвешено ко-

ромысло. При повороте коромысла на некоторый угол закрученная струна создает противоположный момент вращения, равный ее постоянной кручения, умноженной на угол поворота. Для расчета постоянной кручения Крендалл определяет два числа. При отключенном сервомеханизме он заставляет коромысло совершать крутильные колебания вокруг положения равновесия и измеряет период этих колебаний. Полученное время называют периодом свободных колебаний коромысла. Затем вычисляется момент инерции коромысла (по отношению к точке подвеса). Постоянная кручения струны определяется по формуле $k = I(2\pi/P)^2$, где k — постоянная кручения, I — момент инерции и P — период свободных колебаний.

Далее необходимо связать напряжение выходного сигнала от сервомеханизма с моментом кручения коромысла. Когда сервомеханизм включен, держатель струны подвески поворачивается на определенный угол, закручивая струну. Магнитное поле соленоида удерживает коромысло неподвижным. В результате происходит смещение выходного напряжения цепи. Это смещение напряжения делится на угол поворота и постоянную кручения, и мы получаем то, что Крендалл называет коэффициентом кручения прибора. Этот коэффициент, измеряемый в вольтах на единицу силы, дает возможность превратить любое выходное напряжение, измеренное в процессе опыта, в величину момента кручения коромысла, обусловленного гравитационным притяжением на одном из его концов. Так, например, когда тело массой 15 кг почти касается одной из масс, закрепленных на коромысле, выходное напряжение изменяется примерно на 25 мВ. Сила, действующая на массу, которая находится на коромысле, определяется умножением сдвига выходного напряжения на половину длины коромысла и делением на коэффициент кручения.

Гравитационная постоянная рассчитывается путем подстановки величины этой силы в уравнение тяготения Ньютона, а также расстояния между центром тела массой 15 кг и центром массы на коромысле.

Крендалл для простоты иногда использует вращающуюся подставку, на концах которой закреплены тела массой 15 кг. Поворачивая подставку в одном направлении, мы перемещаем одну из масс к массе, закрепленной на коромысле. На коромысло действует сила в направлении к этой дополнительной массе, но оно почти не двигается из-за срабатывания сервомеханизма. При повороте подставки в другом направлении второе тело массой 15 кг подводится с противоположной стороны к массе, закрепленной на коромысле.

Время установления для прибора определяется компенсационным конденсатором емкостью 1 мкФ. Когда Крендалл подводит тело массой 15 кг к одному из концов коромысла, смещение выходного напряжения проявляется лишь спустя несколько минут. Такая скорость делает вариант Крендалла идеальным для демонстрации опыта Кавендиша в условиях школьного физического кабинета. Для точного измерения гравитационной постоянной требуется затратить не более 20 минут.

За свою работу по определению гравитационной постоянной Крендаллу было присуждено в 1981 г. первое место на конкурсе приборов, который проводился американской Ассоциацией преподавателей физики. Описание этого эксперимента, а также эксперимента по измерению постоянной Планка появится в ближайшее время в журнале "American Journal of Physics". Сообщение об опытах, в которых исследовалось доплеровское смещение света, было уже опубликовано в этом же журнале. Ряд идей, которые легли в основу рассмотренных экспериментов, были предложены коллегой Крендалла Б. Итоном.

Издательство
МИР
предлагает:

К. Ицксон,
Ж. Б. Зюбер
**КВАНТОВАЯ
ТЕОРИЯ ПОЛЯ**

В двух томах
Перевод с английского

В монографии, написанной французскими физиками-теоретиками, рассмотрены квантование, взаимодействие с внешними полями, уравнение Дирака, изложены вопросы функциональных методов, симметрии, калибровочных полей и пр. В книге отражены последние достижения квантовой теории поля.

Для физиков-теоретиков, аспирантов и студентов.

1983, 49 л. Цена 5 р. 50 к.
за комплект.



Матия математики

«Кто меньше», «бравата», «посредственность»; эволюция и стратегия игрового поведения

ДУГЛАС Р. ХОФШТАДТЕР

ЛЕТОМ 1962 г. мы с Робертом Бонингером, в то время два молодых математика из Станфорда, ехали в автобусе, возвращаясь из Праги. Было безумно скучно, и, чтобы скоротать время, мы придумали любопытную игру в числа. Несмотря на простоту правил, игра была довольно хитрая. В ней требовалось сбить противника с толку психологически. Сначала мы придерживались следующих правил. Игра продолжается 10 туров. В каждом туре мы задумываем по одному числу, а потом сравниваем задуманные числа. При этом один из нас может выбрать одно число (обязательно целое) от 1 до 5, а другой — от 2 до 6. Если задуманные числа совпадают или различаются больше чем на единицу, каждый получает равное им количество очков, суммируя их в процессе игры. Если же они различаются на единицу, то игрок, выбравший *меньшее* число, получает очки, равные сумме обоих чисел. Если, например, я назвал 2, а Роберт 3, то я получу 5 очков, а бедняга Роберт — ни одного. Я был вполне доволен, пока в ответ на мои 5 Роберт не назвал 4.

Нам казалось интересным, что ряды чисел, из которых каждый делал выбор, были не совсем одинаковы, так как при этом трудно решить, чье положение на самом деле выгоднее. С первого взгляда может показаться, что игрок «высшего» ряда, то есть от 2 до 6, имеет преимущество, но, с другой стороны, когда вы называете 6, то рискуете крепко проиграть, если ваш партнер назовет 5, а ваше 6 не может оказаться меньше на единицу какого-либо его числа. Кроме того, игрок «низшего» ряда всегда может, ничем не рискуя, выбрать 1. Но, хотя такая асимметрия выглядела довольно забавно, мы скоро решили, что лучше, если оба ряда будут одинаковы — от 1 до 5. Так мы и играли в эту игру, которую я буду называть «кто меньше».

Борьба была весьма ожесточенной. Самым занимательным в игре было постепенно накапливать в уме различные «психохитрости». Например, я дразнил Роберта, выбирая 4 несколько раз подряд и пытаюсь побудить его сказать 3, чтобы в тот же момент сменить

тактику, сказав 2, и тем самым перехитрить его.

Когда я вернулся в Станфорд, мне не терпелось сыграть в эту игру с компьютером. Незадолго до этого мой друг Чарлз Бреннер составил программу, которая подсчитывала частотность букв и трехэлементных буквосочетаний в отрезке текста на английском (или на любом другом) языке. Затем с помощью генератора случайных чисел программа составляла псевдоанглийский текст, в котором частотности употребления трехэлементных сочетаний были такие же, как и в исходном тексте. На меня произвел большое впечатление заложенный в этой программе алгоритм, который позволял так просто выявить характерные для английского языка структуры, и я решил использовать тот же принцип для составления программы игры в числа. Особенно меня прельщала мысль заложить в программу умение обнаруживать определенную систему в последовательности действий партнера по игре и на этой основе планировать их — иначе говоря, научить сам компьютер пытаться «психологически» перехитрить партнера. Игра была бы еще интересней, если бы программа партнера умела делать то же самое по отношению к моей программе.

Помню, я стоял перед печатающим устройством компьютера и следил, как на его выходе строчка за строчкой отражался ход игры. Мы тщательно отработывали наши программы, заставляя их играть по несколько сот туров. Моя программа часто начинала генерировать неправильные ходы, когда ей не удавалось «уловить» наличие какой-либо закономерности в поведении программы партнера. Однако рано или поздно наступал момент, когда моя программа, видимо, напала на след и решительно выигрывала один или два раза подряд, называя меньшее число. После этого можно было наблюдать, как она успешно продвигалась вперед, часто быстро получая значительный перевес, и разбивала противника в пух и прах. Это зрелище переполняло меня чувством превосходства: проницательность побеждала простую грубую си-

лу. Я вспоминаю название одной из моих любимых книг: «Шахматы — развлечение и жестокая борьба» Э. Ласкера (Edward Lasker "Chess for Fun and Chess for Blood"). Это заглавие точно отражает сложную смесь доброжелательности и соперничества, которые испытываешь по отношению к партнеру в любой игре-состязании.

Тогда я понял, что это чувство — одно из самых универсальных и примитивных. Наверное, самое захватывающее в любом виде спорта — это ощущение борьбы двух разных стратегий. Даже собаки способны, по-видимому, получать удовольствие от такого спортивного соперничества. Когда я, играя, гоняюсь за своим эрделем Шэнди, я замечаю, что он прекрасно чувствует, насколько точно я могу предугадать его движения, и всегда ухитряется слегка опередить меня. Как только мне кажется, что я уловил схему его движения, он немедленно это чувствует и тотчас меняет ее — моя попытка настичь его оказывается неудачной.

Иногда, разумеется, он позволяет мне выигрывать, чтобы я не бросил играть. У него даже есть склонность подразнить меня. Уронив свою любимую палку или мячик прямо передо мной и сделав вид, что ни то ни другое его совсем не интересует, он пытается побудить меня схватить их. Но у него уже все рассчитано. Он точно знает, насколько быстр каждый из нас и какими способами я попытаюсь его одурачить.

Более того, Шэнди часто меняет свою тактику каким-нибудь новым способом, так что я не могу его перехитрить, просто уловив общую схему изменений в его тактике. Нет, его не проведешь, его собачий ум прекрасно умеет хитрить! В этом игровом поведении проявляются природные умственные способности, которые выработались в процессе эволюции у собак и людей в результате борьбы за существование.

Вернемся к игре «кто меньше». Однажды аспирант-математик Джон Питерсон, который любил навещать меня в вычислительный центр, предложил мне устроить состязание с его программой, составленной, по его словам, на основе теории игр. Сначала я не особенно волновался за исход поединка, но, когда началось состязание программ, у меня появились основания для беспокойства. Не то чтобы моя программа потерпела поражение, она просто никак не могла уловить какую-либо систему в действиях партнера, и каждый раз счет очков оказывался более или менее одинаков у обеих программ. Я никак не мог понять, в чем тут дело. Тогда Джон объяснил, что, составляя программу, он подсчитал соответствующий «вес» для каждого числа от 1 до 5. Вес числа не зависел от стратегии

противника, а всецело определялся выигрышем или проигрышем при каждой возможной комбинации чисел. Вот как выглядела его «матрица результатов»:

ДЖОН

	1	2	3	4	5
1	0	-3	2	3	4
2	3	0	-5	2	3
3	-2	5	0	-7	2
4	-3	-2	7	0	-9
5	-4	-3	-2	9	0

Матрица показывает, сколько Джон может выиграть при каждой комбинации чисел. Матрица асимметрична: каждому положительному числу — количеству выигранных Джоном очков — относительно нулевой диагонали соответствует такое же отрицательное число — количество проигранных им очков. Нули диагонали означают, что, когда мы называем одинаковые числа, это не дает преимущества ни одному из нас (если не считать, что игра на один тур приблизилась к концу).

Поскольку игра абсолютно симметрична по отношению к обоим игрокам, в ней не может быть стратегии, обязательно приводящей к выигрышу. В противном случае оба игрока применяли бы ее, рассчитывая на выигрыш. Тем не менее, согласно теории игр, существует оптимальная стратегия, которая в статистическом смысле гарантирует партнеру длительное равенство в игре. Эта стратегия основывается на приписывании каждому из пяти чисел определенного статистического веса. Веса определяются решением системы из пяти однородных линейных уравнений: в каждом из них математическое ожидание ходов противника приравнивается нулю. Если веса выбираемых Джоном чисел 1, 2, 3, 4, 5 обозначить соответственно a, b, c, d и e , то математическое ожидание моего числа, если я выберу, скажем, 3, будет $-2a + 5b - 7d + 2e$ (третий горизонтальный ряд матрицы). Приравняв его к нулю, получим одно из пяти уравнений. Остальные четыре уравнения получаем таким же путем. Система уравнений, которую надо решить, имеет следующий вид:

- $-3b + 2c + 3d + 4e = 0$,
- $3a - 5c + 2d + 3e = 0$,
- $-2a + 5b - 7d + 2e = 0$,
- $-3a - 2b + 7c - 9e = 0$,
- $-4a - 3b - 2c + 9d = 0$.

Решение фактически сводится к инверсии матрицы 4×4 . Прделав это, Джон получил веса 10, 26, 13, 16, 1, соответствующие числам 1, 2, 3, 4, 5. В соответствии с теорией игр отсюда следует вывод, что игрок должен край-

не редко выбирать число 5: один раз из 66. Чаще всего следует выбирать 2. При этом, однако, нельзя считать, что если вы сначала 10 раз подряд выберете 1, потом 26 раз — 2, а затем 13 раз — 3 и так далее, то это обеспечит вам успех. С учетом указанных весов выбор чисел должен быть абсолютно случайным.

Представьте себе игральную кость с 66 гранями, у которой 10 граней с цифрой 1, одна грань с цифрой 5 и т.д. При каждом вашем ходе вы бросаете именно такую кость (или программируете действие компьютера, моделирующее такое бросание). Иначе говоря, когда вы придерживаетесь указанной тактики, вы должны избегать всяких последовательностей в действиях и не поддаваться искушению упорядочить их, как бы вам этого ни хотелось. Даже если партнер 10 раз подряд назовет 5, вы не должны обращать на это никакого внимания, а продолжать как ни в чем не бывало бросать кость с 66 гранями. Именно так действовала программа Джона, и поэтому моя программа не могла уловить последовательность выбора чисел. Если бы его программа хоть раз поддавалась искушению и попробовала бы предугадать мои ходы, моя программа наверняка заметила бы в ее действиях какую-то систему и работала бы более эффективно. Но программа Джона и понятия не имела об искушениях или провокациях. Она просто слепо продолжала играть, и, чем дольше продолжалась игра, тем больше у нее было шансов добиться ничейного счета. Если ей удалось выиграть, что ж, тем лучше, но вероятность победы не превышала 50%. Вот вам и «оптимальная стратегия»!

Я был оскорблен и возмущен тем, что моя программа при всем своем «уме» не могла одолеть программу Джона, основанную на слепой случайности. Но что поделаешь? К моему великому разочарованию, оказалось, что в определенном смысле самой разумной стратегией была такая, которая не только отличалась непоследовательностью, но и не принимала в расчет действия противника. В этом усматривалось даже нечто, противоречащее первоначальной цели игры «кто меньше», которая заключалась в том, чтобы игроки стремились оказать активное психологическое воздействие друг на друга.

Когда я увидел, что моя игра сокрушена теорией игр, я перестал ею заниматься. Но в последнее время я вновь обратился к подобным играм, в которых можно с выгодой использовать систему ходов противника, хотя теоретически для них можно разработать оптимальную стратегию с помощью теории игр. В таких играх есть что-то любопытное и привлекательное в провоцировании противника, заигрывании с

ним и прочих уловках, которые очень сходны с поведением живых существ, а порой напоминают некоторые методы современной дипломатии.

Кроме того, стратегия, основанная исключительно на теории игр, кажется слишком академичной и книжной, когда применяется в отношении «живого» партнера, особенно если он применяет тактику «провокаций». Характер поведения в игре во многом определяется не только стремлением выиграть, но и более сложными целями. Например, нетерпение и склонность рисковать — важные психологические факторы игрового поведения людей, а оптимальная стратегия, как она понимается в теории игр, в обычных ситуациях не принимается ими во внимание. Поэтому я все же думаю, что игры подобного рода представляют интерес как модели поведения людей и целых организаций перед лицом сложных проблем.

ТЕПЕРЬ давайте рассмотрим некоторые варианты игры «кто меньше», которые я разработал в последнее время. В них более широкие возможности заманить противника в ловушку. Я стремился поощрить «провоцирование» противника, когда игрок демонстративно повторяет ходы несколько раз подряд, делая вызов сопернику: «Попробуй-ка назвать меньшее число и выиграть!». Для поощрения такой практики искушения противника серией одинаковых ходов в правила игры было введено присуждение дополнительных очков за повторение ходов, не использованное противником. Назовем этот вариант игры «бравадой».

Предположим, мы с вами играем в «браваду». Я сказал 4, а вы 1. Как и в игре «кто меньше», я получаю 4 очка, а вы 1. В следующем туре я опять называю 4, а вы 2. Если бы мы играли в «кто меньше», то я опять получил бы 4 очка. Но в «браваде» повторение вознаграждается, и я получаю очки, равные произведению двух названных мною чисел: 4×4 , т.е. 16. Предположим, в следующем туре я опять называю 4, а вы опять 2. За свою смелость я получаю $4 \times 4 \times 4$, т.е. 64 очка, а вы получаете 2×2 , т.е. 4. Итого за три тура я выиграл $4 + 16 + 64 = 84$ очка против ваших $1 + 2 + 4$, т.е. 7. Но, разумеется, вы не оставили без внимания мою браваду. Вы просто выжидаете благоприятного момента. И вот теперь вы называете 3, чтобы ваше число было на 1 меньше. Как бы не так! Я называю 2 и получаю 5 очков, а вы — ничего. Вот так-то!

Но предположим, я был настолько несообразителен, что позволил вам поймать меня. Если бы я опять назвал 4, надеясь выиграть 256 очков, то вы, уловив мою тактику и назвав 3, получили бы за это высокую награду в 259 очков (ваши 3 очка плюс мои 256).

Тему «браводы» можно варьировать. О ее простейшем варианте я уже рассказывал. При желании можно вознаграждать более сложные последовательности ходов. Наилучший способ делать это еще предстоит отыскать, я же могу предложить лишь один из возможных способов вознаграждения за бравоирование упорядоченными ходами в игре, которую я назвал «сверхбраводой». Предположим, в ответ на мою серию ходов 4 — 4 — 4 вы сыграли вместо 1 — 2 — 2 сначала 2, потом 1, потом опять 2. Возможно, у вас были свои основания сыграть именно так. Это могло быть продолжением *вашей* последовательности, которую вы выбрали, выжидая подходящий момент, чтобы подловить меня. Если ваши предыдущие ходы были 2 — 1 — 2 — 1, то эти три последние хода создавали одну длинную серию. В зависимости от принятой системы подсчета очков продолжение собственной длинной серии может быть выгоднее, чем использование для выигрыша сравнительно короткой новой серии противника. Если цена серии 2 — 1 — 2 — 1 — 2 — 1 — 2 равна произведению составляющих ее чисел, то она даст 16 очков. (Фактически 16 очков можно получить только при условии, что этому ряду предшествовала еще одна группа 2 — 1, но это не затрагивает существа вопроса.) Заметив мою серию 4 — 4, вы можете решить, что лучше дать мне назвать третий раз 4, а самому опять сказать 2, чтобы усыпить мою бдительность и затем нанести неожиданный удар, назвав число, на единицу меньше.

ЧТО СЧИТАТЬ серией последовательных ходов при игре в «сверхбраводу»? Пока ограничимся самым простым определением, хотя в принципе возможны и такие серии, которые требуют более сложного определения. Исходным является положение, что серией считается такая последовательность ходов, в которой сохраняется порядок чередования называемых чисел. Скажем, вы только что назвали число x и собираетесь теперь назвать y . Серия будет в том случае, если последний раз, когда вы называли x , за ним также следовало y . Например, если ваши последние семь ходов были 3 — 4 — 1 — 5 — 3 — 4 — 1, то для продолжения серии вы должны назвать 5 и после этого вновь играть 3, 4, 1, 5, 3, 4, 1 и т.д. Когда вы впервые создали последовательность 3 — 4 — 1 — 5, вы, разумеется, не получили никаких дополнительных очков, поскольку здесь нет чередования. Только когда названо во второй раз 4, возникает серия, дающая вам 12 (3×4) очков. Следующее число в серии — 1 — дает вам еще 12 очков, а затем, назвав 5, вы получаете еще 60 очков (если вас не подловят и не назовут числа на единицу меньше). Но как

только вы прерываете серию, вам приходится начинать новый подсчет дополнительных очков.

Если вы сыграли 3 — 4 — 1 — 5 — 3 — 4 и считаете, что назвать теперь 1 будет слишком очевидным для партнера, вы можете предпочесть сыграть 4, разрушая одну серию, но создавая новую (4 — 4). В обычной «браводой» это уже дало бы вам 16 очков, а в «сверхбраводой» дополнительные очки за серию вы получите, только когда еще раз сыграете 4, так как только тогда вы дважды подряд сделаете тот же самый ход.

Обе игры, «кто меньше» и «бравода», имеют один недостаток — выбор чисел в них ограничен. Мне хотелось придумать такую игру, где можно было бы называть любые числа. В результате появилась игра, которую я назвал «кто больше». Оба игрока задумывают по одному положительному целому числу. Если они не равны и различаются больше, чем на единицу, тогда назвавший *меньшее* число получает равное ему количество очков. (Другой игрок не получает, разумеется, ничего.) Если же числа различаются как раз на единицу, то назвавший *большее* число получает сумму обоих чисел. В этом отношении игра «кто больше» представляет собой как бы обратный вариант игры «кто меньше» (отсюда и ее название). Если оба числа совпадают, никто из нас в этом туре не получает очков.

Игра ведется до тех пор, пока один из игроков не наберет определенной суммы очков, которая может быть любой. Удобно играть до 1000, хотя ничуть не хуже играть до 100 или даже до миллиона. Разберемся, как указанные правила отражаются на ходе игры. Понятно, что вам не выгодно называть очень большие числа, потому что тогда партнеру легче назвать меньшее число и заработать очки, а вы не получите ничего. Отсюда следует, что оба игрока будут стараться выбирать сравнительно небольшие числа. Однако если все время называть очень маленькие числа, то вероятность того, что вас обыграют, назвав число на единицу больше, будет достаточно велика. Кроме того, в этом случае счет очков будет расти очень медленно, и один из игроков непременно захочет ускорить дело. А это значит рискнуть и назвать число побольше, скажем 81, и, разумеется, не один раз, иначе партнер не будет испытывать искушения назвать число на единицу больше.

Предположим, что я сказал 81 несколько раз подряд. (Серии, кстати, не вознаграждаются в игре «кто больше», по крайней мере в описываемом ее варианте.) Вы это заметили и захотели выиграть очки, сказав 82. А может быть, вы предпочтете набрать очки за счет моей несообразительности более

консервативным методом, выбрав число, близкое к 81, но меньшее, например, 70. Ага! Раз мне удалось заманить вас поближе к моим числам, можно уже попробовать неожиданно назвать число *меньше* вашего. А может быть, мне даже удастся угадать более выгодный момент и назвать число на единицу больше вашего.

ИНТЕРЕСНО отметить, что играя в «кто больше» и используя ряд серий в качестве приманки для партнера, можно, по существу, разыгрывать комбинации, напоминающие игру «кто меньше». Я, например, могу несколько раз подряд называть 81, пытаюсь побудить вас сказать 82, а вы в это время заманиваете меня, называя все время 30 и получая по 30 очков за каждый ход, пока я расточительно пытаюсь обмануть вас своим 81. Но вы помните, что рано или поздно я обязательно попытаюсь поймать вас на 30 и либо назову меньшее число, либо сыграю 31.

Просто замечательно, как много параллельных вариантов может неожиданно возникнуть в подобной игре. Особенно интересно бывает в конце игры, когда один из игроков имеет значительное преимущество. В этот момент отставший игрок скорее всего будет играть крайне осторожно, называя очень небольшие числа, что значительно увеличивает шансы его партнера угадать число и сделать ход на единицу больше. Кроме того, в игре появляется чисто психологический фактор, поскольку человеку свойственна нетерпеливость. Никто не захочет медленно плестись к победе, сотни раз выбирая малые числа. Поэтому простое стремление к разнообразию неизбежно приводит время от времени к попытке сыграть хитро и рискованно, что, конечно, может использоваться противник.

Для многих спонтанных творческих уловок, часто возникающих в ходе такой игры, можно найти параллели в истории эволюции живых организмов. В книге Р. Докинса «Гены — эгоисты» (Richard Dawkins "The Selfish Gene") очень красочно и наглядно описывается, какие необыкновенные серии и контрсерии используют гены в «соперничестве» друг с другом. Автор книги рассматривает концепцию «устойчивой стратегии эволюции» (УСЭ), предложенную Дж. М. Смитом. Это понятие определяется как «стратегия, которую уже нельзя заменить иной, даже лучшей, если она была принята большинством членов популяции». В данном контексте «принятие индивидом определенной стратегии» означает, что индивид имеет гены, обеспечивающие именно такой тип поведения.

Первый пример, который Докинс приводит в качестве иллюстрации, связан с наличием двух соперничающих генов, которые определяют два типа

агрессивного поведения у особей данного вида. Представители этих двух стратегий поведения называются «ястребами» и «голубями», и они соответствуют тому смыслу, который недавно приобрели эти слова в сфере политики. Если за победу в драке дается x очков со знаком «плюс», за пустое времяпровождение — y очков со знаком «минус» и за поражение — z очков со знаком «минус», можно подсчитать общее соотношение «ястребов» и «голубей» в популяции как функцию от величин x , y и z . Полученный результат может отражать среднее соотношение за определенный период времени при значительных колебаниях в обе стороны, когда популяция в большинстве своем состоит из «ястребов» или из «голубей», или же имеет место равновесие, при котором определенное соотношение может длительное время оставаться неизменным.

Докинс приводит много красочных примеров из повседневной жизни людей и детально сопоставляет их с поведением животных. Такие явления, как «бензиновые войны» с их закулисными соглашениями об уровне цен и предательскими нарушениями этих соглашений, полностью описываются Докинсом на основе теории игр. В книге рассматриваются особи и с другими типами поведения, например «конформист» (индивид, который при нападении «ястреба» ведет себя, как «ястреб», а при нападении «голубя» — как «голубь»), «задира» (индивид с поведением «ястреба» пока не получает отпора, после чего немедленно спасается бегством), «сопротивленец-опытник» (индивид, подобный «сопротивленцу», но иногда в порядке эксперимента пробует сам обострить борьбу). Все эти пять типов поведения можно одновременно воспроизвести в компьютере при моделировании большой популяции, подобно тому, как различные стратегии игры «кто меньше» могут соперничать в одном компьютере. Путем такого моделирования можно определить оптимальную стратегию, не прибегая к теории игр. Именно это, по утверждению Докинса, и произошло в природе за многие тысячелетия: огромное разнообразие типов поведения соперничало друг с другом, и в конечном счете подобное расточительство природы себя оправдало — благодаря ему появились виды, избравшие оптимальную стратегию.

С ПОМОЩЬЮ концепции УСЭ Докинс показывает, что наблюдаемые факты, которые как будто свидетельствуют о групповом отборе, можно объяснить на уровне отбора *генов*. Он пишет: «Концепция УСЭ Дж. Мэйнарда Смита впервые позволяет нам понять, почему множество самостоятельных эгонистичных существ начина-

ют походить на единое организованное целое... Отбор на уровне отдельного гена может создать впечатление, что отбор происходит на более высоком уровне». В книге Докинса можно найти много других ярких примеров различных типов поведения, которые сходны с ситуациями в политической сфере деятельности человека. Некоторые из них напоминают об опасностях, связанных с нынешней гонкой вооружений.

Хотя книга Докинса посвящена вполне серьезным вещам, в ней есть забавный раздел, в котором описывается эволюция полового поведения. Чтобы выяснить, как эволюционировало половое поведение, Докинс придумывает «подлые» и «честные» гаметы (так называют половые клетки) и показывает, как через множество поколений «подлые» гаметы постепенно превратились в мужские, а «честные» — в женские. Попутно он разбирает такие типы поведения, как «скромный» и «легкомысленный» (только у женских особей) и «верный» и «распутный» (только у мужских особей), а также стратегию «домашнего блаженства». Докинс подчеркивает, что эти термины он употребляет метафорически (и уж конечно, не антропоморфистски). Тем не менее они помогают разобраться в механизме эволюции. И многим из упомянутых типов поведения можно найти соответствия в числовых играх, о которых я рассказывал выше.

Когда я писал эту статью, меня заинтересовала мысль — играть в «кто больше», не устанавливая точного конечного количества очков, а продолжать ее до тех пор, пока не будет выполнено какое-нибудь другое условие, например пока разница между названными числами не составит 2. Если я скажу 10, а вы скажете 8 — игра окончена (и в этом туре никто не получает очков).

Мы с Робертом попробовали этот вариант, но быстро обнаружили, что, как только один из нас начинал проигрывать, игра заходила в тупик: она становилась бесконечной. Проигрывающий, заинтересованный в продолжении игры, начинает называть большие числа, которые невозможно предугадать, и условие окончания игры становится невыполнимым. Выигрывающий в свою очередь тоже способствует такому исходу. Называя все время небольшие числа, он тем самым постоянно выигрывает новые очки, еще больше увеличивая свой перевес. Получается своего рода заколдованный круг: игроки совместными усилиями заводят игру в тупик.

Чтобы избежать этого, Роберт предложил изменить условие и считать, что игра заканчивается, если один из играющих выходит победителем в пяти турах подряд (т.е. пять раз

подряд получает положительное количество очков). Теперь проигрывающий уже не склонен добиваться тупика, так как это приведет его к поражению. По шутливому замечанию Роберта, вы можете попытаться закончить игру, даже если отстали в счете. Пять последних туров могут обеспечить вам победу. Эту игру я назвал «прыжок», так как поведение стремящегося к быстрой победе игрока похоже на поведение хищника, настигающего прыжком свою жертву.

ЧЕРЕЗ несколько лет после истории с игрой «кто меньше» так же случайно, в непринужденной обстановке была придумана игра в числа для *трех* человек. Условия игры в этом случае следующие: в каждом туре трое участников выбирают по одному числу из определенного ряда чисел, причем очки засчитываются игроку, выбравшему среднее число из трех, т.е. «самому посредственному». Количество добавляемых ему очков равно задуманному числу. Сумма очков двух других игроков остается прежней. (Оставалось неясным, что делать, если два игрока выберут одинаковые числа, но выход нашелся.)

Затем, скажем после пяти туров, очки игроков сравниваются и тот, у кого их больше... Минуточку! А почему надо считать, что выиграл тот, у кого очков больше? Ведь это противоречит принципу проведения отдельных туров. Более логично, если порядок определения победителя игры будет таким же, как и в каждом туре; победителем должен считаться игрок со *средним* количеством очков. Вначале игра называлась «посредственность», а позже я окрестил ее «хрушкой».

Этим прозвищем игра обязана знаменитой фразе сенатора Романа Хрушки из шт. Небраска. В то время, когда игра была только придумана, президент Никсон добивался утверждения в сенате кандидатуры Дж. Гарролда Карсуэлла на пост члена Верховного суда. Выступая по радио в защиту Карсуэлла от нападков критики, сенатор Хрушка высказал следующую мысль: «Пусть даже он (Карсуэлл) и посредственность — у нас столько посредственностей среди судей, адвокатов, да и не только среди них. Разве они не имеют права послать своего представителя в Верховный суд и хоть немного надеяться на сочувствие? Не можем же мы иметь там одних Брандайсов, Франкфуртеров, Кардозо и им подобных». Увы, кандидатура Карсуэлла не была одобрена, на горе всем посредственностям. Но для Хрушки все окончилось благополучно — он навсегда приобрел славу чемпиона посредственности.

Какой же должна быть стратегия при игре в «посредственность» на разных уровнях? Чтобы оказаться побе-

дителем на втором уровне, т.е. на уровне «чемпионата», надо быть посредственным игроком на первом уровне — уровне отдельных партий. Это значит, что если раньше считалось выгодным быть *предельно* посредственным при выборе средних чисел, то теперь надо быть *средне* посредственным, выбирая эти посредственные числа. Все наоборот! Как замечательно! Как замечательно все наоборот. Все это соответствует общему принципу обратного результата, который отвечает положениям дзен-буддизма и часто находит подтверждение в жизни: если слишком стараешься, то в конечном счете проигрываешь.

Впоследствии я разработал ряд вариантов игры в «посредственность», стараясь ее усовершенствовать и сделать более элегантной. Главная проблема заключается в том, как избежать ничьих не только на начальном, но и на более высоких уровнях. Лучшим решением представляется следующее: каждый игрок выбирает числа из ряда, несколько смещенного относительно рядов двух других игроков. Например, если игрок *A* выбирает целые числа в интервале от 1 до 5, игроки *B* и *C* будут делать выбор из ряда $n + 1/3$ и $n + 2/3$ соответственно (n — целые числа от 1 до 5). Ясно, что в этом случае на нулевом уровне ничьих быть не может.

ПОСМОТРИМ, что при этих условиях происходит на первом уровне? Напомним, что каждая партия первого уровня состоит из пяти туров нулевого уровня. В туре побеждает игрок, назвавший среднее число, и он получает такое же количество очков; другие игроки очки не получают. На этой стадии подсчет очков не вызывает осложнений. На второй стадии порядок подсчета следует изменить, чтобы избежать ничьих на последующих уровнях. Предположим, игроки *A*, *B* и *C* выбрали соответственно числа 3, $2\frac{1}{3}$ и $4\frac{2}{3}$. У *A* — среднее число, он получает 3 очка, *B* и *C* получают не по нулю, а ближайšie к нулю смещения их рядов. В данном случае *B* получит $1\frac{1}{3}$ очка, а *C* — $2\frac{2}{3}$ очка. В основе системы лежит следующее рассуждение. В пяти турах каждый игрок назовет пять чисел определенного типа. Сумма пяти целых чисел у игрока *A* будет целым числом, пять чисел типа $n + 1/3$ игрока *B* дадут сумму в виде $n + 2/3$, а пять чисел типа $n + 2/3$ игрока *C* дадут сумму в виде $n + 1/3$. В результате на следующем уровне игроки *B* и *C* поменяются рядами своих чисел, а все три суммы очков на новом уровне всегда будут различаться и никогда не совпадут. И победитель всегда будет иметь среднее количество очков на первом уровне.

Рассмотрим ход игры на втором уровне, предварительно обсудив, как присуждать очки за каждую партию на

первом уровне. Победитель игры на первом уровне получает, как и прежде, очки, равные среднему числу, а остальные игроки — очки в соответствии со своими числами. У игрока *A* это будет, как и прежде, нуль. Но у игрока *B* теперь уже будет $\frac{2}{3}$, а у игрока *C* — $\frac{1}{3}$. Пять партий первого уровня составят одну игру второго уровня. Принцип «однотипности уровней», который действовал до сих пор, сохраняется в подсчете очков второго уровня — результаты пяти партий первого уровня суммируются. И в этом случае в силу указанных причин ничьей быть не может, и всегда кто-нибудь будет победителем на втором уровне игры.

Игра в «посредственность» может состоять из любого числа уровней. Каждая игра на уровне $n + 1$ будет состоять из пяти игр на уровне n . Победитель в каждой игре на уровне n получает дополнительные очки, выигранные на этом уровне, а другие игроки получают минимальное количество очков (0, $\frac{1}{3}$ или $\frac{2}{3}$). Конечно, число 5 не является незыблемым: не обязательно, чтобы в игре на уровне $n + 1$ всегда было 5 туров на уровне n , их может быть и 4 или даже 2. (Не следует только выбирать числа, кратные 3, потому что в этом случае у всех трех игроков количество очков будет в результате выражено целыми числами, которые могут оказаться равными.) Если на каждом уровне будет всего два тура, легче провести игру с большим числом уровней. При такой структуре игра в «посредственность» с пятью уровнями имеет 32 тура на нулевом уровне, в то время как при стандартном числе туров, равном 5, только на нулевом уровне потребуется сыграть 125 туров.

Точно так же не обязательно и ограничение ряда n ; величина n может меняться от 1 до бесконечности. Ряд из пяти чисел — это лишь один из многих возможных вариантов игры. Стратегия игры в «посредственность» уже на втором уровне становится очень запутанной. Несколько раз я пытался сыграть в эту игру до третьего уровня, но не смог. Я был удивлен и разочарован. Подумайте только, что же творится в мировой политике, если даже такие простые игры, которые описаны в этой статье, могут поставить нас в тупик. Насколько сложнее «международные игры», в которых торгуются, блефуют, развязывают войны. Всем хитроумным приемам, о которых шла речь в статье, есть аналогии в политике, но они гораздо сложнее. Видя, как на мировой арене разыгрываются эти чудовищно сложные варианты, чувствуешь себя отдельной клеткой какого-то огромного организма, чья эволюционная стратегия уже давно приобрела устойчивую форму, и тебе остается лишь ожидать, чем все это кончится, и надеяться на лучшее.

Издательство МИР предлагает:

*Р. Девис,
Д. Ботстайн, Дж. Рот*
**МЕТОДЫ
ГЕНЕТИЧЕСКОЙ
ИНЖЕНЕРИИ.
ГЕНЕТИКА БАКТЕРИЙ**
*Т. Маниатис, Э. Фрич,
Дж. Сэмбрук*
**МЕТОДЫ
ГЕНЕТИЧЕСКОЙ
ИНЖЕНЕРИИ.
МОЛЕКУЛЯРНОЕ
КЛОНИРОВАНИЕ**

В последние годы методы генетической инженерии, открывающие реальные перспективы для направленной перестройки наследственности у животных и растений, находят все большее применение в биотехнологии, медицине, сельском хозяйстве и исследованиях структуры и функций генов.

Обе книги выпущены американским издательством «Коулд Спринг Харбор Лэборетори» и очень удачно дополняют друг друга. Методы, изложенные в них, отработаны в одном из наиболее известных научных центров США — лаборатории в Коулд Спринг Харбор, которую возглавляет лауреат Нобелевской премии Дж. Уотсон. В первой книге доступно, но на высоком научном уровне изложены основные методы молекулярно-генетического анализа и генетической инженерии бактерий (манипуляции с транспозонами, выделение фаговых, плазмидных и бактериальных ДНК, другие методы). Во второй книге подробно рассматриваются методы получения и культивирования некоторых штаммов бактерий и вирусов, выделение, очистка и анализ информационного РНК, синтез и клонирование ДНК, введение плазмидной ДНК и ДНК бактериофага лямбда в *E. coli*, анализ рекомбинантных клонов ДНК.

1984, 10 л., Цена 1 р. 25 к.
2. 1984, 32 л. Цена 4 р. 80 к.



Термиты угрожают человечеству

ТРУБЫ промышленных предприятий вселяют в людей немалую тревогу, ведь они выбрасывают в атмосферу двуокись углерода и другие газы, которые препятствуют поддержанию теплового баланса на Земле. В этой проблеме возник новый аспект: недавно появились сообщения о выделении газов термитами, биомасса которых на земном шаре огромна. Объем газов, образующихся в процессе жизнедеятельности термитов, превосходит объем промышленных газовых отходов. Двуокиси углерода, например, они выделяют в два раза больше, чем все заводские трубы, вместе взятые. Эти насекомые, кроме того, «поставляют» в атмосферу огромное количество метана, молекулярного водорода и других газов — минорных компонентов воздуха. Проблему термитов обсуждали на страницах журнала «Сайенс» П.Циммерман и Дж.Гринберг из Национального центра исследования земной атмосферы, С.Вандига из Университета в Найроби и П.Кратзен из отдела химии атмосферы Института Макса Планка.

Мировая популяция термитов оценивается в $2,4 \cdot 10^{17}$ особей. Степень усвоения пищи у насекомых составляет не менее 60%. У термитов пищеварение зависит в первую очередь от разложения пищи микроорганизмами в кишечнике. Ученые наблюдали колонии термитов в лабораторных условиях и установили, что в целом насекомые во всем мире выделяют $4,6 \cdot 10^{16}$ г двуокиси углерода в год — в два раза больше, чем образуется из всей массы угля, которую сжигают люди. Метана эти насекомые выделяют $1,5 \cdot 10^{14}$ г, а молекулярного водорода — $2 \cdot 10^{14}$ г в год.

Циммерман, Гринберг, Вандига и Кратзен указывают, что экологическое воздействие термитов, если его оценивать по отношению объема съеданной ими пищи к первичной продуктивности по биомассе, наибольшее во влажной саванне, в районах пастбищ в зоне умеренного климата, на сельскохозяйственных угодьях в развивающихся странах и на землях, расчищенных выжиганием растительности.

Авторы делают оговорку, что их оценка приближительна: погрешность лабораторных измерений составляет 50%, причем ошибка на самом деле еще больше из-за того, что, вероятно, не все виды термитов выделяют газы в том количестве, которое было установлено в эксперименте. Более того, расчеты не учитывают, что в естест-

венных условиях почвенные микроорганизмы могут поглощать или перерабатывать какую-то долю выделений термитов. «Мы допускаем, что реальный объем продуцируемых насекомыми газов может вдвое отличаться от рассчитанного».

Расселение сумчатых в доисторическую эпоху

ОКОЛО 50 млн. лет назад сумчатые млекопитающие пережили эпоху расцвета; тогда эти животные расселились на территории нынешнего американского континента (преимущественно в Южной Америке), в Западной Европе и в Австралии. Если руководствоваться принципом «бритвы Оккама»*, трудно предположить, что эти три группы сумчатых появились независимо друг от друга. Однако тогда неясно, переселились ли сумчатые млекопитающие в Австралию из Южной Америки (по-видимому, в Европу они пришли именно оттуда) или же они обитали там с самого начала и оттуда распространились по другим континентам? В связи с этим возникает еще один вопрос: как животные могли мигрировать с одного материка на другой? Ответ на него нашелся несколько лет назад, когда стали изучать дрейф континентов. Оказалось, что как раз в эпоху расцвета сумчатых млекопитающих Южная Америка была соединена с Австралией через Антарктику.

До недавнего времени, однако, многочисленные находки остатков рыб, рептилий, птиц и даже морских млекопитающих на территории Антарктики не давали никаких указаний на то, что сумчатые воспользовались этим «мостом» при расселении. В журнале «Сайенс» М.Вудберн из Калифорнийского университета в Риверсайде и У.Цинсмайстер из Университета шт.Огайо опубликовали результаты раскопок в песчанике на острове Сеймур, недалеко от Антарктического полуострова. Они нашли ископаемые остатки челюстных костей и зубов, которые относятся к

*Уильям Оккам (1285 — 1349) — английский философ, логик. Первичным познанием, по Оккаму, является интуитивное познание, складывающееся из внешнего восприятия и интроспекции. Понятия, не сводимые к интуитивному знанию и не поддающиеся проверке опытом, должно исключать из науки: «Сущности не следует умножать без необходимости». Этот принцип получил название «бритва Оккама». — *Прим. ред.*

позднему мезозою — раннему кайнозою.

Это первая находка остатков наземных млекопитающих в Антарктике. Их относят к вымершему семейству сумчатых — полидолопидам. Ископаемые остатки представителей этой группы животных прежде находили в Патагонии, Боливии и Бразилии. За пределами Южной Америки полидолопид до сих пор не обнаруживали, следовательно, в Антарктику они пришли скорее всего из Нового Света, а не из Австралии. В Австралии сумчатые позднего мезозоя и раннего кайнозоя неизвестны, а ископаемые остатки, относящиеся к более позднему времени, ближе к современным сумчатым (там их сейчас обитает восемь семейств), чем к каким-то возможным предковым сумчатым, пришедшим в Австралию с другого материка. Стало быть, вопрос о путях миграции мезозойских сумчатых пока остается открытым.

Издательство МИР предлагает:

И. Экланд ЭЛЕМЕНТЫ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЭКОНОМИКИ

Перевод с английского

Введение в математическую экономику, начинающееся с основных понятий и доведенное до современных математических моделей. Большое внимание уделено геометрической наглядности изложения и экономическому содержанию формальной теории. Автор — французский математик, известный советским читателям по переводу в соавторстве с И. Темамом книги «Выпуклый анализ и вариационные проблемы» (М.: Мир, 1979). Для математиков, интересующихся современной математической экономикой, для студентов, специализирующихся по прикладной математике, экономической кибернетике, исследованию операций.

1983, 14 л. Цена 2 р. 10 к.



Энергетические станции клетки; Жизнь великого Ньютона

ФИЛИП MORRISON

А. Цаголофф. МИТОХОНДРИИ
MITOCHONDRIA, by Alexander Tzagoloff.
Plenum Press (\$42.50)

С ТО ЛЕТ назад цитологи, неутомимо совершенствовавшие методики фиксации и окрашивания тканей, обнаружили, что во всех клетках животных и растений во множестве содержатся мелкие вытянутые гранулы, рассеянные по всей цитоплазме. Эти гранулы назвали митохондриями. По размеру и форме они напоминают бактерий. Вскоре после второй мировой войны было показано, что эти органеллы очень важны. Биохимики, пользуясь классическими методами экспериментов в растворах (с неперменным смесителем Уоринга, со всем традиционным набором химических и фотохимических методов), мало-помалу расшифровали длинные цепи метаболизма. Вершиной этой работы стало открытие цикла Кребса — кольца из восьми последовательных ферментативных реакций. Первичный продукт биологического окисления в конце концов «сгорает» с образованием воды и двуокиси углерода; в результате клетки, которые «дышат», получают при окислении каждой молекулы глюкозы почти в 20 раз больше энергии, чем клетки, в которых происходит анаэробное брожение.

В 1948 г. выяснилось, что система биологического окисления помещается в митохондриях. Энергию, освобождающуюся в цикле Кребса, нужно как-то сберечь, чтобы затем использовать для совершения биохимической работы. Для этого с циклом Кребса сопряжено образование в каскаде окислительных процессов универсального клеточного топлива — АТФ; в АТФ и запасается энергия, полученная при «сгорании» глюкозы. Процесс сопряженного синтеза АТФ недоступен классическим методам исследования, потому что его ключевые ферменты нерастворимы в воде, и получить существенный синтез АТФ в бесклеточных экстрактах пока что не удавалось. Синтез АТФ — прерогатива тонкой структуры клетки, а не просто белков.

Автор (в настоящее время он работает в Колумбийском университете) сразу вводит читателя в курс дела — надо сказать, книга вообще написана очень живо. Одни из первых электронных микрофотографий митохондрий получили около 30 лет назад А. Клод и

Дж. Э. Паладе. В настоящее время разработаны такие замечательные способы фиксации и окраски препаратов, что можно с хорошим разрешением наблюдать структуры в двести раз меньшие, чем это было возможно тогда. Старания микроскопистов не пропали даром. Выяснилось, что митохондрия представляет собой как бы два замкнутых «мешка», помещенных один внутри другого, и что во внутреннем отсеке содержатся все ферменты цикла Кребса. Внешняя мембрана имеет вид удлиненной цистерны с ровной поверхностью, а внутренняя мембрана образует глубокие впячивания, так что ее форма довольно сложная и, по-видимому, изменчивая (движения внутренней мембраны иногда удается наблюдать с помощью кинесъемки).

В течение 20 лет биоэнергетики с увлечением разрушали мембраны с помощью ультразвука и пытались их последовательно реконструировать, так чтобы восстановились их функции. Тем не менее образование АТФ до сих пор окутано тайной, не до конца расшифрован его механизм, есть неясности и по поводу места синтеза. Внутренняя мембрана митохондрий выстлана крохотными белковыми глобулами, которые стебельками соединены с основаниями, погруженными в мембрану. По-видимому, три части этой структуры: основание, стебелек и головка-глобула — и составляют фермент заключительного этапа синтеза АТФ, но твердых доказательств пока нет. В первых семи главах рассматриваются классические биохимические эксперименты и более поздние исследования конкретных химических функций митохондрий; девятая глава посвящена совершенно новой теме — природе самих мембран. Мембраны — это не просто инертные стенки. Например, если выделить активную цитохромоксидазу и добавить к ней *in vitro* фосфолипиды, с поразительной легкостью образуются мелкие замкнутые мембранные пузырьки. Структура и функции митохондрий неразделимы.

В двух заключительных главах обсуждаются самые последние достижения. Митохондрии (их в клетке целая популяция) в зависимости от потребностей клетки в энергии делятся и вновь сливаются вместе, механизм этого процесса пока что не очень понятен, и автор рассматривает его лишь в об-

щих чертах. Митохондрии содержат собственный, внеядерный генетический материал — ДНК. В книге приводится очень красивая микрофотография кольцевой ДНК из митохондрии человека; это простая структура в форме петли с контурной длиной в несколько микрон (для сравнения следует вспомнить, что общая длина многократно сложным образом закрученной ядерной ДНК человека 1—2 м). Для этой необычной части генетического аппарата человека составляют генетические карты, определяют нуклеотидную последовательность. Митохондрии дрожжей и млекопитающих во многом различны; заслуживает внимания тот факт, что в митохондриях обоих типов одна из незаменимых аминокислот кодируется совершенно необычным триплетом нуклеотидов. То есть во внеядерной части генетического аппарата человека работает генетический код, отличный от универсального.

В последних главах описывается много интереснейших результатов и методов современной молекулярной биологии и генетики; освещены публикации на эту тему вплоть до конца 1980 г. Книга заканчивается гипотезой о происхождении митохондрий (изложенной, может быть, излишне эмоционально): у митохондрий есть много черт, которые характеризуют их как чужеродные организмы, своеобразные квазикальории — слуги клетки-хозяина, живущие внутри нее. Автор достаточно искушен в науке и вовсе не склонен к спекуляциям, но изучение митохондрий — тяжелое испытание для современной молекулярной биологии. Обсуждать сложные исследования, уровень которых выходит за рамки учебников, не просто, но необходимо. Стремление автора к этому следует отнести к важным достоинствам книги, которая, помимо всего прочего, привлекает прекрасным стилем изложения, одновременно и ярким, и четким.

Ричард С. Уэстфолл. НИДНЯ ОТДЫХА: БИОГРАФИЯ СЭРА ИСААКА НЬЮТОНА
NEVER AT REST: A BIOGRAPHY OF SIR ISAAC NEWTON, by Richard S. Westfall,
Cambridge University Press (\$49.50)

С ТЕХ ПОР как сэр Дэвид Брюстер выпустил в свет «главную биографию» Исаака Ньютона в двух томах, отмеченную викторианской высокопарностью и ученостью, прошло 125 лет. И вот у нас в руках объемистая, увлекательная книга — результат двадцатилетней работы известного историка науки из Индианы. Это научная биография, представляющая Ньютона прежде всего как ученого и исследователя. Книга вышла на общем фоне возникшего после второй мировой войны широкого интереса к личности Ньюто-

на. За это время издано семь томов его писем, восемь томов математических рукописей, а также ряд ценных книг по конкретным темам, отличающихся богатством документальным материалом, глубиной анализа и новизной.

Белых пятен пока хватает: взять хотя бы объективную оценку профессором Уэстфоллом простого перечня рукописей Ньютона, посвященных алхимии. Одни только эти труды могли бы составить 6 — 8 внушительных томов. Большая коллекция рукописей по теологии и истории находится в Иерусалиме, всего же существуют пять крупных собраний его рукописей. Ньютон упорно работал на протяжении всей своей долгой жизни, не давая себе ни дня отдыха. Слова, вынесенные в заглавие книги, принадлежат самому Ньютону и взяты из письма, которое он написал в возрасте 51 года: «Простой механик способен применить на практике все, чему его научили или чему он был свидетель, однако, совершив ошибку, он не знает, как ее выявить и исправить... Зато тот, кому дано рассуждать живо и непредвзято о телах, различных силах и движениях, тот не даст себе ни дня отдыха, пока не преодолит все препятствия».

В новейших исследованиях наследия Ньютона прослеживаются три основных направления. Большинство авторов пытались понять его метод, гипотезы, мировоззрение. Как он пришел к той или иной идее? На эти вопросы дает ответ кропотливое изучение текстов. Мы располагаем двухтомным вариантом его «Начал»*, содержащим разночтения в трех прижизненных изданиях книги. Здесь мы находим бесконечные споры о приоритете. Второе направление исследований позволило с блеском очертить психологический портрет этого человека — одинокого, одержимого работой, замкнутого, полного страхов, ревнивого, временами деспотичного. Что касается пути, избранного в данном случае, то его можно сравнить с неспешной прогулкой, когда есть время окинуть взглядом пейзаж; здесь Ньютон вписан в контекст своей эпохи. Как тогда относились к его высказываниям? Замерла ли жизнь в Кембридже, когда из-за чумы закрылись колледжи? При таком подходе легенды выглядят менее фантастичными, внутренний мир человека — не столь гиперболизированным, неприкаянная душа — более гармоничной.

Ньюتون-школьник надолго всем запомнился благодаря своим «странным изобретениям». Он завалил весь дом

солнечными часами собственной конструкции. (Даже будучи в преклонном возрасте, он предпочитал определять время по тени.) Он любил привязывать бумажный фонарик к хвосту воздушного змея, чтобы поугаать соседей; он построил модель ветряной мельницы, которая приводилась в движение мышью, бегавшей в колесе, и соорудил маленькую тележку, в которой катался, пользуясь ручным рычагом. Сегодня мы знаем, что многие из этих хитроумных приспособлений Ньютон нашел в книге Джона Бэйта «Тайны природы и искусства». Этот старинный фолиант давал пищу его богатому воображению, подобно тому как во все времена аналогичные книги пробуждают в юных умах живой интерес к науке.

Ньютон был принят в Тринити-Колледж в 1661 г. К тому времени университеты превратились в доходные предприятия: выпуская ученых-богословов, они стали делить между собой сферы влияния на церковные бенефиции. «Кембриджский университет, подобно Оксфордскому, постепенно превращался в фабрику ученых степеней, и этой фабрикой без зазрения совести пользовался всякий, кому посчастливилось получить туда доступ». Не забудем, однако, что Кембридж был центром английского пуританизма, и после Реставрации ему волей-неволей пришлось продемонстрировать публично, что он изжил грехи прошлого. Почти все, кто стоял во главе колледжей, были смещены; в атмосфере политических интриг освобожденные должности оказались лакомыми кусками. Что до студентов, то их число резко возросло и достигло уровня эпохи правления Иакова I. Интеллектуальная жизнь находилась практически в застое. Рассказывают, что, когда Ньютон уезжал учиться, просвещенный дядюшка снабдил его учебником логики, поскольку, по его мнению, с него должно начаться преподавание, как начиналось тридцать лет назад, когда дядя сам ходил в студентах. Предсказание сбылось, однако от прежнего горения в Кембридже, который ныне потчевал всех формализованным Аристотелем, ничего, увы, не осталось. Все свелось к зубрежке. Диспуты превратились в ритуал, кафедры стали синекурой. Лекции не посещались, да и сами лекторы частенько прогуливали.

Несмотря на закрытие университета сроком на два года в связи с эпидемией чумы, число лиценциатов, по данным статистики, ничуть не уменьшилось. Ньютон же так и не закончил свою выпускную работу; впрочем, это мало кого интересовало. Экзамены для студентов Тринити-Колледжа по-прежнему проводились, но скорее в силу привычки. В 1664 г. Ньютону уда-

лось добиться аспирантской стипендии вместо нищенской субсайзерской (самая низкая из стипендий, вынуждавшая бедных стипендиатов идти в лакеи к своим же более зажиточным товарищам). Похоже, тут не обошлось без вмешательства влиятельного покровителя.

Исаак Барроу — один из тех в Тринити-Колледже, кто был в состоянии помогать Ньютону в его научной деятельности. Спустя пять лет, Барроу, характеризуя работу о бесконечных рядах, скажет об ее авторе так: «Г-н Ньютон очень молод (второй по возрасту магистр), но исключительно талантлив и сведущ в этой области». В тот год Барроу в пользу молодого Ньютона отказался от хорошо оплачиваемого места, а именно должности руководителя почетной люкасовской кафедры. Сам Барроу добивался и вскоре получил другое назначение: через три года он становится во главе колледжа. Надо полагать, не кто иной, как Барроу добился в 1675 г. королевской уступки, благодаря которой люкасовская профессура, начиная с профессора Ньютона, навсегда освобождалась от обязанности принимать духовный сан.

Для Ньютона это требование могло бы стать практически невыполнимым, так как в душе он совершенно отвергал догмат Троицы в том виде, в каком его утверждает англиканская церковь. Отказ же от церковного сана не только стоил бы ему работы, но и сделал бы его открытой мишенью для обвинений в ереси, что в те времена религиозного фанатизма было равносильно гражданской смерти. И тем не менее вследствие имевшего место какого-то недоразумения на устном экзамене в 1664 г. у Ньютона сложилось мнение, что Барроу к нему «относился с безразличием». Возможно, Ньютон ошибался. Это нам неизвестно.

Между 1664 и 1667 гг. (спустя год после окончания университета) Ньютон открыл для себя и разработал новую аналитическую геометрию Декарта, сформулировал в своих записных книжках положения, которые станут программой всех его будущих экспериментов в области оптики и механики и определяют его самостоятельный путь к «решению проблем движения», а также идеи математических расчетов. Уэстфолл расценивает эти три года как чудотворные, а не просто чудесные. Речь не о том, что за 24-летним Ньютоном утвердились «результаты, которые обессмертили его имя в математике, механике или оптике. Он фактически заложил основы всех этих дисциплин». А как насчет упавшего яблока? Яблоко как будто было, однако мнение, будто он двадцать лет сохранял в тайне идею всемирного тяготения, документально не подтверждает-

* Ньютон И. Математические начала натуральной философии, с примечаниями и пояснениями А. Н. Крылова. — В кн.: Крылов А. Н. Собр. трудов, т. 7, М. — Л., 1936. — Прим. ред.

ся. Другое дело, что у него могло быть интуитивное ощущение, некая смутная догадка о существовании грандиозного всеобщего закона. Всемирное тяготение, прямо скажем, это не то, что открывается в результате мгновенного прозрения, тут требуется «время, чтобы хорошенько поразмыслить».

Перед читателем проходит жизнь человека на фоне широкой панорамы общества. Живя в Лондоне, общепризнанная знаменитость предстает перед нами уже не столько оригинальным мыслителем, идет ли речь о религии или механике, сколько обычным чиновником. Великая революция 1688 г. заставила его пересмотреть свои взгляды, он даже подверг испытанию свое общественное имя. Как раз в то время мир познакомился с его «Началами», во многом благодаря усилиям неутомимого Галлея. В книге можно прочесть о племяннице Ньютона, юной красавице редкого ума. (Свифт, ставший ее близким другом, однажды написал, что он «любит ее больше кого бы то ни было в этой жизни».) Проницательный Вольтер утверждал, что высокий пост достался Ньютону исключительно благодаря чарам его племянницы, покорившей министра Галифакса. «Производные и закон тяготения оказались бы бессильны, не будь прелестной племянницы».

Вонстину, Кэтрин Бартон свое завоевала. Как бы там ни было, неподражаемый и скандально известный министр был давно в тесной дружбе с Ньютоном: в свою бытность студентом он, хотя и не проявил талантов к наукам, однако же вместе с Ньютоном и еще несколькими приятелями учредил Философское общество. Став канцлером казначейства, Галифакс первым делом назначил Ньютона на пост смотрителя Монетного двора, и у нас нет оснований полагать, что здесь какую-то роль сыграла «умница миссис Бартон», которая тогда была совсем еще девочкой, так как сам Ньютон был вполне подходящим кандидатом на это место и имел все основания получить его.

А вот перед нами постаревший Ньютон, эксперт в Парламенте по вопросам определения долготы. Он не очень верил в возможность создания точных часов, однако указал на все пути определения долготы, которые известны нам сегодня, за исключением разве что инерциальной навигации. Предложенные в те годы сигналы времени были звуковыми и имели ограниченную область распространения.

Ньютон умер в возрасте 86 лет. Пятнадцать лет потратил он на то, чтобы очистить свои труды по теологии, предназначенные для печати, от неканонических утверждений. Перед смертью, однако, он бросил вызов церкви, отказавшись от святого причастия. Похоже, что этого скрытного челове-

ка не вполне удовлетворяли его триумфальные достижения. «Он был крайне озабочен тем, каким останется его образ в памяти людей». Никто, за исключением коронованных особ, не почитал так часто художникам. В книге приводится около двадцати его портретов и тридцать рисунков, сделанных самим Ньютоном. (Жаль, нет среди них портрета миссис Бартон.) И все же этот солидный труд не охватывает драмы во всей ее полноте. Ни обилие цитат из Ньютона, ни добросовестные изыскания биографов с их психоаналитическими озарениями не могут до конца прояснить для нас образ этого выдающегося мыслителя — одухотворенного, одержимого и при этом одинокого.

Но ясно одно. Главный итог деятельности Ньютона — это приближение к истине. Его современники-ученые, все как один приверженцы механистической философии, находились в плену общего заблуждения. Ориентация философов-схоластов на оккультизм изжила себя; уже напрашивался вывод, что материя может приводиться в движение лишь путем взаимодействия сталкивающихся друг с другом мельчайших частиц. Когда талантливому Христиану Гюйгенсу сообщили о том, что «Начала» будут в скором времени опубликованы, он сказал: «Пусть себе отвергает Декарта, только бы не подсовывал нам теории о каком-то там притяжении». Однако все привело к теории притяжения, и именно благодаря ей мы получили знания, широко применяемые без каких-либо изменений на протяжении вот уже 250 лет. Можно предположить, что долгие часы, проведенные Ньютоном у печей, которые он построил своими руками в надежде найти в плавильном тигле таинственную мудрость алхимиков, убедили его в том, что материальный мир устроен намного сложнее по сравнению с наивными моделями континентальных философов. Нельзя было двигаться вперед, не подвергнув сомнению незыблемые в те времена позиции метафизиков.

Издательство МИР предлагает:

Ф. Гудман, Г. Вахман ДИНАМИКА РАССЕЯНИЯ ГАЗА ПОВЕРХНОСТЬЮ

Перевод с английского

Введение в методы исследования рассеяния газов поверхностями — одного из наиболее актуальных и перспективных направлений механики разреженных газов. В монографии описывается экспериментальная методика молекулярных пучков, излагаются классическая и квантовая теория рассеяния на кристаллической решетке, систематизируются результаты, полученные за последние пятнадцать лет.

Книга рассчитана на математиков-прикладников и инженеров различных специальностей (по аэродинамике и космонавтике, химической и вакуумной технологии, атомной и химической физике); она может быть использована как пособие для студентов и аспирантов соответствующих специальностей.

Монография включает следующие разделы: 1. Введение. 2. Элементарная кинетическая теория газов вблизи поверхности. 3. Потенциалы и взаимодействия и режимы взаимодействия. 4. Упрощенные модели решетки для динамики атомов поверхности твердого тела; классическая теория рассеяния газа поверхностью. 5. Молекулярные пучки. 6. Неупругое рассеяние; структурный режим. 7. Квантовая теория рассеяния газа поверхностью. 8. Квантовомеханические явления при рассеянии. 9. Коэффициент accommodation энергии. Дополнение. Классические представления в задаче взаимодействия газа с поверхностями.

1980, 27 л., Цена 4 р. 10 к.

Эту книгу вы можете приобрести в магазинах книготоргов, распространяющих научно-техническую литературу.



Издательство
МИР
предлагает:

Р. Хейвуд

**ТЕРМОДИНАМИКА
РАВНОВЕСНЫХ
ПРОЦЕССОВ**

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 доказательства 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.



**МАГИЯ
МАТЕМАТИКИ**

THE COMPLEAT STRATEGYST. J. D. Williams. McGraw-Hill Book Company, 1954.

GAME THEORY: MATHEMATICAL MODELS OF CONFLICT. A. J. Jones. Ellis Horwood, Ltd., 1980.

A UNIFIED MODEL FOR BARGAINING AND CONFLICT. Douglas Heckathorn in *Behavioral Science*, Vol. 25, pages 261 — 284; 1980.

**МАССОВОЕ
КУЛЬТИВИРОВАНИЕ
КЛЕТОК
МЛЕКОПИТАЮЩИХ**

TISSUE CULTURE: METHODS AND APPLICATIONS. Edited by Paul F. Kruse, Jr., and M. K. Patterson, Jr. Academic Press, 1973.

CELL CULTURE. Edited by William B. Jacoby and Ira H. Pastan. Academic Press, 1979.

OPTIMIZING CULTURE CONDITIONS FOR THE PRODUCTION OF ANIMAL CELLS IN MICROCARRIER CULTURE. J. M. Clark and M. D. Hirtenstein in *Annals of the New York Academy of Sciences*, Vol. 369, pages 33 — 46; 1981.

**ХОДЯЩИЕ
МАШИНЫ**

ANIMALS IN MOTION. Eadweard Muybridge. Dover Publications, Inc., 1957.

USING BODY SIZE TO UNDERSTAND THE STRUCTURAL DESIGN OF ANIMALS: QUADRUPED LOCOMOTION. T. A. McMahon in *Journal of Applied Physiology*, Vol. 39, No. 4, pages 619 — 627; 1975.

ADAPTIVE LOCOMOTION OF A MULTI-LEGGED ROBOT OVER ROUGH TERRAIN. R. B. McGhee and G. I. Iswandhi in *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. SMC-9, No. 4, pages 176 — 182; 1979.

DYNAMIC STABILITY AND RESONANCE IN A ONE-LEGGED HOPPING MACHINE. M. H. Raibert in *Proceedings of the 4th Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators*, edited by A. Morecki, G. Bianchi and K. Kedzior. Elsevier Scientific Publishing Co., 1981.

A WALKING ROBOT. Ivan E. Sutherland. The Marcian Chronicles, Inc., Pittsburgh, 1982.

**ВОЛОСКОВЫЕ КЛЕТКИ
ВНУТРЕННЕГО УХА**

THE AUDITORY PERIPHERY: BIOPHYSICS AND PHYSIOLOGY. Peter Dallos. Academic Press, 1973.

SENSITIVITY, POLARITY, AND CONDUCTANCE CHANGE IN THE RESPONSE OF VERTEBRATE HAIR CELLS TO CONTROLLED MECHANICAL STIMULI. A. J. Hudspeth and D. P. Corey in *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Vol. 74, No. 6, pages 2407 — 2411; June, 1977.

**СЛЕДЫ
ВЫМЕРШИХ
ЖИВОТНЫХ**

ICHNIA TETRAPODORUM. O. Kuhn in *Fossilium Catalogus I: Animalia*, edited by F. Westphal. W. Junk, The Hague, 1963.

DIE FOSSILIEN CAURIERFAHRTEN. Hartmut Haubold. Die Neue Brehm-Bücherei, Ziemsen, Wittenberg Lutherstadt, 1974.

FOSSIL TRACKS AND IMPRESSIONS OF VERTEBRATES. William A. S. Sarjeant in *The Study of Trace Fossils: A Synthesis of Principles, Problems, and Procedures in Ichnology*, edited by Robert W. Frey. Springer-Verlag, 1975.

Габуния Л. К. Следы динозавров. — М.: Изд-во АН СССР, 1958, 71 с.

**ИССЛЕДОВАНИЕ
ЖИВЫХ ОРГАНИЗМОВ
МЕТОДОМ ЯМР**

CELLULAR APPLICATIONS OF ^{31}P AND ^{13}C NUCLEAR MAGNETIC RESONANCE. R. G. Shulman, T. R. Brown, K. Ugurbil, S. Ogawa, S. M. Cohen and J. A. den Hollander in *Science*, Vol. 205, No. 4402, pages 160 — 166; July 13, 1979.

MAPPING OF METABOLITES IN WHOLE ANIMALS BY ^{31}P NMR USING SURFACE COILS. Joseph J. H. Ackerman, Thomas H. Grove, Gordon G. Wong, David G. Gadian and George K. Radda in *Nature*, Vol. 283, No. 5743, pages 167 — 170; January 10, 1980.

EXAMINATION OF A CASE OF SUSPECTED MCARDLE'S SYNDROME BY ^{31}P NUCLEAR MAGNETIC RESONANCE. Brian D. Ross, George K. Radda, David G. Gadian, Graeme Rucker, Margaret Esiri and James Falconer-Smith in *The New England Journal of Medicine*, Vol. 304, No. 22, pages 1338 — 1342; May 28, 1981.

Издательство
МИР
предлагает:

Э. Гааль, Г. Медьешу,
Л. Верецкеи
**ЭЛЕКТРОФОРЕЗ
В РАЗДЕЛЕНИИ
БИОЛОГИЧЕСКИХ
МАКРОМОЛЕКУЛ**

Перевод с английского

Развитие современной биологии в значительной мере обязано новым методам исследования. Среди них важнейшую роль играет метод электрофореза, получивший в последнее время необычайно широкое распространение. Электрофорез позволяет быстро и эффективно разделять сложные смеси макромолекул.

В монографии известных венгерских специалистов последовательно рассмотрены теоретические и методические основы электрофореза, зональный электрофорез, электрофорез в гелях, новые виды электрофореза (изоэлектрическое фокусирование и изотахофорез), выявление и количественное определение молекул на электрофореграммах, техника и особенности электрофоретического разделения белков, нуклеиновых кислот и гликозаминогликанов. Подробно описаны также многочисленные варианты иммуноэлектрофореза. В целом книга представляет собой фундаментальное руководство по электрофорезу, рассчитанное на специалистов различного профиля.

В первую очередь издание предназначено для биологов всех специальностей, пользующихся в своей работе методами современной биохимии, для врачей-лаборантов, а также для студентов университетов, медицинских, педагогических и сельскохозяйственных институтов.

1982, 448 стр. Цена 3 р. 20 к.

Заказы на эту книгу направляйте по адресу: 129820 Москва, И-110, ГСП, 1-й Рижский пер., д.2, издательство «Мир», отдел распространения и рекламы. Книга будет выслана наложенным платежом.



IN VIVO CARBON-13 NUCLEAR MAGNETIC RESONANCE STUDIES OF MAMMALS. J. R. Alger, L. O. Sillerud, K. L. Behar, R. J. Gillies, R. G. Shulman, R. E. Gordon, D. Shaw and P. E. Hanley in *Science*, Vol. 214, No. 4521, pages 660 — 662; November 6, 1981.

NUCLEAR MAGNETIC RESONANCE AND ITS APPLICATIONS TO LIVING SYSTEMS. David G. Gadian. Oxford University Press, 1982.

**ФИЗИЧЕСКИЕ
ПРОЦЕССЫ
В ОРГАНИЧЕСКИХ
ТРУБАХ**

SOUNDING MECHANISM OF THE FLUTE AND ORGAN PIPE. John W. Coltman in *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 44, No. 4, pages 983 — 992; October, 1968.

ON THE MECHANISM OF SOUND PRODUCTION IN ORGAN PIPES. Samuel A. Elder in *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 54, No. 6, pages 1554 — 1564; December, 1973.

SOUND PRODUCTION BY ORGAN FLUTE PIPES. N. H. Fletcher in *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 60, No. 4, pages 926 — 936; October, 1976.

WAVE PROPAGATION ON TURBULENT JETS. S. Thwaites and N. H. Fletcher in *Acustica*, Vol. 45, No. 3, pages 175 — 179; July, 1980.

HARMONIC GENERATION IN ORGAN PIPES, RECORDERS AND FLUTES. N. H. Fletcher and Lorna M. Douglas in *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 68, No. 3, pages 767 — 771; September, 1980.

WAVE PROPAGATION ON TURBULENT JETS, II: Growth. S. Thwaites and N. H. Fletcher in *Acustica*, Vol. 51, No. 1, pages 44 — 49; June, 1982.

**КОСМИЧЕСКИЙ
РЕНТГЕНОВСКИЙ ФОН
И ЕГО ПРОИСХОЖДЕНИЕ**

THE LUMINOSITY OF SERENDIPITOUS X-RAY QSOs. Bruce Margon, Gary A. Chanan and Ronald A. Downer in *The Astrophysical Journal*, Vol. 253, No. 1, Part 2, pages L7-L11; February 1, 1982.

**ПРОИЗВОДСТВО
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОТЛИВОК
В ДРЕВНЕМ КИТАЕ**

THE DEVELOPMENT OF IRON AND STEEL TECHNOLOGY IN CHINA. Joseph Needham. The Newcomen Society, 1958.

T'IEH KUNG K'AL-WU (CHINESE TECHNOLOGY IN THE 17TH CENTURY).

Sung Ying-Hsing, translated by E-Tu Zen Sun and Shiou-Chuan Sun. The Pennsylvania State University, 1966.

A HISTORY OF METALLURGY. R. F. Tyte. The Metals Society, 1976.

**НАУКА
ВОКРУГ НАС**

LISTENING TO THE DOPPLER SHIFT OF VISIBLE LIGHT. R. E. Crandall and E. H. Wishnow in *American Journal of Physics*, Vol. 49, No. 5, pages 477 — 478; May, 1981.

**В МИРЕ
НАУКИ**

Подписано в печать 25.02.83.
По оригинал-макету. Формат 60 × 90/8
Гарнитуры Таймс, Гелиос
Офсетная печать.
Объем 6,75 бум. л.
Усл.-печ. л. 13,50,
Печ. л. 6,25, Уч.-изд. л. 17,44
Усл. кр.-отт. 41,36
Изд. № 36/2663. Заказ 115
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
Главиздатэкспорта Госкомиздата СССР
127349, Москва, И-349,
Илимская, 7



Издательство МИР предлагает:

Д. Адам

ВОСПРИЯТИЕ СОЗНАНИЕ ПАМЯТЬ
Размышления биолога

Перевод с английского



Предлагаемая вниманию читателей книга посвящена различным проблемам восприятия, сознания и памяти. С новейших позиций рассматриваются механизмы чувствительного восприятия; в частности обсуждаются восприятие электромагнитных волн, механической вибрации, положения в пространстве. В последнее время при изучении сознания, обучения и памяти широко применяются эксперимен-

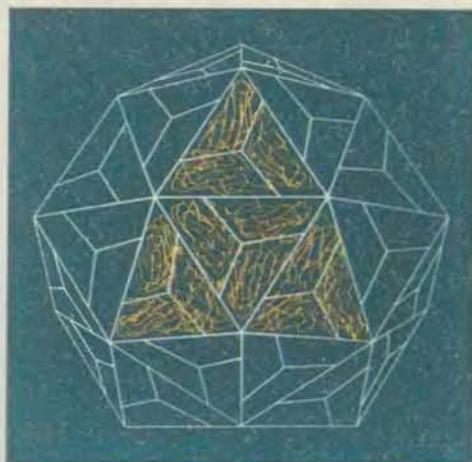
тальные модели, которым в книге уделено значительное место.

Современный подход к проблемам высшей нервной деятельности заинтересует не только нейрофизиологов, психологов, физиологов и врачей, но и широкого читателя. Книга предназначена также для студентов, аспирантов и преподавателей университетов и медицинских учебных заведений.

1981, 12 л. Цена 1 р. 20 к.



В следующем номере:



СИНТЕТИЧЕСКИЕ ВАКЦИНЫ

**БУДУЩЕЕ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
СОЕДИНЕННЫХ ШТАТОВ АМЕРИКИ**

**ОТ ЭЛЕКТРОННЫХ
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИН — К ОПТИЧЕСКИМ**

РЕШЕТОЧНАЯ ТЕОРИЯ УДЕРЖАНИЯ КВАРКОВ

О СОЛНЕЧНОЙ КОРОНЕ

БИОЛОГИЯ И ЭКОЛОГИЯ ЯДОВИТЫХ ЛЯГУШЕК

**ОСОБЕННОСТИ ЗРИТЕЛЬНОГО ВОСПРИЯТИЯ:
СКРЫТЫЕ ПРОЦЕССЫ**

**ВЕЕРНЫЕ СВОДЫ
В АНГЛИЙСКОЙ АРХИТЕКТУРЕ XIV—XVI ВВ.**

ЯЗЫК ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

ТЕРМИЧЕСКИЕ ОСЦИЛЛЯТОРЫ